

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Sede di Forlì

Corso di Laurea Magistrale in

INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM – 33

ELABORATO FINALE DI LAUREA

in Laboratorio Di Logistica Industriale LM

LA RIDUZIONE DEI RIFIUTI AGROPLASTICI:

UNO STUDIO SULL'IMPIEGO DI PACCIAMATURE BIODEGRADABILI E SUL RICICLO

DELLE RETI ANTIGRANDINE E ANTINSETTO

CANDIDATO

Riccardo Farneti

RELATORE

Prof. Augusto Bianchini

CORRELATORE

Dott. Jessica Rossi

Anno Accademico 2020/2021

Abstract

Questo studio nasce come ricerca pilota per un progetto della regione Emilia-Romagna sulla riduzione dell'uso della plastica in frutticoltura; nello specifico, si è occupato di verificare la validità economica e ambientale dei teli di pacciamatura biodegradabili e delle possibili opzioni di gestione a fine vita delle reti antigrandine e antinsetto.

I risultati ottenuti indicano che i teli di pacciamatura in Mater-Bi sono una valida alternativa ai teli in polietilene a bassa densità, sia a livello ambientale che a livello economico, sia per le coltivazioni brevi che per le coltivazioni di durata maggiore, come la fragola unifera. Sono necessari tuttavia ulteriori studi a lungo termine per verificare l'effettiva compatibilità ambientale.

Attualmente le reti antigrandine e antinsetto dismesse vengono ritirate da aziende private e inviate a riciclo in quanto realizzate in HDPE. Questa tipologia di gestione presenta però alcune potenziali inefficienze dovute ad una mancata coordinazione delle realtà coinvolte. Si conclude che l'implementazione di un sistema di gestione integrato possa sfruttare appieno le potenzialità di questo ingente flusso di materiale.

Poiché non risulterebbero studi approfonditi né sui teli di pacciamatura né sulle reti antigrandine, l'analisi condotta è stata accompagnata da un'estensiva e sistematica trattazione necessaria alla completa comprensione dei temi indagati.

La collaborazione dei fornitori, delle aziende agricole e dei riciclatori coinvolti nella filiera di questi prodotti polimerici è stata fondamentale per il compimento di questa ricerca e sarà cruciale anche nella futura razionalizzazione dell'utilizzo della plastica in agricoltura.

Sommario

1 – Introduzione alle agroplastiche	7
1.1 Utilizzo della plastica in campo agricolo.....	7
1.1.1 Tipi di plastiche utilizzate	7
1.1.2 Applicazioni più comuni.....	8
1.1.3 Agricoltura Mondiale	9
1.1.4 Agricoltura Europea.....	10
1.1.5 Problema del riciclaggio	11
1.1.6 Regolamentazione europea sull'uso della plastica in agricoltura	12
1.2 Utilizzo della plastica nella filiera frutticola italiana.....	13
1.3 Polimeri biodegradabili (e/o compostabili) e impianti di compostaggio	13
1.4 Contesto e obiettivi di questa tesi.....	14
2 – Impiego di materiali alternativi alla plastica in campo	15
2.1 Identificazione e classificazione dei materiali disponibili per i film per pacciamatura.	15
2.1.1 Pacciamatura: definizione e utilizzo generale	15
2.1.2 Materiali attualmente utilizzabili per la pacciamatura	16
2.1.3 Film di pacciamatura in Polietilene (PE)	16
2.1.4 Film di pacciamatura in plastica biodegradabile	21
2.1.5 Film di pacciamatura biodegradabile spruzzabile	27
2.1.6 Film di pacciamatura in cellulosa	29
2.1.7 Pacciami naturali	30
2.2 Valutazione degli impatti ambientali.....	34
2.2.1 Biodegradabilità.....	34
2.2.2 Salute del suolo e delle colture successive.....	37
2.2.3 Contaminanti residui	41
2.3 Studio di fattibilità tecnico-economica.....	44
2.2.1 Analisi Tecnica	44
2.2.2 Analisi Economica	54
2.2.3 Stima comparativa dei costi di pacciamatura per film in Polietilene e Mater-Bi.....	66
2.4 Conclusioni raggiunte sulle varie soluzioni di pacciamatura.....	74
2.4.1 Pacciamatura della fragola	75

3 – Favorire il riciclo e il riuso delle reti antigrandine e antinsetto	79
3.1 Introduzione alle reti antigrandine e antinsetto	79
3.1.1 Proprietà richieste	82
3.2 Identificazione dei materiali plastici utilizzati per realizzare reti antigrandine/antinsetto	85
3.2.1 Uso di bioplastiche per le reti agricole	85
3.2.2 Analisi delle reti commercialmente disponibili	85
3.2.3 Proprietà del HDPE	86
3.2.4 Fenomeni degradativi e stabilizzanti	87
3.2 Caratterizzazione delle reti dismesse: quantità e qualità	92
3.2.1 Quadro Normativo.....	92
3.2.2 Quantitativi disponibili	92
3.2.3 Facilità di raccolta	95
3.2.4 Contaminanti	95
3.4 Analisi delle possibili soluzioni di riciclo	98
3.4.1 Termovalorizzazione.....	99
3.4.2 Riciclo Chimico.....	100
3.4.3 Riciclo Meccanico	103
3.5 Sistema attuale: organizzazione e costi.....	105
3.5.1 Riciclo meccanico.....	105
3.5.2 Termovalorizzazione.....	106
3.5.3 Riciclo chimico	106
3.6 Analisi Sperimentali: Obiettivo e Metodi	107
3.7 Valutazione degli impatti ambientali.....	109
3.7.1 Termovalorizzazione.....	109
3.7.2 Riciclo chimico	110
3.7.3 Riciclo meccanico.....	110
3.7.4 LCA: Confronto tra riciclo chimico, riciclo meccanico, incenerimento e discarica.....	110
3.8 Riutilizzo delle reti antigrandine e antinsetto	115
3.9 Conclusioni raggiunte sulla gestione delle reti a fine vita	117
3.9.1 Modello di gestione integrato delle reti antigrandine e antinsetto.....	118
4 – Riepilogo	121
Bibliografia.....	125

1 – Introduzione alle agroplastiche

In questo capitolo si è contestualizzato l'utilizzo della plastica in agricoltura, fornendo una panoramica dei materiali, delle applicazioni e delle quantità utilizzate. L'attenzione si sposta progressivamente dal quadro generale al contesto specifico di questo studio.

1.1 Utilizzo della plastica in campo agricolo

Per anni il crescente utilizzo della plastica in ambito agricolo ha permesso agli agricoltori di aumentare la produzione agricola, di migliorare la qualità del cibo e di ridurre l'impatto ambientale delle loro attività. (Agriculture, 2018)

Grazie all'utilizzo di manufatti polimerici in agricoltura si può regolare la temperatura e l'umidità dell'ambiente. Tramite la fotoselettività si può stimolare la produttività delle colture e ridurre la crescita di malerbe. Si possono risparmiare acqua e nutrienti grazie ai condotti di irrigazione, l'acqua piovana può essere raccolta in serbatoi e le colture possono essere piantate nelle aree desertiche grazie a questi sistemi. L'uso e l'emissione di pesticidi può essere ridotto tenendo le colture al riparo in serre o sotto i teli per la pacciamatura. (Agriculture, 2018)

Con il termine **plasticulture** (italianizzato: plasticoltura) ci si riferisce alla pratica di utilizzare materiali plastici in campo agricolo. Tra di essi abbiamo pellicole, reti e teli di protezione, nastri e tubi per l'irrigazione, cavi in plastica per imballaggio, vasi. Il termine è più spesso usato per descrivere tutti i tipi di coperture di piante e suolo in plastica. Tali coperture plastiche possono essere film di pacciamatura, coperture protettive di filari, tunnel alti e bassi (polytunnel), serre.

Si stima che nel 2019 la plastica utilizzata in agricoltura sia stata di 6,7 milioni di tonnellate, il 2% della produzione globale di plastica. (Browne, 2020)

1.1.1 Tipi di plastiche utilizzate

In agricoltura si utilizza un'ampia gamma di plastiche differenti, tra cui le Poliolefine (Polietilene (PE – film plastici), il Polipropilene (PP – Cavi di imballaggio), l'Etilene Vinil Acetato (EVA – Tubi di irrigazione) e meno frequentemente il Polivinilcloruro (PVC – Tubature e coperture), il Policarbonato (PC) e il Polimetilmetacrilato (PMMA) entrambi utilizzati per i pannelli trasparenti delle serre. (Agriculture, 2018)

Il film di Polietilene (PE) è il più utilizzato dai coltivatori in quanto economico, versatile e facilmente lavorabile. È disponibile in vari spessori, sotto forma di Polietilene a Bassa Densità (LDPE) e Polietilene Lineare a Bassa Densità (LLDPE). Questi materiali possono essere modificati con l'aggiunta di elementi che portino un beneficio alla crescita della pianta: regolazione della traspirazione per ridurre il consumo di acqua, stabilizzazione UV per ridurre la temperatura del suolo e prevenire lo sviluppo di parassiti, eliminazione delle radiazioni fotosintetiche per prevenire la crescita di piante infestanti, opacità ai raggi infrarossi (IR), anti condensa e fluorescenza. (Espí, Salmerón, Fontecha, García, & Real, 2006)

Il Polipropilene (PP) è spesso utilizzato per i cavi di imballaggio delle colture.

1.1.2 Applicazioni più comuni

Qui di seguito si fornisce una breve descrizione delle principali applicazioni della plastica in campo agricolo, i benefici che portano all'agricoltura e la tipologia di materiale utilizzato.

Figura 1. A sinistra una pacciamatura in polietilene nero sotto un tunnel in polietilene trasparente, a destra una serra in policarbonato. (Foto scattate nel 2017 e nel 2021 nella provincia di Forlì-Cesena)



Serre e coperture per tunnel accessibili (walk-in)

Una serra è una grande struttura con ventilazione automatizzata in cui è possibile stare in piedi e lavorare. I tunnel alti, detti anche accessibili o walk-in, sono strutture ad arco che vengono ventilate manualmente arrotolando i lati. Le pellicole per serre e tunnel alti solitamente hanno uno spessore di 80-220 μm e 20 m di larghezza e hanno una durata compresa tra 6 e 45 mesi che dipende da diversi fattori (Espí, Salmerón, Fontecha, García, & Real, 2006).

I film in polietilene monostrato sono più adatti per condizioni ambientali meno estreme, mentre le coperture multistrato composte da tre strati - uno strato di EVA19 inserito tra due strati di polietilene a bassa densità - ha dimostrato di avere una migliore prestazione in condizioni difficili. (Adam, Kouider, Youssef, Hamou, & Saiter, 2005)

L'utilizzo delle serre permette di creare le condizioni ideali di temperatura, umidità e ventilazione, permettendo alle piante di crescere più rapidamente e senza problemi.

Coperture per tunnel bassi

Le coperture dei tunnel bassi sono larghe circa 1 m e alte 1 m, e hanno una pellicola di polietilene più sottile rispetto alle coperture dei tunnel grandi, solitamente inferiori a 80 μm . La loro durata è più breve di quella delle versioni più grandi, di solito hanno vita utile di 6-8 mesi. L'uso di tunnel bassi è meno popolare sia delle serre/tunnel walk-in (plastica più costosa e durevole) che del pacciame di plastica (plastica più economica e poco durevole). (Espí, Salmerón, Fontecha, García, & Real, 2006)

I tunnel bassi hanno caratteristiche analoghe alle serre, e si differenziano per complessità ed altezza. Le colture che più spesso vengono coltivate in tunnel sono gli asparagi, il cocomero, le fragole, ed altri.

Pacciame di plastica

La pacciamatura o la copertura del terreno con pellicola plastica (solitamente nera, trasparente o bianca) aiuta a mantenere l'umidità riducendo l'evaporazione. Migliora anche le condizioni termiche per le radici della pianta, evita il contatto tra la pianta e il terreno e impedisce all'erba di crescere e competere per l'acqua e i nutrienti.

La pacciamatura consiste nel posizionare sul terreno una sottile pellicola di plastica, facendo fori a intervalli regolari per alloggiare i semi da piantare o posizionare direttamente le piante nelle fasi iniziali della crescita. Le pellicole rimangono in posizione per tutta la durata della coltivazione (solitamente 2-4 mesi) e di solito hanno uno spessore di 12-80µm. Le funzioni principali del pacciame plastico sono l'isolamento e il mantenimento di una temperatura e un'umidità costanti del suolo, la riduzione dell'evaporazione dell'acqua, riducendo al minimo i tempi di semina e di raccolta, la prevenzione della crescita di erbe infestanti e dell'erosione.

Possono essere utilizzati film pigmentati o incolore, ognuno con specifici vantaggi e svantaggi rispetto agli altri. (Lamont, 1999) (Amare & Desta, 2021)

Reti protettive

Allo scopo di preservare la produzione ortofrutticola si possono utilizzare vari tipi coperture a rete con funzionalità differenti. Abbiamo reti anti uccelli e anti insetti che preservano le produzioni frutticole; reti antigrandine, antipioggia/anticracking e anti vento che proteggono le piante dagli agenti atmosferici; reti di ombreggiatura che riducono l'esposizione solare e la temperatura.

Serbatoi in plastica e sistemi di irrigazione

Quando combinati, i serbatoi in plastica e i sistemi di irrigazione danno un contributo essenziale alla gestione dell'acqua. L'acqua può essere immagazzinata in pozzi rivestiti con materiali plastici per evitare perdite e distribuita tramite tubi, sistemi di irrigazione a goccia e sistemi per la circolazione dell'acqua.

Insilato

Questa applicazione permette di immagazzinare cereali e paglia per l'alimentazione animale durante l'inverno. I film plastici utilizzati per lo stoccaggio degli insilati sono resistenti e il contenuto può essere facilmente trasportato e conservato per lunghi periodi.

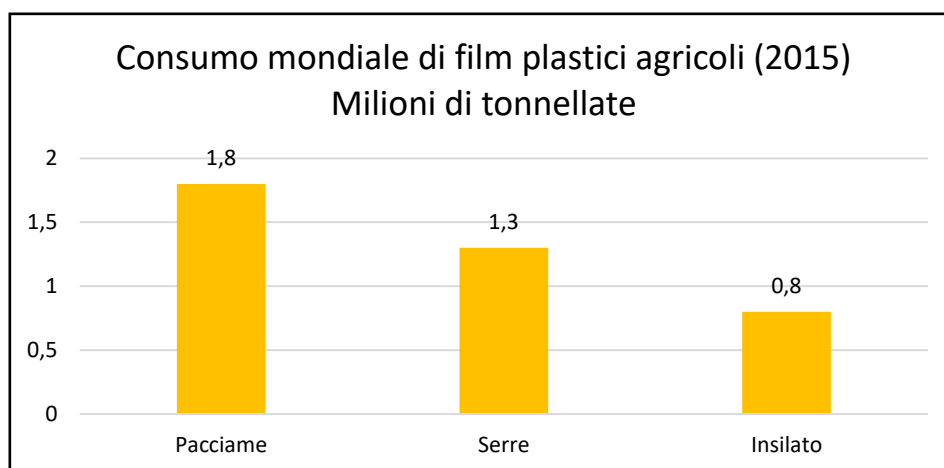
Altre applicazioni

Tra le applicazioni della plastica in campo agricolo abbiamo inoltre le casse per la raccolta; vasi; sacchi e contenitori per sementi e fertilizzanti; funi e nastri. (Scarascia-Mugnozza, Sica, & Russo, 2011)

1.1.3 Agricoltura Mondiale

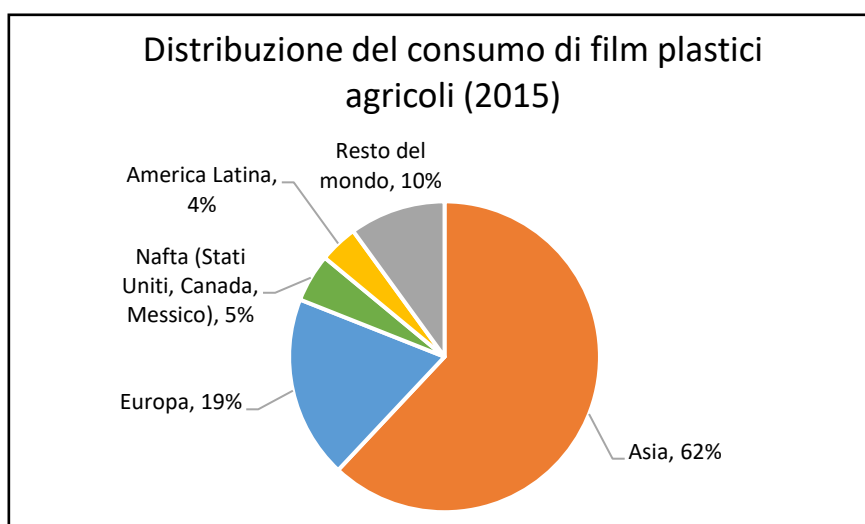
Secondo le stime per il 2015 del consumo totale di film polimerici per scopi agricoli (figura 2), la pacciamatura è l'applicazione in cui è stata utilizzata la maggior quantità di plastica, seguita dalla copertura delle serre e la produzione di insilato.

Figura 2. Stima del consumo mondiale di film plastici nel 2015. (Malinconico, 2015)



Per quanto riguarda la distribuzione mondiale del consumo di film plastici in campo agricolo (figura 3), le stime per il 2015 vedono l'Asia ampiamente al primo posto, seguita dall'Europa e poi dal resto del mondo.

Figura 3. Distribuzione del consumo di film plastici nel 2015. (Malinconico, 2015)



Il materiale base utilizzato nella maggior parte di queste applicazioni è il polietilene (PE) nella versione a bassa densità (LDPE) e nella versione lineare a bassa densità (LLDPE).

1.1.4 Agricoltura Europea

Lo studio di Scarascia et al. (2012) ha evidenziato la diffusione dell'utilizzo di coperture protettive nei vari paesi dell'Unione Europea. Sono stati stimati gli ettari di suolo occupati da serre, pacciame e altri tipi di coperture (tabella 1). Da questo studio, è risultato che la Spagna, l'Italia e la Francia sono le nazioni che fanno uso più estensivo di queste applicazioni polimeriche.

Tabella 1. Principali applicazioni agricole della plastica per colture protette nell'Unione Europea e distribuzione di impiego in Spagna, Francia e Italia (Scarascia-Mugnozza, Sica, & Russo, 2011)

Regione	Serre e tunnel alti (ha)	% sul totale	Tunnel bassi (ha)	% sul totale	Pacciamatura (ha)	% sul totale	Coperture dirette (ha)	% sul totale
Totale Unione Europea	111550		68991		427059		61800	
Spagna	53235	48%	14641	21%	120039	28%	1400	2%
Italia	25000	22%	26000	38%	85000	20%	12000	19%
Francia	9200	8%	15000	22%	10000	2%	11000	18%

Tra le coperture dirette si annoverano i teli anti-congelamento, le reti protettive anti-parassiti, anti-grandine, ombreggianti ed altri.

La pacciamatura è l'applicazione agricola di film plastici che ricopre la maggiore superficie coltivata, seguita dalle serre e poi da tunnel bassi e coperture dirette.

1.1.5 Problema del riciclaggio

Un problema significativo della plasticoltura è lo smaltimento dei materiali plastici al termine del loro ciclo di vita, in quanto il grosso del flusso di rifiuti è composto da film polimerici, notoriamente noti per la loro scarsa riciclabilità.

Ad esempio, il riciclaggio del pacciame plastico è reso ancora più difficile dal fatto che solitamente sia bagnato o sporco. Il film di pacciamatura inoltre è molto sottile e si rompe rapidamente, spesso impendendone la raccolta per il riciclaggio una volta degradato. (Reese, 2020)

Figura 4. Esempio di balle di film di pacciamatura in polietilene rimossi dal campo. Si evidenzia lo stato di contaminazione del materiale. (Foto scattata a Cesena nel 2021)



La plastica utilizzata in agricoltura è difficile da riciclare a causa della contaminazione da prodotti chimici agricoli. Inoltre, la degradazione della plastica in microplastiche è dannosa per la salute del suolo, i microrganismi e gli organismi benefici come i lombrichi. Attualmente non è stato scientificamente appurato se vi siano o meno impatti negativi sul cibo o sulla salute umana. (Browne, 2020)

A causa di questi problemi, alcuni enti governativi (ad esempio: l'Unione Europea) stanno iniziando a regolamentare l'utilizzo della plastica in campo agricolo.

1.1.6 Regolamentazione europea sull'uso della plastica in agricoltura

Nell'Unione Europea è in vigore la Direttiva 2008/98 / CE sulla gestione dei rifiuti, di cui l'articolo 8 afferma che "ogni stato membro può introdurre il concetto di ERP (Extended Producer Responsibility) nel proprio quadro giuridico oltre a decidere come incoraggiare i produttori a partecipare alla prevenzione, riutilizzo, riciclaggio e recupero dei prodotti di plastica usati." (Agricultural plastics european regulation: APE Europe, 2016). Inoltre, nel 2018, la Commissione europea ha pubblicato una comunicazione che definisce una strategia per la gestione della plastica nell'economia circolare. Ha menzionato il contenimento degli scarti e dei rifiuti di plastica, ad esempio riducendo la plastica monouso, affrontando le fonti di rifiuti marini, limitando l'uso di plastica oxo-degradabile e frenando l'inquinamento da microplastiche. (Legislative train schedule, 2017)

Diversi paesi hanno già implementato dei National Collection Schemes (NCS) per la gestione dei rifiuti agroplastici. Tra di essi abbiamo Francia, Germania, Irlanda, Finlandia. Altri paesi, come Regno Unito e Spagna, li stanno attualmente implementando. (Agriculture, 2018)

Questi NCS si basano appunto sulla responsabilità estesa del produttore (ERP - Extended Producer Responsibility), condivisa tra i trasformatori, distributori, agricoltori e altre parti interessate. L'ERP consiste in una tassazione sulla vendita dei manufatti plastici o delle materie prima. La nuova plastica immessa sul mercato finanzia il proprio riciclo attraverso questo eco-contributo applicato sul prezzo di vendita del prodotto.

Una volta recuperate dalle aziende agricole, le plastiche vengono solitamente lavate per eliminare sabbia, erbe e pesticidi, prima di essere macinate ed estruse in pellet. Il materiale può quindi essere riutilizzato nella produzione di articoli come mobili da esterno. Quando il riciclaggio meccanico non è praticabile, il riciclaggio chimico e il recupero energetico sono opzioni complementari alle diverse tecnologie disponibili.

La sfida è garantire che le pellicole abbiano la massima durata possibile e allo stesso tempo siano smaltite correttamente alla fine della loro vita con il minimo danno per l'ambiente.

Nel 2020, l'UE ha pubblicato il suo piano d'azione per l'economia circolare. Comprende una serie di misure per ridurre i rifiuti di plastica e affrontare la presenza di microplastiche nell'ambiente. Ha inoltre espresso la possibilità di affrontare le questioni di sostenibilità sviluppando un quadro politico sulle plastiche biodegradabili o compostabili. (52020DC0098 - EN, 2020)

1.2 Utilizzo della plastica nella filiera frutticola italiana

All'interno della filiera frutticola le principali applicazioni della plastica sono i film di pacciamatura, le coperture a rete (ombreggianti, anticracking, anti-grandine, anti-uccelli e anti-insetti), i sistemi di irrigazione. Inoltre, un ingente flusso di materiale plastico destinato allo smaltimento è dovuto al confezionamento dei frutti. (CRPV di Cesena, 2020)

L'utilizzo di coperture protettive e apparati di irrigazione in plastica consente di creare le condizioni favorevoli a massimizzare la produzione frutticola, mentre un adeguato confezionamento consente di aumentare la shelf-life dei frutti raccolti.

Per questi motivi, l'utilizzo della plastica in frutticoltura è in costante aumento.

Lo svantaggio principale dell'utilizzo di questi sistemi è la gestione del materiale plastico al termine della loro vita utile. Se non viene opportunamente smaltita, la plastica utilizzata nella coltivazione frutticola può entrare nell'ecosistema, degradarsi e danneggiarlo irrimediabilmente.

Le confezioni in plastica sono l'applicazione con la vita utile più breve (massimo qualche settimana), seguite a ruota dal film per la pacciamatura (qualche mese), poi dalle reti e dai sistemi di irrigazione (qualche anno).

Essendo il consumo inversamente proporzionale rispetto alla vita utile, si può supporre che la maggior quantità di rifiuto plastico in campo frutticolo sia dovuto al packaging e ai film di pacciamatura, seguito dalle reti di protezione.

Dato il crescente consumo di plastica nella filiera frutticola e l'elevata quantità di rifiuti prodotti, risulta fondamentale trovare il modo di minimizzare l'impatto ambientale che ne consegue, trovando il modo di ridurre, riciclare e riutilizzare la plastica nella frutticoltura.

Altri oggetti di plastica utilizzati in frutticoltura sono le cassette di raccolta e trasporto, ma data la loro riusabilità e facile riciclabilità, non costituiscono un problema.

1.3 Polimeri biodegradabili (e/o compostabili) e impianti di compostaggio

Una delle possibili soluzioni al problema dei rifiuti plastici in campo ortofrutticolo è la sostituzione dei materiali polimerici convenzionali con plastiche biodegradabili e compostabili.

Dall'attività di monitoraggio condotta dal CIC, in collaborazione con CONAI, COREPLA e ASSOBIOPLASTICHE tra il 2015 e il 2017, è risultato che in Italia la quota di materiali plastici biodegradabili e compostabili si attesta mediamente intorno all'1,4% in peso (circa 58.000 t) del totale del rifiuto organico inviato agli impianti di compostaggio. Il grosso di questa frazione di plastica compostabile è formato prevalentemente da manufatti flessibili, riconducibili ai sacchetti utilizzati per il conferimento dei rifiuti. (Negroni, 2019) (CRPV di Cesena, 2020)

È quindi necessario indagare l'impatto dell'aumento della frazione plastica compostabile e l'introduzione di manufatti rigidi sugli impianti di compostaggio ed il compost prodotto.

Dal monitoraggio degli impianti di compostaggio risulta che il compost ottenuto è sempre stato conforme agli standard. È inoltre risultato che il processo di separazione meccanica delle frazioni non compostabili (come ad esempio le plastiche convenzionali, che costituiscono il 3,1% in peso), provoca la perdita di una significativa quantità di imballaggi polimerici compostabili, a causa del cosiddetto “effetto di trascinamento”.

Per limitare la perdita di questi imballaggi polimerici compostabili, risulta quindi opportuno ridurre la frazione di plastica non compostabile all'interno del flusso di rifiuti organici.

Si ritiene inoltre necessario individuare l'impatto dei materiali plastici biodegradabili e/o compostabili che sfuggono alla raccolta e vengono dispersi nell'ambiente.

1.4 Contesto e obiettivi di questa tesi

Questa tesi nasce come lavoro di ricerca preliminare per il progetto STEP: “Strategie per la riduzione e la razionalizzazione dell'uso delle Plastiche nella filiera” della regione Emilia-Romagna.

Il progetto STEP nasce con lo scopo di ridurre l'utilizzo della plastica in frutticoltura, agendo sia sul campo che sul packaging, e vede la partecipazione di varie aziende agricole e diversi enti di ricerca, tra cui l'Università di Bologna ed il Centro Ricerca Produzioni Vegetali (CRPV) di Cesena (FC).

Due sono le attività su cui si pone l'attenzione. La prima è individuare materiali alternativi ecologicamente compatibili, biodegradabili e compostabili da utilizzare lungo tutta la filiera. La seconda è ideare modelli per valorizzare questi prodotti alla fine del ciclo di vita.

Lo scopo principale di questa tesi è di verificare l'impatto ambientale dell'utilizzo della plastica in campo agricolo, in particolare nell'ambito frutticolo, e di ricercare possibili soluzioni più eco-compatibili. Vista la loro larga diffusione e la loro inclusione all'interno del progetto STEP, le due applicazioni che si indagheranno sono i film di pacciamatura e le reti di antigrandine e antinsetto.

Per quanto riguarda i teli di pacciamatura, si verificherà la validità economica e ambientale delle opzioni biodegradabili e rinnovabili, mentre per le reti antigrandine e antinsetto si caratterizzerà il materiale dismesso per quantità e qualità, quindi si analizzeranno le possibili opzioni di gestione.

Gli studi condotti verranno accompagnati da un'estensiva e sistematica trattazione, attualmente assente in letteratura e necessaria alla completa comprensione degli argomenti esposti.

2 – Impiego di materiali alternativi alla plastica in campo

In questa sezione andremo ad indagare l'utilizzo degli attuali teli di pacciamatura in plastica e delle loro alternative biodegradabili/compostabili, con l'obiettivo di misurarne la sostenibilità ambientale e economica in relazione ai valori agronomici rilevati.

2.1 Identificazione e classificazione dei materiali disponibili per i film per pacciamatura.

In questo capitolo si analizzeranno tutte le soluzioni disponibili per la pacciamatura agroindustriale, considerando sia i materiali convenzionali che le alternative commerciali biodegradabili.

2.1.1 Pacciamatura: definizione e utilizzo generale

Il pacciame è uno strato di materiale applicato sulla superficie del suolo. Il pacciame può essere di natura organica o inorganica, può essere permanente o temporaneo. I pacciami naturali e biodegradabili possono essere incorporati naturalmente nel terreno dall'attività di vermi, funghi e altri organismi.

Il processo è utilizzato sia nella produzione di colture commerciali che nel giardinaggio e, se applicato correttamente, può migliorare la produttività del suolo.

Per la pacciamatura possono essere utilizzati molti materiali differenti, a seconda di ciò che si vuole ottenere: regolare l'umidità e la temperatura del suolo, sopprimere la crescita delle erbe infestanti e anche per l'estetica (nel giardinaggio). Il pacciame viene applicato alla superficie del suolo, intorno ad alberi, sentieri, aiuole, per prevenire l'erosione del suolo sui pendii e nelle aree di produzione di colture floreali e orticole. Gli strati di pacciame organico sono in genere spessi qualche centimetro, mentre per i film plastici si parla di qualche decimo di millimetro.

Il pacciame viene applicato in vari periodi dell'anno a seconda dello scopo. Verso l'inizio della stagione vegetativa, il pacciame serve inizialmente ad aumentare la temperatura del terreno aiutandolo a trattenere il calore che altrimenti andrebbe perso durante la notte. Ciò consente la semina e il trapianto precoci di alcune colture e incoraggia una crescita più rapida. Con il progredire della stagione, il pacciame stabilizza la temperatura e l'umidità del suolo e impedisce la crescita di erbe infestanti dai semi presenti nel terreno. Nei climi temperati, l'effetto del pacciame dipende dal periodo dell'anno in cui vengono applicati: se applicati in autunno e in inverno, vengono utilizzati per ritardare la crescita delle piante perenni in primavera o prevenirne la crescita in inverno durante i periodi caldi, limitando i danni da disgelo.

L'effetto del pacciame sul contenuto di umidità del suolo è complesso. Il pacciame forma uno strato tra il suolo e l'atmosfera riducendo l'evaporazione. (Lal & Stewart, 2012)

Tuttavia, il pacciame può anche impedire all'acqua di raggiungere il suolo assorbendo o bloccando l'acqua da piogge leggere. Inoltre, strati di pacciame organico eccessivamente spessi e film plastici possono ridurre la concentrazione di ossigeno nel terreno. (Upadhyaya & Blackshaw, 2007).

2.1.2 Materiali attualmente utilizzabili per la pacciamatura

I materiali utilizzati come pacciame sono molto vari e dipendono dalle caratteristiche richieste. L'uso prende in considerazione molti fattori tra cui la disponibilità, il costo, l'effetto che ha sul suolo e sulle colture, il contenuto di semi di piante infestanti o altri agenti patogeni, la degradabilità.

Il materiale di pacciamatura può essere a base di:

- **Plastica:** utilizzata nella produzione commerciale su larga scala. Il film plastico di pacciamatura viene depositato da un macchinario dedicato, trainato da un trattore, su appositi letti di terra rialzati realizzati precedentemente. Semi e piante vengono piantate attraverso fori e fessure nella pellicola di plastica. Richiede l'irrigazione a goccia, con un apposito nastro di irrigazione posto sotto la plastica, in quanto il pacciame di plastica è impermeabile all'acqua
 - Non biodegradabile:
 - Polietilene (PE): utilizzato per la produzione agricola in tutto il mondo perché aiuta a controllare le erbacce, conservare l'umidità e la temperatura del suolo, aumentare la resa e la qualità del raccolto rispetto alla coltivazione di piante su terreno spoglio (Kasirajan & Ngouajio, 2012)
 - Polipropilene: a differenza del polietilene, viene utilizzato per le piante perenni (Dvořák, et al., 2010)
 - Biodegradabile: i pacciami biodegradabili sono realizzati a partire da amidi uniti a zuccheri vegetali o fibre di poliestere. Hanno proprietà analoghe alle pacciamature in polietilene, ma al termine della stagione iniziano a degradarsi. Non necessitano di essere rimossi e possono essere effettivamente incorporati nel terreno.
- **Materiali naturali:** limitati alla produzione su piccola scala, sia commerciale che non. Il materiale organico viene depositato sul terreno manualmente o tramite apposite macchine distributrici, trainate da trattori.
 - Residui organici: erba tagliata, foglie, fieno, paglia, scarti alimentari, corteccia sminuzzata, segatura, gusci, trucioli di legno, carta e cartone, lana, letame animale, ecc. Molti di questi materiali agiscono come un sistema di compostaggio, arricchendo il terreno (come accade nella pratica dello sheet mulching).
 - Compost: vengono utilizzati materiali completamente compostati per evitare possibili problemi di fitotossicità. Idealmente si utilizzano materiali privi di semi per evitare che le malerbe vengano introdotte dal pacciame.

2.1.3 Film di pacciamatura in Polietilene (PE)

Il film di polietilene a bassa densità (LDPE) è la plastica più comunemente usata per le sue buone proprietà meccaniche e la facilità di installazione e rimozione, nonché per la sua capacità di trasmettere le radiazioni a onde lunghe (Ammala, et al., 2011). L'uso di LDPE è in aumento a causa dei nuovi mercati emergenti nei paesi asiatici dominati da Cina e India. Nel 2006, il consumo mondiale è stato di circa 700.000 tonnellate/anno, pari a circa il 10% del consumo totale di plastica in agricoltura (Espí, Salmerón, Fontecha, García, & Real, 2006).

Dal 2007, le dinamiche di mercato del pacciame plastico sono cambiate con il film LDPE sostituito da film misti HDPE (40%), LL/LDPE (60%).

Figura 5. Esempio di pacciamatura in polietilene per la coltivazione di ortaggi. (Azienda Agricola “L’Orto di Enrico”, Forlì, 2021)



I film di pacciamatura in polietilene possono prevenire l’erosione del suolo, ridurre la necessità di diserbare, preservare l’umidità e aumentare la temperatura del suolo. In definitiva, permette di ridurre la quantità di lavoro che un agricoltore deve svolgere, nonché la quantità di erbicidi applicati durante il periodo di crescita. I pacciami neri e trasparenti catturano la luce solare e riscaldano il terreno aumentando il tasso di crescita. Il bianco e altri colori riflettenti invece mantengono il terreno più fresco, e hanno minori proprietà di soppressione delle malerbe. (Schonbeck, s.d.). Questo pacciame può richiedere l’irrigazione a goccia in quanto riduce la quantità di acqua che raggiunge il suolo. Il pacciame in polietilene deve essere rimosso alla fine della stagione poiché quando inizia a degradarsi si divide in pezzi più piccoli, inquinando il suolo.

Benefici agricoli della pacciamatura in PE

L’uso di film di pacciamatura in plastica combinato con l’irrigazione a goccia ha molti vantaggi, quali:

Temperatura del suolo

L’uso di pacciame di plastica altera la temperatura del suolo. I pacciami neri e trasparenti intercettano la luce solare, riscaldando il terreno consentendo una semina anticipata e incoraggiando una crescita più rapida all’inizio della stagione di crescita. Il pacciame bianco riflette il calore del sole riducendo efficacemente la temperatura del suolo. Questa riduzione della temperatura può aiutare a piantare le piante a metà estate quando potrebbe essere necessario un terreno più fresco. (Espí, Salmerón, Fontecha, García, & Real, 2006)

Ritenzione di umidità nel suolo

I pacciami di plastica riducono la quantità di acqua persa dal terreno a causa dell’evaporazione. Ciò significa che sarà necessaria meno acqua per l’irrigazione. I pacciami di plastica aiutano anche a distribuire uniformemente l’umidità al terreno, riducendo lo stress delle piante.

Gestione delle piante infestanti

I pacciami di plastica impediscono alla luce solare di raggiungere il terreno, inibendo la maggior parte delle erbacce annuali e perenni. I buchi nel pacciame per le piante tendono ad essere l'unico percorso per la crescita delle erbacce.

Riduzione della lisciviazione del fertilizzante

L'uso dell'irrigazione a goccia in combinazione con il pacciame di plastica consente di ridurre la lisciviazione dei fertilizzanti. Le irrigazioni per inondazione, scorrimento e aspersione applicano grandi quantità di acqua al suolo che, nel cosiddetto processo di lisciviazione, trascinano l'azoto e altri nutrienti a profondità al di sotto della zona radicale. L'irrigazione a goccia applica quantità inferiori di acqua con i fertilizzanti già miscelati, in modo da applicarli alla zona delle radici secondo necessità. Ciò riduce anche la quantità di fertilizzante necessaria per una crescita adeguata delle piante rispetto alla fertilizzazione diffusa.

Miglioramento della qualità del raccolto

I pacciami di plastica mantengono i frutti in maturazione lontano dal terreno. Questo contatto ridotto con il suolo riduce il marciume della frutta e mantiene la frutta e la verdura pulite. Ciò ad esempio è vantaggioso per la produzione di fragole.

Riduzione della compattazione del suolo

Il pacciame di plastica che ricopre il terreno riduce l'effetto di compattazione superficiale (formazione di crosta) della pioggia e della luce solare. Il terreno sotto il pacciame di plastica rimane libero e ben aerato. Ciò aumenta la quantità di ossigeno nel suolo e favorisce l'attività microbica.

Riduzione dei danni alle radici

L'uso del pacciame plastico crea un'area praticamente priva di erbacce intorno alla pianta, eliminando la necessità di lavorazione del suolo tranne che tra i filari di plastica. I danni alle radici associati alla coltivazione meccanica vengono quindi eliminati.

A causa di questi fattori, l'uso del pacciame plastico può portare ad un miglioramento della crescita complessiva della pianta.

Svantaggi della pacciamatura in PE

Costi

I vantaggi derivanti dall'utilizzo del pacciame di plastica hanno un costo maggiore rispetto alla semina in terreno nudo. Questi costi annoverano l'attrezzatura, la pellicola di plastica utilizzata come pacciamatura, le trapiantatrici progettate per i letti di plastica e la manodopera aggiuntiva durante l'installazione e la rimozione delle pellicole di pacciamatura.

È necessario utilizzare attrezzature specializzate per la creazione dei letti di pacciamatura in plastica. Queste macchine modellano il terreno, rialzandolo, e vi applicano sopra il film plastico.

Vi sono quindi macchine seminatrici e trapiantatrici che effettuano un'incisione sul film plastico e depositano/trapiantano sul terreno sottostante il seme o la piantina. Il trapianto manuale è un'opzione, ma è piuttosto inefficiente.

La rimozione del pacciame di plastica è un costo aggiuntivo non influente in quanto richiede manodopera e attrezzature aggiuntive, spesso appositamente progettate.

La rimozione di questi film richiede molto tempo: circa 10 - 20 ore uomo/ha se fatto manualmente, 5 – 8 ore uomo/ha con l'uso di una macchina dedicata (Plastic mulch machine can cut labor costs in half, 2015).

Problematiche ambientali

I film di pacciamatura in PE non sono degradabili e di conseguenza rappresentano un rischio ambientale potenzialmente enorme a lungo termine a causa del loro accumulo e come inquinante e contaminante.

La rimozione e il corretto smaltimento di queste plastiche sono tecnicamente ed economicamente onerosi (Kyrikou & Briassoulis, Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review, 2007). Questo accumulo potrebbe causare sia una riduzione della resa delle colture sia problemi ambientali (Rillig, 2012).

Smaltimento e riciclabilità

Oltre al problema della rimozione dal suolo, i film di pacciamatura in plastica risultano difficilmente riciclabili.

Molti riciclatori di plastica non accettano il pacciame di PE perché contaminato da terra e detriti colturali (fino al 50% in peso) dopo l'uso (Kasirajan & Ngouajio, 2012).

Il pacciame di plastica, una volta rimosso a difficoltà dal campo agricolo, è quindi destinato a termovalorizzazione o accumulo in discarica.

Applicazione

Il letto di pacciamatura deve essere privo di grosse zolle di terra e residui organici.

Una macchina detta pacciamatrice viene tirata sul campo creando una fila di pacciame di plastica che copre un letto di semina. Questi letti possono essere piani, ovvero a livello con la superficie del terreno tra le file, o rialzati, ovvero ad un livello più alto della superficie del terreno interfilare.

La pacciamatrice concettualmente è composta di una scatola di formatura che crea il letto, un rullo che ricopre il letto con il film plastico, e due coltri che coprono i bordi del film plastico per trattenere la plastica sulla superficie del terreno.

Sotto lo strato di plastica viene posizionato anche la linea di irrigazione a goccia.

Semina e trapiantatura

È molto importante che la plastica sia piuttosto tirata e aderente al suolo, in modo da rendere più agevole il processo di semina.

Piantare richiede anche attrezzature specializzate e può essere effettuata in combinazione tramite apposite macchine pacciamatrici e seminatrici/trapiantatrici (<https://www.youtube.com/watch?v=rPelJE9Ti50>).

Vari possono essere i meccanismi, sia di semina che di trapiantatura. In genere sono due le operazioni: foratura e deposizione del seme/germoglio. Nel caso di seminatura, il metodo più ricorrente è utilizzare un tamburo rotante che esegue i fori a distanze prefissate e al contempo deposita i semi utilizzando l'acqua come vettore. Nel caso della trapiantatura, prima un tamburo rotante o una punzonatrice intermittente creano i fori di opportune dimensioni, e successivamente avviene la deposizione delle piantine. Questa operazione può essere manuale, automatica o semiautomatica.

Poliolefine Degradabili

Nel tentativo di superare queste limitazioni, sono state introdotte le poliolefine degradabili, progettate per fornire l'integrità meccanica richiesta alla coltura e successivamente degradarsi in prodotti finali apparentemente non tossici (Kyrikou, Briassoulis, Hiskakis, & Babou, 2011). Si distinguono:

- Poliolefine oxo-degradabili: subiscono cambiamenti nella struttura chimica dovuti a legami eterici a seguito dell'ossidazione in aria, provocando così la rottura del polimero in piccoli frammenti che vengono successivamente bioassimilati (Ammala, et al., 2011)
- Poliolefine fotodegradabili: il polimero esposto alla luce (UV) subisce una parziale fotodegradazione e la maggior parte di esso rimane come frammenti sulla superficie del suolo.

Il pacciame di plastica oxo-degradabile contiene PE e altri polimeri sintetici non biodegradabili con sali di metallici di transizione (ad esempio cobalto, nichel, manganese e ferro) che promuovono la degradazione parziale dei polimeri, che si manifesta con l'infragilimento e la frammentazione della plastica. A causa di questi metalli di transizione, i prodotti oxo-degradabili possono essere dannosi per la salute del suolo e per l'ambiente (Thomas, Clarke, McLauchlin, & Patrick, 2010)

Nel gennaio 2014, il Parlamento UE ha approvato una risoluzione per eliminare gradualmente o vietare la plastica oxo-degradabile, in favore di plastiche biodegradabili, di origine rinnovabile e compostabili. (MEPs clamp down on wasteful use of plastic carrier bags, 2015)

A causa del passaggio a normative più rigorose, i ricercatori di tutto il mondo stanno ora dedicando molto più impegno alla ricerca sui polimeri biodegradabili da risorse rinnovabili.

2.1.4 Film di pacciamatura in plastica biodegradabile

I film di pacciamatura in plastica biodegradabile (BioDegradable Plastic Mulch – BDPM) sono composti da polimeri che possono essere degradati dai microbi naturalmente presenti nel terreno, potenzialmente risolvendo il problema dell'accumulo della plastica nel suolo.

Sono stati introdotti negli anni '80 nel tentativo di mitigare gli impatti negativi del pacciame in polietilene, ma la bassa biodegradazione nei suoli ha finora ostacolato l'uso diffuso. (Kasirajan & Ngouajio, 2012)

Tuttavia, negli ultimi anni sono state sviluppate nuove promettenti formulazioni di polimeri biodegradabili. Analogamente al pacciame in PE, possono prevenire l'erosione del suolo, ridurre la necessità di diserbare, conservare l'umidità del suolo e aumentarne la temperatura.

Attualmente sono realizzati a partire da amidi uniti a zuccheri vegetali o fibre di poliestere. Questi amidi possono provenire da piante come il grano e il mais. Al termine della stagione, questa tipologia di pacciami inizia a rompersi a causa del calore e degli agenti atmosferici.

Il vantaggio pubblicizzato del pacciame di plastica biodegradabile è che può essere incorporato nel terreno dopo l'uso in quanto degradabile dai microorganismi del suolo, risparmiando così sui costi di manodopera e smaltimento.

Di contro, questo pacciame però è molto più delicato di altri tipi. Dovrebbe essere depositato in una giornata non troppo calda e con una tensione minore rispetto ad altri pacciami sintetici. Anche questi possono essere posizionati a macchina o a mano. (Schonbeck, s.d.) (Biodegradable Mulch Demonstrations, 2016)

Composizione e produzione dei BDPM

Il film di pacciamatura in plastica biodegradabile può essere costituito da materie prime a base biologica, derivate da combustibili fossili o una miscela delle due.

Polimeri a base biologica

I polimeri a base biologica possono essere suddivisi in tre categorie (Jamshidian, Tehrany, Imran, Jacquot, & Desobry, 2010):

1. estratti direttamente da materiali naturali, come piante, ad esempio amido e cellulosa
2. prodotti mediante sintesi chimica da monomeri di derivazione biologica, come la polimerizzazione sintetica dell'acido lattico in acido polilattico (PLA - Polylactic Acid)
3. prodotto da microrganismi, come i poliidrossialcanoati (PHA)

I polimeri come PLA o PHA hanno carenze nelle proprietà meccaniche rispetto al PE, ma la miscelazione con altri polimeri ne migliora le proprietà meccaniche. Ad esempio, il PLA di per sé è molto fragile, ma quando viene miscelato con PHA o polibutilene adipato tereftalato (PBAT), la fragilità si riduce. Le materie prime a base biologica più comuni sono amido, PLA e PHA.

È opportuno sottolineare che la percentuale di contenuto a base biologica non è necessariamente un indicatore della capacità di biodegradazione in campo poiché alcuni polimeri come il PLA (acido polilattico) richiedono una temperatura più elevata per la biodegradazione.

L'**amido** è un polisaccaride naturale composto da amilosio a catena lineare e amilopectina ramificata a catena corta. L'amido utilizzato nelle plastiche biodegradabili è spesso derivato dal mais, dalla barbabietola da zucchero, dalle malerbe o dalla canna da zucchero. L'amido ad alto contenuto di amilosio viene trasformato in amido termoplastico (TPS - Thermoplastic Starch) mediante estrusione con acqua e alcoli (di solito glicerolo, un coprodotto a base biologica della produzione di biodiesel) a temperature relativamente elevate. (Ghimire, et al., 2018)

Per migliorare le proprietà funzionali e di lavorazione della plastica vengono aggiunti sostanze plastificanti (plasticizers), tipicamente dei solventi che, additivati alle resine, promuovono la plasticità e la flessibilità e riducono la fragilità. I plastificanti primari aggiunti al TPS sono alcoli (principalmente glicerolo) e altri tensioattivi (Shanks & Kong, 2012). Il TPS costa meno di altre materie prime a base amido e ora è la materia prima a base biologica più comune utilizzata nei BDPM di plastica. (Miles, DeVetter, Ghimire, & Hayes, 2017)

Il **PLA** è un poliestere termoplastico derivato da risorse rinnovabili quali l'amido di mais. Per produrre PLA, l'amido viene fatto fermentare da lieviti o altri microrganismi per produrre acido lattico, che viene poi polimerizzato sinteticamente. Il PLA può essere prodotto in grandi quantità in modo relativamente economico rispetto ad altri biopolimeri a base biologica. (Hayes, et al., 2012) (Jamshidian, Tehrany, Imran, Jacquot, & Desobry, 2010)

I **PHA** sono una classe di poliesteri creati dalla fermentazione batterica naturale di zuccheri e lipidi vegetali. Oltre 90 generi di batteri possono produrre PHA (Kim, Kim, Chung, & Rhee, 2007). Il poli(idrossibutirrato) (PHB) e il poli(idrossivalerato) (PHV) sono i due PHA commerciali più importanti e diffusi. I copolimeri PHA o le miscele di PHA-amido tendono a degradarsi più rapidamente rispetto ai prodotti a base di PLA, rendendoli più adatti per i BDPM stagionali (Gilmore, Antoun, Lenz, & Fuller, 1993). I progressi nella biosintesi e nei metodi di lavorazione, insieme agli investimenti in strutture commerciali, hanno abbassato il prezzo e aumentato l'offerta mondiale di PHA.

Polimeri a base petrolchimica

I polimeri a base di combustibili fossili più comuni utilizzati per produrre BDPM sono poli butilene adipato-co-tereftalato (PBAT: poly butylene-adipate-co-terephthalate), poli butilene succinato (PBS: poly butylene succinate) e poli butilene succinato adipato (PBSA: poly butylene succinate adipate). Il PBAT è completamente biodegradabile in condizioni di compostaggio e presenta un'elevata elasticità, resistenza all'usura e alla frattura, nonché resistenza all'acqua e all'olio. Il PBS è un poliestere termoplastico con proprietà fisico-chimiche paragonabili al polipropilene. Tutti questi polimeri sintetici forniscono funzionalità, flessibilità e convenienza ai film plastici e possono essere degradati da batteri e funghi che si trovano comunemente nel suolo (Mohan & T., 2010). Di conseguenza, questi polimeri sintetici fungono spesso da componenti principali dei BDPM.

Tabella 2. Nomi commerciali di BDPM, costituenti primari e materie prime polimeriche (possono variare nel tempo). (Ghimire, et al., 2018)

Nome commerciale	Composizione polimerica
Bio360	Mater-Bi (Amido) + PBAT
BioAgri	Mater-Bi (Amido) + PBAT
Biocycle	Saccarosio + PHA
Bio-Flex	PLA + copoliestere
Biomax TPS	Amido + TPS
Biomer L	PHA
Biopar	Amido + copoliestere
Biosafe	PBAT + Amido ; PBS ; PBSA
Ecoflex	PBAT
Ecovio	PLA + PBAT
Envio	PBAT + PLA + Amido
GreenBio	PHA
Ingeo	Amido + PLA ; PBS + PLA
Mater Bi	Amido
Naturecycle	Amido
Paragon	Amido + TPS
ReNew	PHA

Additivi e plasticizzanti

La produzione di paccame di plastica comporta l'aggiunta di plasticizzanti, riempitivi (filler), lubrificanti che migliorano il flusso del polimero fuso attraverso i macchinari di lavorazione, agenti nucleanti per controllare le proprietà meccaniche, stabilizzanti che prevengono la degradazione del polimero ad opera dei raggi UV e coloranti (ad esempio, carbon black che può essere di origine naturale o meno).

Se ne parlerà meglio in seguito.

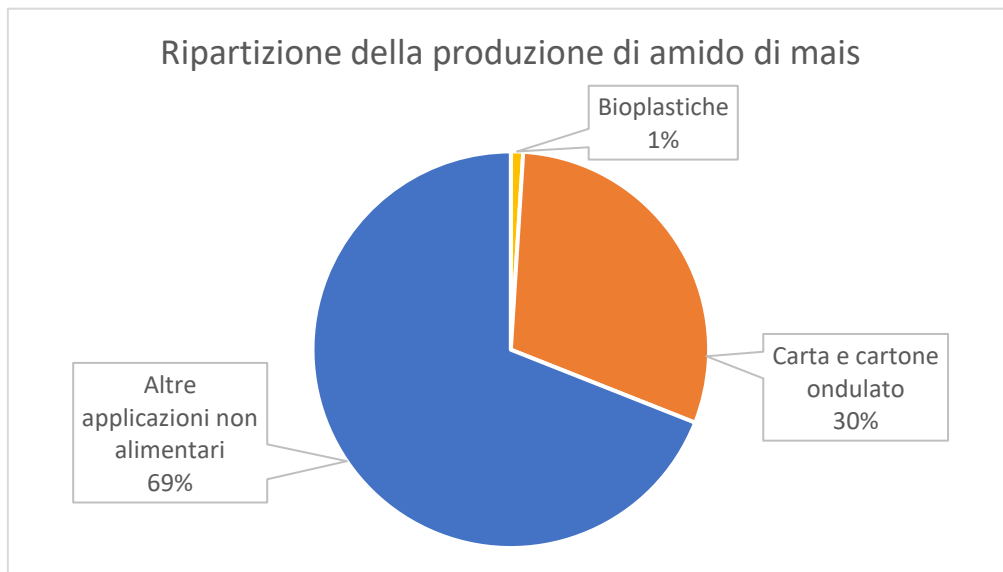
NOVAMONT Mater-Bi

MATER-BI è un polimero a base biologica completamente biodegradabile e compostabile prodotto dalla Novamont, un'azienda chimica italiana. Le proprietà di biodegradabilità e compostabilità consentono di recuperare un materiale da imballaggio in plastica attraverso il riciclo dei rifiuti solidi organici (compostaggio e digestione anaerobica), e sono specificate dalla norma europea EN 13432.

I componenti di base utilizzati per la produzione del MATER-BI sono amido di mais e oli vegetali non geneticamente modificati e sono coltivati in Europa con pratiche agricole convenzionali.

L'amido di mais

Figura 6. Ripartizione dell'impiego di amido di mais nelle applicazioni non alimentari. (Ganapini, 2012)



Ad oggi nell'UE solo l'1% della produzione totale di amido di mais viene utilizzato per le bioplastiche. (Ganapini, 2012). La terra utilizzata per coltivare la materia prima rinnovabile per la produzione di bioplastiche ammontava a circa 0,7 milioni di ettari nel 2020. Ciò rappresenta lo 0,015% della superficie agricola globale di 4,8 miliardi di ettari, di cui il 94% è stato utilizzato per pascoli, mangimi e cibo. (European Bioplastics, s.d.). In genere è necessario circa 1.2 m³ di acqua per la produzione di 1 kg di mais, di cui la maggior parte derivante dalle precipitazioni e dalle falde acquifere, un'impronta idrica tutto sommato contenuta se messa in relazione ad altri alimenti. (Mekonnen & Hoekstra, 2012)

I dati sopra riportati mostrano come l'impatto delle bioplastiche sulla produzione alimentare possa essere tendenzialmente trascurabile, e come tale non sia una delle cause dell'aumento dei prezzi dei prodotti agricoli.

Biodegradabilità

Il MATER-BI può essere utilizzato per realizzare prodotti che soddisfino i Requisiti Essenziali della Direttiva Europea sugli Imballaggi e sui Rifiuti da Imballaggio (94/62/CE) e le relative norme europee armonizzate: EN 13430 (riciclaggio), EN 13431 (recupero energetico), EN 13432 (recupero organico). (Novamont, s.d.)

Tutti i gradi di MATER-BI sono certificati secondo le principali norme europee ed internazionali presso Enti di Certificazione, garantendo la biodegradazione del MATER-BI in diversi ambienti di smaltimento: compostaggio industriale, compostaggio domestico e biodegradazione in suolo. (Novamont, s.d.)

La norma europea UNI EN 13432 è il più importante riferimento tecnico per le bioplastiche biodegradabili e definisce le quattro caratteristiche che deve avere un materiale compostabile:

- Biodegradabilità: capacità del materiale di essere convertito in CO₂ dai microrganismi del terreno
- Disintegrabilità: frammentazione e perdita di visibilità nel compost finale

- Assenza di effetti negativi
- Limitata concentrazione di metalli pesanti e tossine

Pacciamatura in Mater-Bi

I teli di pacciamatura biodegradabili in Mater-Bi sono progettati per fornire gli stessi benefici della pacciamatura tradizionale in Polietilene. È adatto all'utilizzo in diverse condizioni climatiche e ambientali, e su colture con diversi cicli produttivi, tra cui la fragola.

Figura 7. Un esempio di pacciamatura in Mater-Bi. (Novamont.com, s.d.)



Essendo completamente biodegradabile, al termine del ciclo colturale viene lavorato nel terreno, dove poi viene degradato ad opera dei microrganismi.

Non dovendo essere rimosso e dovendosi degradare al termine della coltivazione, viene realizzato in bassi spessori (12, 15 e 20 micron), permettendo la copertura di una maggiore superficie a parità di kg di materiale.

L'applicazione della pacciamatura in Mater-Bi si compone in 4 step:

1. **Preparazione del terreno:** il suolo va affinato quanto più possibile, rimuovendo pietre e residui di colture che possono causare la lacerazione del telo di pacciamatura.
2. **Stesura e trapianto:** il telo viene steso e forato con le stesse attrezzature utilizzare per i teli in PE, riducendo però la tensione di stesura. Stesura e trapianto possono essere effettuate contemporaneamente.
3. **Rimozione:** terminata la coltura, il telo viene incorporato nel terreno, dove si biodegrada in anidride carbonica, acqua e biomassa.

BASF Ecovio

Ecovio è un polimero compostabile certificato con contenuto a base biologica prodotto dalla BASF, azienda chimica tedesca. È costituito dal polimero compostabile BASF Ecoflex, acido polilattico (PLA) e altri additivi. A differenza delle bioplastiche a base di amido, Ecovio è più resistente alle sollecitazioni meccaniche e all'umidità. Ciò è possibile grazie alla presenza dell'Ecoflex, un polimero biodegradabile a base PBAT e quindi di origine fossile.

I prodotti Ecovio sono altrettanto performanti e resistenti nell'uso delle plastiche convenzionali. Un film plastico Ecovio può sopportare lo stesso carico della sua controparte in polietilene. Le proprietà del prodotto sono state progettate in modo tale che i prodotti si biodegradino completamente nel compost solo dopo l'uso (certificazione EN 13432). È certificato dal TUV Austria anche per la biodegradazione nel suolo.

Allo stesso modo del Mater-Bi, i film in Ecovio possono essere utilizzati direttamente con i macchinari delle classiche pacciamature in polietilene.

Vista l'elevata resistenza, si possono realizzare film di pacciamatura in Ecovio dello spessore minimo di 8 micron, permettendo un risparmio di materiale.

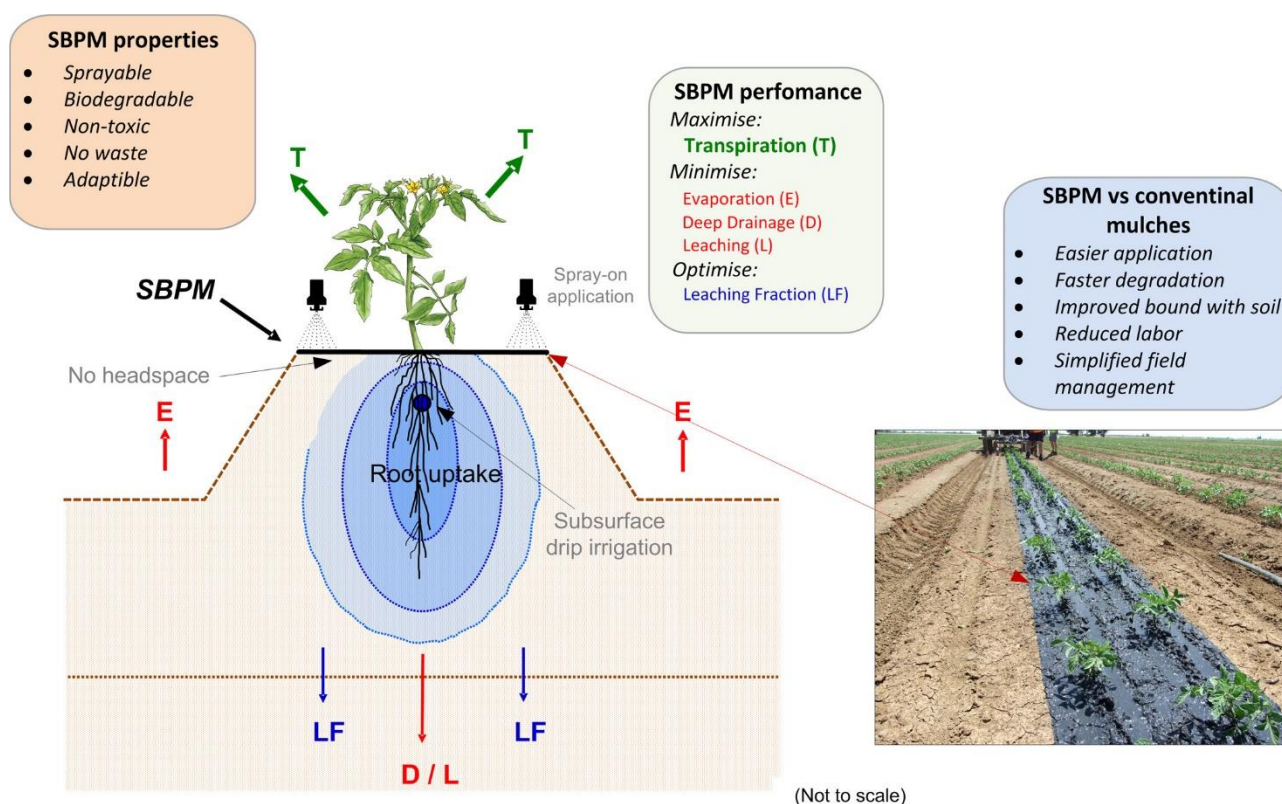
È adatto per la produzione di film pacciamatura neri, trasparenti o colorati.

2.1.5 Film di pacciamatura biodegradabile spruzzabile

Negli ultimi due decenni la tecnologia a membrana polimerica biodegradabile spruzzabile (SBPM - Sprayable Biodegradable Polymer Membrane) ha attirato l'attenzione di ricercatori e produttori agricoli. Si tratta di un approccio innovativo che consiste nella spruzzatura di rivestimenti polimerici continui anziché nella posa di film di pacciamatura prefabbricati.

Le membrane polimeriche spruzzabili possono essere formulate utilizzando materie prime rinnovabili e biodegradabili, quali polisaccaridi, polimeri naturali (esempio: alghe) e proteine. Sono stati condotti anche ricerche sulla produzione di spray biodegradabili a base di prodotti naturali quali canna da zucchero, microfibre di legno-cellulosa, lignina, gomma naturale e pelle animale. (Adhikari, et al., 2016)

Figura 8. Uno schema della tecnologia della membrana polimerica biodegradabile spruzzabile (SBPM) che ne indica le proprietà, le prestazioni e il confronto con i film di pacciamatura di plastica convenzionali. La foto in basso a destra mostra un'applicazione di SBPM in un esperimento su un campo di pomodori vicino a Echuca, Victoria, Australia. (Filipović, et al., 2020)



I pacciami di plastica biodegradabili spruzzabili aderiscono alla superficie del terreno senza lasciare spazi tra il terreno e la membrana polimerica. Possono degradarsi in modo più efficiente in quanto strettamente legati alle particelle del suolo, mentre il legame tra le molecole di polimero è più debole rispetto ai film di pacciamatura.

La metodologia di irrorazione a goccia è analoga a quella utilizzata nella pacciamatura convenzionale con film plastici.

L'SBPM può essere spruzzato sulla superficie del suolo utilizzando atomizzatori manuali per applicazioni più piccole (appezzamenti rurali), oppure grandi atomizzatori meccanizzati possono essere utilizzati per l'agricoltura industriale su larga scala.

I primi risultati con SBPM in condizioni sia controllate che sul campo indicano una maggiore efficienza nell'uso dell'acqua e una ridotta crescita delle erbe infestanti rispetto al terreno spoglio, dimostrando al contempo prestazioni agronomiche paragonabili ai film commerciali di pacciamatura in polietilene a bassa densità. (Adhikari, et al., Preformed and sprayable polymeric mulch film to improve agricultural water use efficiency, 2016) (Sartore, et al., 2018)

Oltre agli obiettivi primari di spruzzabilità, biodegradabilità e non tossicità, è opportuno che la membrana abbia le giuste proprietà meccaniche e fisiche.

Attualmente la ricerca si sta concentrando sulla scoperta e la messa a punto della giusta formulazione del polimero (o della miscela di polimeri), in modo che la membrana riesca a durare per tutta la stagione di crescita del raccolto.

L'aggiunta di nerofumo (carbon black) come pigmento nero e assorbente della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR - Photosynthetically Active Radiation) determina la soppressione della crescita delle erbe infestanti e l'aumento della temperatura del suolo, con effetti benefici simili ai tradizionali film di pacciamatura in plastica. (Adhikari, et al., 2016)

I modificatori di viscosità possono impedire un rapido assorbimento nel terreno che causerebbe variazioni di spessore e inconsistenza nella formazione della membrana, indebolendo le proprietà della barriera all'acqua. (Adhikari, et al., 2019)

La tecnologia SBPM può essere ulteriormente adattata tramite l'aggiunta di additivi che consentono il trasferimento bidirezionale dell'acqua, un lento rilascio di fertilizzanti e sostanze nutritive o il controllo del tempo di biodegradazione.

La biodegradazione da parte dei microrganismi è risultata variabile tra i vari tipi di polimeri, che vanno da pochi mesi in serra fino a un anno in campo. (Adhikari, et al., Preformed and sprayable polymeric mulch film to improve agricultural water use efficiency, 2016) (Sartore, et al., 2018)

Il SBPM sviluppato dal gruppo CSIRO (Australia) ha raggiunto una biodegradazione del 70% in campo durante sette mesi di test, che non mostrano fitotossicità o ecotossicità. Un'ulteriore analisi della diversità microbica non ha indicato cambiamenti drastici nella popolazione dopo l'applicazione della tecnologia SBPM, ovvero non sono stati trovati effetti tossici sulla popolazione microbica del suolo. (Adhikari, Bristow, Casey, Freischmidt, & Hornbuckle, 2015) (Adhikari, et al., Preformed and sprayable polymeric mulch film to improve agricultural water use efficiency, 2016).

Tuttavia, il processo di degradazione dell'SBPM sembra altamente dipendente dalle proprietà del polimero e dalle condizioni climatiche e del suolo, quindi può differire sostanzialmente da caso a caso.

2.1.6 Film di pacciamatura in cellulosa

La cellulosa è onnipresente in natura, è facilmente degradabile nell'ambiente e viene utilizzata come materiale di riferimento positivo durante gli studi di compostabilità (International Organization for Standardization, 2012). La cellulosa è prontamente disponibile in forma grezza come detriti vegetali oppure in prodotti di carta che sono più uniformi e affidabili come paccime rispetto ai detriti vegetali naturali.

Figura 9. Esempio di pacciamatura in cellulosa. (Gardners.com, s.d.)



I pacciami a base di carta sono stati utilizzati in agricoltura dal 1914 per ridurre le erbe infestanti nei campi di canna da zucchero (Smith, 1931). Inizialmente il paccime di carta era considerato un'alternativa alla plastica, ma è stato scoperto che si degrada rapidamente e inizia a rompersi entro poche settimane dall'esposizione al suolo, alla pioggia e al vento.

Oggi i film di pacciamatura a base di carta sono considerati commercialmente non redditizi.

Per approfondire: Haapala, T., Palonen, P., Korpela, A., & Ahokas, J. (2014). Feasibility of paper mulches in crop production —a review. *Agricultural and Food Science*, 23(1), 60–79. <https://doi.org/10.23986/afsci.8542>

2.1.7 Pacciami naturali

I pacciami naturali sono materiali di origine organica che se opportunamente utilizzati possono migliorare la resa delle colture rispetto alla coltivazione in suolo scoperto, e possono decomporsi naturalmente andando ad arricchire il terreno.

Figura 10. Pacciamatura dell'orto con paglia. (Ideegreen.it, s.d.)



La produzione totale di rifiuti organici da parte dell'uomo, del bestiame e delle colture è di circa 38 trilioni di tonnellate in tutto il mondo ogni anno (Ranjan, Patle, Prem, & Solanke, 2017), quindi la disponibilità di materiale organico per la pacciamatura è potenzialmente molto elevata.

Principali vantaggi

Oltre a limitare la crescita delle erbe infestanti, la pacciamatura organica migliora anche le proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo. Questi pacciami si decompongono lentamente e aumentano il contenuto organico nel terreno che aiuta a mantenerlo mobile e areato. I contenuti organici diventano cibo per i lombrichi e altri microrganismi utili nel terreno. I pacciami organici migliorano anche la concentrazione di carbonio organico nel terreno. Maggiore è il carbonio organico, più il suolo è fragile, più facile è la penetrazione e lo sviluppo delle radici, nonché l'estrazione di nutrienti da uno strato più profondo del suolo. Aumenta l'infiltrazione di acqua e la capacità di ritenzione idrica del suolo. La pacciamatura organica attrae la maggior parte della microflora benefica del suolo che a sua volta agisce sui rifiuti degradabili e favorisce il rilascio di nutrienti per le piante.

Principali svantaggi

Alcuni pacciami come paglia, torba, segatura e altri prodotti in legno possono influenzare temporaneamente in maniera negativa la crescita delle piante a causa del loro elevato rapporto carbonio/azoto, in quanto i

batteri e i funghi che decompongono questi materiali rimuovono l'azoto dal terreno circostante. (Lugo-Pérez & Lloyd, 2009).

I pacciami organici possono compattarsi, formando una barriera che blocca il flusso di acqua e aria tra il suolo e l'atmosfera. Inoltre, i pacciami organici distribuiti verticalmente sul terreno possono richiamare e assorbire l'acqua dalla superficie, seccando il terreno. (Bainbridge, 2012). Possono inoltre mantenere il terreno troppo umido su terreni poco drenati e limitare l'ossigeno nella zona delle radici.

Molti dei pacciami organici sono sede di proliferazione di molti insetti e patogeni. Se si applica vicino o a contatto con lo stelo, l'umidità intrappolata crea un ambiente favorevole alla crescita di malattie e parassiti.

I pacciami come fieno e paglia contengono semi che possono diventare malerbe.

Il pacciame di legno può contenere o nutrire le termiti, quindi è necessario prestare attenzione a non posizionare il pacciame troppo vicino a strutture che possono venire danneggiate da quegli insetti.

Questi pacciami organici sono facilmente biodegradabili e possono servire solo per un breve periodo.

Esempi

Alcuni dei materiali organici di pacciamatura comunemente usati sono descritti di seguito. Tra parentesi è indicato lo spessore di pacciamatura richiesto.

- **Foglie (7-10cm):** di alberi decidui, che lasciano cadere il fogliame in autunno/inverno. Tendono ad essere asciutte e portate via dal vento, quindi vengono spesso tagliate o sminuzzate prima dell'applicazione, oppure ricoperte da con rametti e corteccia. Man mano che si decompongono, aderiscono l'una all'altra, ma consentono anche all'acqua e all'umidità di penetrare nella superficie del suolo. Spessi strati di foglie intere, in particolare di aceri e querce, possono formare una stuoia fradicia in inverno e in primavera che può impedire la crescita dell'erba e di altre piante. Le foglie secche sono utilizzate come pacciame invernali per proteggere le piante dal gelo e dallo scongelamento nelle zone con inverni freddi; normalmente vengono rimosse durante la primavera.
- **Erba tagliata (5-7cm):** a volte viene raccolta e utilizzata altrove come pacciame. L'erba tagliata è densa e tende a compattarsi, quindi viene mescolata con foglie di alberi o composti grezzi per fornire aerazione e per facilitare la decomposizione senza putrefazione. La decomposizione dell'erba fresca può danneggiare le piante in quanto spesso produce un dannoso accumulo di calore. L'erba tagliata viene spesso asciugata completamente prima dell'applicazione in modo da contrastare la rapida decomposizione e l'eccessiva generazione di calore. I residui di erba verde fresca hanno un contenuto di nitrati relativamente alto e, se usati come pacciame, gran parte del nitrato viene restituito al terreno. Al contrario rimuovere l'erba dal prato o campo dopo averla tagliata provoca una carenza di azoto nel terreno.
- **Cippato (5-10cm):**
 - **Cippato arboricolo:** sono un sottoprodotto della potatura degli alberi da parte di arboricoltori, servizi pubblici e parchi. I trucioli ottenuti dalla tritatura dei rami degli alberi sono piuttosto grossolani e tendono ad essere usati come pacciame di vari centimetri di

spessore. I trucioli vengono utilizzati per preservare l'umidità del suolo, moderarne la temperatura e sopprimere la crescita delle erbe infestanti. Il decadimento dei trucioli prodotti da rami freschi consuma nitrati; questo fenomeno viene spesso compensato con una leggera applicazione di un fertilizzante ad alto contenuto di nitrati. I trucioli di legno vengono spesso utilizzati sotto alberi e arbusti. Quando viene utilizzato intorno a piante a gambo morbido, viene lasciata una zona non pacciamata attorno agli steli della pianta per prevenire la putrefazione dello stelo o altre possibili malattie.

- **Cippato di legno:** è un sottoprodotto del ritrattamento di legname usato (non trattato, solitamente pallet da imballaggio). I trucioli vengono utilizzati per preservare l'umidità del suolo, moderare la temperatura del suolo e sopprimere la crescita delle erbe infestanti. Il paccame di cippato viene spesso utilizzato sotto alberi, arbusti o grandi aree di piantagione e può durare molto più a lungo del cippato arboricolo.
- **Trucioli di corteccia (5-10cm):** vengono prodotti dallo strato esterno di corteccia degli alberi da legno, come sottoprodotto delle industrie della carta e del legno. Le dimensioni variano da strisce sottili a grandi blocchi grossolani. Le pezzature più fini hanno un'ampia superficie esposta che porta a un decadimento più rapido. Di solito vengono utilizzati strati profondi 3-5 cm. La corteccia è relativamente inerte e il suo decadimento non richiede nitrati dal suolo. È comunemente usato per la vegetazione e il paesaggio, dovrebbe essere evitato l'uso nei campi di ortaggi perché è acido. Tuttavia, questi pacciami sono ottimi per coprire i percorsi tra i letti (Ranjan, Patle, Prem, & Solanke, 2017).
- **Fieno/paglia (15-20cm):** leggero e normalmente venduto in balle compresse, è ideale per la pacciamatura perché si applica facilmente in campo, rimane in posizione e riflette la luce solare, aiutando la crescita per alcune verdure (Ranjan, Patle, Prem, & Solanke, 2017). In genere utilizzati negli orti e come copertura invernale. Sono biodegradabili e neutri nel pH. Hanno una buona ritenzione di umidità e proprietà di controllo delle malerbe, ma hanno anche maggiori probabilità di essere contaminati da semi di piante infestanti.
- **Aghi di pino (10 -15cm):** sono disponibili in balle. Dopo l'applicazione gli aghi di pino tendono a intrecciarsi, una caratteristica che aiuta il paccame a trattenere l'acqua piovana sui pendii più ripidi. Questa tendenza ad incastrarsi combinata con una resistenza al galleggiamento gli conferisce ulteriori vantaggi nel mantenimento della copertura e nella prevenzione dell'erosione del suolo. La tendenza ad incastrarsi aiuta anche a impedire che la struttura del paccame collassi e formi una barriera all'infiltrazione (Taylor & Foster, 2018). Si ritiene che gli aghi di pino crei le condizioni ideali per le piante che richiedono un terreno acido. La paglia di pino può aiutare ad acidificare i terreni, ma gli studi indicano che questo effetto è spesso troppo contenuto per essere apprezzabile (Grant, 2014).
- **Segatura:** è un tipo di paccame molto comune nelle aree in cui è facilmente disponibile. Si ricava durante le operazioni di finitura del legno, ha valori nutritivi inferiori e contiene solo la metà degli elementi nutritivi rispetto alla paglia; tuttavia, trattiene l'umidità per periodi più lunghi. (Ranjan,

Patle, Prem, & Solanke, 2017). A causa dell'elevato rapporto C:N la decomposizione è molto tardiva e causa una carenza di azoto nel terreno, quindi è necessaria un'applicazione regolare di fertilizzanti. Per sua natura (acida) non dovrebbe essere utilizzato in terreni acidi.

- **Carta e cartone:** possono essere usati come pacciamatura semi-organica. Questi sono utilizzati al meglio come strato di base su cui viene posizionato un pacciame più pesante come il compost, in modo da evitare che lo strato di carta più leggero venga soffiato via. Incorporando uno strato di carta in un pacciame, è possibile ridurre la quantità, migliorando al contempo le proprietà di soppressione delle erbe infestanti e di trattenimento dell'umidità (Jacobs, 2013). Si può utilizzare carta di giornale (o simili) sminuzzata e bagnata affinché non venga sollevata dal vento, oppure appositi film di pacciamatura in carta, che richiedono una manodopera simile ai film di pacciamatura in plastica (New biodegradable mulching paper, 2017). È da evitare l'uso di carta lucida nei campi di ortaggi perché l'inchiostro potrebbe penetrare nel terreno.

Oltre ai pacciami organici sopra menzionati, è possibile utilizzare altri materiali di origine organica quali scarti dell'industria agroalimentare, quali gusci, bucce, frutti e altri residui di lavorazione che non contengono semi che potrebbero germinare nel terreno.

Criteri di selezione del materiale

- Costo del materiale: deve essere disponibile localmente a un costo minimo o nullo.
- Tipo di materiale: non deve contenere semi di piante infestanti, deve essere in sinergia con la coltura selezionata e non deve provenire dalla coltura stessa, in quanto ciò aumenta il rischio di trasmettere virus o parassiti. Non deve contenere pesticidi e diserbanti.
- Periodo di applicazione: durante la stagione estiva i materiali leggeri e chiari sono utili in quanto riflettono il calore. Durante l'inizio della stagione primaverile l'uso di materiali di colore scuro è vantaggioso in quanto aiuta a riscaldare il terreno, consentendo di piantare prima le colture e accelerare la crescita del raccolto.

2.2 Valutazione degli impatti ambientali

In questa sezione si identificheranno i possibili impatti dei materiali biodegradabili sulle colture successive e sull'eco-sistema (suolo, acqua, fauna) in relazione all'effettivo livello e tempo di degradazione e alla valutazione dei residui nel terreno. Tali impatti sono da confrontare con quelli della gestione del fine vita dei materiali plastici convenzionali.

- Criteri ambientali:
 - Biodegradabilità/compostabilità e condizioni necessarie (temperatura, umidità)
 - Presenza di additivi
 - Effetto sull'ambiente (suolo, acqua, fauna)
 - Effetto sulle colture successive

2.2.1 Biodegradabilità

Il termine "biodegradabile" è spesso un termine abusato e frainteso, soprattutto se usato per descrivere la plastica. Gran parte di questa confusione è dovuta al fatto che è prima necessario definire l'ambiente in cui si verifica la biodegradabilità, poiché i livelli di ossigeno, temperatura e umidità influiranno tutti sull'entità della biodegradazione e sulla sua velocità (quanto tempo impiega la biodegradazione). Ad esempio, una plastica può essere biodegradabile in un ambiente (come il compostaggio) ma non in un altro (ad esempio il terreno dei campi).

Un polimero è tipicamente definito come "degradabile in ambiente" o "biologicamente degradabile" se ha la capacità di subire la disintegrazione, ovvero il deterioramento delle proprietà meccaniche, seguita dalla frammentazione e dal successivo attacco microbico (Krzan, Hemjinda, Miertus, Corti, & Chiellini, 2006).

I prodotti di degradazione del pacciame plastico biodegradabile non devono essere tossici o persistere nell'ambiente, ma devono essere completamente assimilati dagli organismi del suolo.

Se i pacciami di plastica biodegradabili devono essere incorporati nel terreno dopo l'uso, la loro completa distruzione deve essere assicurata e verificata nell'ampia varietà di terreni e ambienti in cui possono essere applicati. La degradazione incompleta della plastica biodegradabile potrebbe portare ad un accumulo di frammenti di plastica e particolato nel suolo.

Sebbene si sappia molto poco sugli effetti della plastica biodegradabile nel suolo, è stato dimostrato che le microplastiche possono essere tossiche per gli organismi acquatici (Lönnerstedt & Eklöv, 2016).

Il processo di biodegradazione

Per le plastiche biodegradabili, il deterioramento è generalmente caratterizzato da disgregazione fuori terra (durante la posa e l'utilizzo) e biodegradazione sotterranea.

Tra i fattori che influenzano il deterioramento in superficie vi sono la temperatura, la luce solare, l'umidità e le sollecitazioni meccaniche, nonché le interazioni tra questi fattori (Hakkarainen, 2002) (Ho, Pometto, & Hinz, 1999) (Krzan, Hemjinda, Miertus, Corti, & Chiellini, 2006).

Questi processi possono aumentare la biodegradazione diminuendo il peso molecolare del materiale (Lucas, et al., 2008) (Hablott, et al., 2014).

Nel suolo, funghi, batteri, alghe e altri macro e microrganismi contribuiscono alla biodegradazione. La biodegradazione avviene in condizioni aerobiche e anaerobiche. In entrambe le condizioni, i microrganismi secernono enzimi che scindono le catene molecolari dei polimeri e incorporano le molecole risultanti nelle loro cellule per il supporto del metabolismo microbico. Questo processo di biodegradazione fornisce alle cellule microbiche sia carbonio che energia chimica per la crescita e la riproduzione (Miles, DeVetter, Ghimire, & Hayes, 2017).

La biodegradazione completa comprende la scomposizione di un prodotto polimerico in anidride carbonica e acqua attraverso la respirazione ossidativa, con alcuni componenti del pacciame incorporati nella biomassa microbica (Lucas, et al., 2008).

Anche i lombrichi partecipano al processo di biodegradazione, frammentando i film plastici e areando il suolo.

Gli standard

Gli standard ISO 17088 e ASTM International D6400, specificano i criteri per la biodegradabilità delle materie plastiche in condizioni di compostaggio industriale sulla base di test di laboratorio standardizzati (D6400-19, 2019).

ASTM D6400 utilizza ASTM D5338, un test standardizzato che misura la biodegradazione aerobica dei materiali plastici in condizioni di compostaggio controllato. La norma ASTM D6400 specifica che il 90% degli atomi di carbonio deve essere mineralizzato in 180 giorni ad anidride carbonica e acqua, lasciando fino al 10% di carbonio organico residuo nel terriccio.

Esiste anche un metodo di prova standardizzato per misurare la biodegradazione della plastica nel suolo, ASTM D5988 o ISO 17556. Questi metodi sono test di laboratorio non standard, quindi non specificano i criteri di biodegradazione da raggiungere. Inoltre, attualmente non esiste uno standard per valutare la biodegradabilità della plastica sepolta nel suolo in diverse condizioni del campo, sebbene ISO e ASTM International stiano sviluppando ciascuno uno standard di biodegradazione del suolo.

I materiali di pacciamatura

La capacità di un BDPM di soddisfare lo standard di compostaggio è considerata il primo test critico di biodegradabilità; se un pacciame non è compostabile, probabilmente non sarà biodegradabile in condizioni di campo. Pertanto, gli agricoltori e gli altri che utilizzano o raccomandano BDM in plastica dovrebbero prima verificare se il prodotto è stato testato secondo lo standard di compostaggio ASTM o ISO e soddisfa i criteri di biodegradabilità. Se il prodotto non è stato testato, si dovrebbe presumere che il pacciame non sia biodegradabile.

Negli standard proposti, il 90% di un BDM in plastica deve scomporre in anidride carbonica e acqua e il restante 10% in sostanze rispettose dell'ambiente, compresa la biomassa microbica, entro uno o due anni.

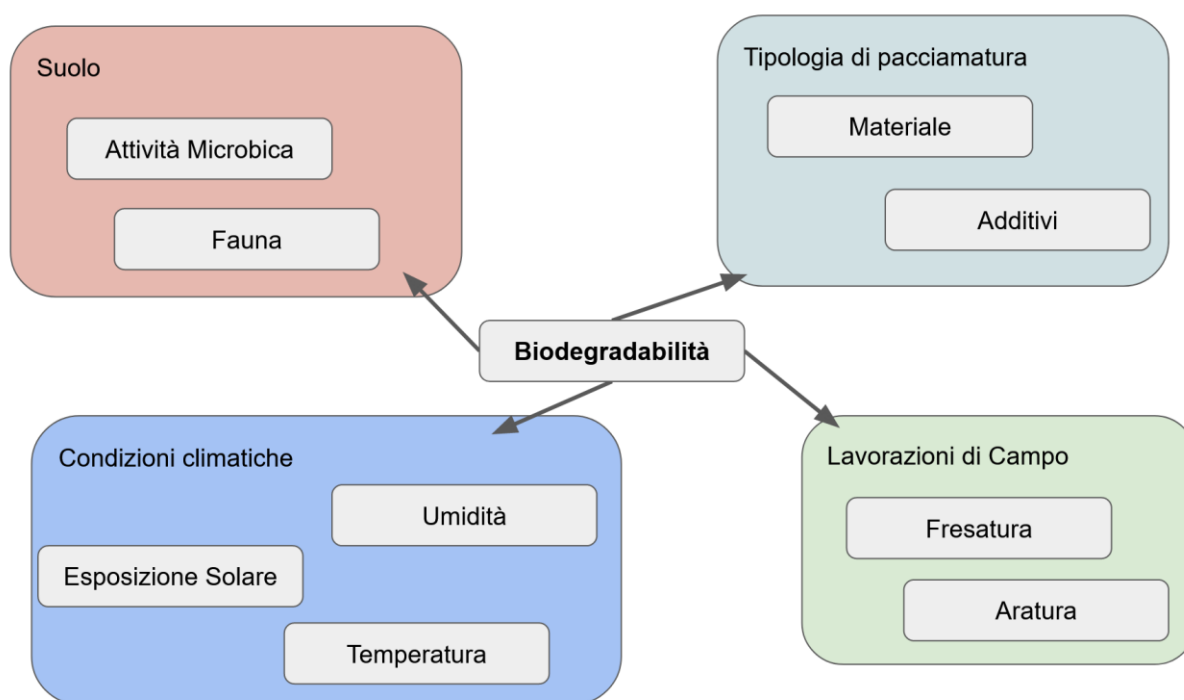
I test sul campo fino ad oggi indicano che i pacciami biodegradabili potrebbero non raggiungere il tasso di biodegradazione del 90% entro 2 anni in alcune località. Tuttavia, è importante notare che nella maggior

parte dei test sul campo la biodegradazione di per sé non viene misurata (l'evoluzione della CO₂ non viene monitorata), ma piuttosto, i campioni di suolo vengono valutati visivamente per il pacciame e il livello di biodegradazione viene dedotto in base alla presenza visiva o assenza di frammenti di pacciame nei campioni.

La velocità e l'entità della biodegradazione del pacciame plastico dipendono dalle materie prime e dalle condizioni del suolo. In condizioni di temperatura del suolo più fredde (soprattutto durante i mesi invernali), il tasso di biodegradazione si riduce man mano che l'attività microbica rallenta o cessa. Al contrario, la biodegradazione in condizioni di compostaggio tende ad essere più rapida poiché i microrganismi mesofili e termofili sono attivi in condizioni di alta temperatura (40–60 °C).

In un esperimento collaborativo sul campo agricolo a Knoxville, TN; Lubbock, TX; e Mount Vernon, WA; un pacciame di carta commerciale non era più visibile nei campioni in tutti e tre i siti dopo 1 anno, quindi si presumeva una biodegradazione completa. Al contrario, nello stesso studio dopo 2 anni, la degradazione media di due pacciami di plastica biodegradabili commerciali è stata del 52% a Knoxville, del 98% a Lubbock e del 6% a Mount Vernon (Li, et al., 2014a), a conferma che l'elevata temperatura, la luce solare e l'incorporazione dell'umidità nel suolo e i fattori del suolo come l'umidità e l'attività biologica possono favorire la biodegradazione.

Figura 11. Schema dei principali fattori di influenza della biodegradabilità.



Considerazioni ambientali

Gli standard utilizzati per valutare la degradabilità delle materie plastiche in condizioni di compostaggio aerobico (ISO 17088, ASTM D6400) e nel suolo (ISO 17556, ASTM D5988) si basano sulla disintegrazione macroscopica (stimata tramite analisi visiva) e sulla conversione del carbonio organico in CO₂, ma non

impongono la determinazione dei residui di micro e nanoparticelle, che potrebbero accumularsi nel suolo o nel compost.

I prodotti derivanti dalla degradazione della pacciamatura possono essere invisibili a occhio nudo, ma non visibili non significa che siano sicuri.

2.2.2 Salute del suolo e delle colture successive

Polietilene

Ecotossicità

Il polietilene ha meno probabilità di molte altre materie plastiche di contenere riempitivi, plastificanti e additivi, ma potrebbero essere ancora presenti. Sfortunatamente, senza una migliore divulgazione da parte dei produttori sul contenuto di specifici materiali plastici, possiamo solo parlare di tossicità e sicurezza in termini generali. (Powers, 2020)

Sono stati condotti innumerevoli studi a riguardo, sia di tossicità che di ecotossicità. Alcuni studi e alcuni prodotti hanno attivato una gamma di end point tossicologici, mentre altri no. La tossicità di questi prodotti dipende dalla loro composizione chimica individuale, che spesso rimane sconosciuta.

Tabella 3. Raccolta di alcuni studi sulla tossicità e l'ecotossicità del polietilene a bassa densità.

Studio	Conclusioni
Zimmermann, L., Dierkes, G., Ternes, T. A., Völker, C., & Wagner, M. (2019). Benchmarking the in vitro toxicity and chemical composition of plastic consumer products. <i>Environmental Science & Technology</i> , 53(19), 11467–11477. http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.9b02293	Possibile tossicità cronica, variabile da prodotto a prodotto.
Final report on the safety assessment of polyethylene. (2007). <i>International Journal of Toxicology</i> , 26 Suppl 1(1_suppl), 115–127. https://doi.org/10.1080/10915810601163962	Nessuna tossicità
Karami, A., Romano, N., Galloway, T., & Hamzah, H. (2016). Virgin microplastics cause toxicity and modulate the impacts of phenanthrene on biomarker responses in African catfish (<i>Clarias gariepinus</i>). <i>Environmental Research</i> , 151, 58–70. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.024	Possibile ecotossicità acuta
Jemec Kokalj, A., Dolar, A., Titova, J., Visnapuu, M., Škrlep, L., Drobne, D., ... Heinlaan, M. (2021). Long term exposure to virgin and recycled LDPE microplastics induced minor effects in the freshwater and terrestrial crustaceans <i>Daphnia magna</i> and <i>Porcellio scaber</i> . <i>Polymers</i> , 13(5), 771. https://doi.org/10.3390/polym13050771	Possibile lieve ecotossicità cronica

Accumulo nel suolo

In alcune aree (ad es. Cina e Spagna meridionale), gli agricoltori incorporano annualmente paccime di PE nel terreno e l'accumulo è così significativo che la ritenzione idrica del suolo e la resa delle colture sono ridotte.

Figura 12. Residui di polietilene nero in un campo agricolo a Bertinoro (Forlì – Cesena, 2021)



In particolare, le conseguenze dell'accumulo di polietilene nel terreno sono:

1. **Effetto sull'umidità e sul trasporto dei nutrienti nel suolo:** la pacciamatura residua blocca l'infiltrazione dell'acqua nel suolo, riducendo la penetrazione dell'umidità ed il movimento dei nutrienti (Liu, He, & Yan, 2014).
2. **Effetto sulla germinazione delle colture e sulla crescita delle radici:** studi nello Xinjiang hanno mostrato che livelli residui di pacciamatura di film plastico di 200 kg/hm² nel terriccio (0-20 cm) hanno influenzato il tasso di germinazione dei semi di cotone e ne hanno ridotto la produzione del 15% (Liu, He, & Yan, 2014).
3. **Salinizzazione secondaria del suolo:** gli studi hanno dimostrato che la pacciamatura per 5-20 anni consecutivi ha portato a un aumento del 122-146% del contenuto di sale del terriccio (Liu, He, & Yan, 2014).
4. **Formazione di prodotti tossici:** la degradazione del film di pacciamatura residua in polietilene può portare alla formazione di prodotti chimici dannosi per l'ambiente come esteri di ftalati (Chen, et al., 2013), di-(2-etilesil)ftalato, aldeidi e chetoni.
5. **Accumulo di pesticidi:** i pesticidi possono migrare dalla superficie all'interno del film plastico senza l'ausilio di un solvente organico e le frazioni trattenute dipendono dallo spessore del film. I pesticidi accumulati nel film plastico possono migrare da queste plastiche ad altre matrici come il suolo e l'atmosfera, essendo questo processo modulato dalla loro struttura. Quando nel terreno agricolo sono presenti residui di film plastico, essi possono fungere da collettori di pesticidi. (Ramos, Berenstein, Hughes, Zalts, & Montserrat, 2015)

Uno studio avvenuto in Argentina ha evidenziato che la presenza di film di pacciamatura in PE nel terreno orticolo è significativa, rappresentando circa il 10% della superficie campionata. (Ramos, Berenstein, Hughes, Zalts, & Montserrat, 2015)

Un altro studio ha affermato che la mediamente quantità di rifiuti di plastica in un campo agricolo della Cina potrebbe raggiungere i 317.4 kg/ha (Zhao, Ma, Zhu, Tang, & McGrath, 2015).

Un altro studio condotto in Cina ha evidenziato che quantità di film di pacciamatura residui di 320 kg ha⁻¹ potrebbero interferire nella resa delle colture di pomodoro, causando diminuzioni del 5,9% nella resa del terreno (Zou, et al., 2017).

Film biodegradabili

Dopo che il film di pacciamatura in plastica biodegradabile viene incorporato nel terreno alla fine della stagione di raccolta, dovrebbe degradarsi rapidamente senza influire negativamente sulla salute del suolo. Le indagini fino ad oggi hanno rivelato che la degradazione è funzione dell'ambiente e gli effetti a breve termine sulla salute del suolo sono trascurabili (Li, et al., 2014a) (Li, et al., 2014b) (Brodhagen, Peyron, Miles, & Inglis, 2015).

Tuttavia, l'uso prolungato di BDPM sulla salute del suolo non è stato completamente compreso; sono necessarie delle indagini a lungo termine che considerino l'accumulo di sostanze nel suolo (Brodhagen, et al., 2017).

L'accumulo di una determinata sostanza nel suolo può essere ottenuto dalla seguente formula, conoscendone la concentrazione iniziale nel materiale.

$$\begin{aligned} & \text{Sostanza accumulata nel suolo} \\ &= \text{concentrazione sostanza nel materiale} \\ & * \text{quantità di materiale incorporato nel suolo} \end{aligned}$$

Ecotossicità

La sicurezza ecologica dei BDPM può essere valutata mediante test di ecotossicità. Nel complesso, diversi tipi di materiali biodegradabili, tra cui PBAT, PLA e materiali a base di amido, non hanno mostrato tossicità in diversi test.

Ad esempio, il Mater-Bi sembra soddisfare un adeguato standard di sicurezza ambientale, in quanto nonostante studi approfonditi non sono stati rilevati effetti nocivi, sia nel suolo che nell'acqua. (Sforzini, Oliveri, Chinaglia, & Viarengo, 2016)

Tabella 4. Test di ecotossicità per diversi tipi di pacciamatura in plastica biodegradabile. Adattato da (Liu, Zhang, Dong, & Yan, 2021)

Material Type	Tested subject	Test result	Reference
a-PHB	Plant	no toxicity	Rychter et al., 2006
n-PHB	Plant	no toxicity	
PLLA	Plant	no toxicity	
Ecoflex, BTA	Plant	no toxicity	Rychter et al., 2010
PBAT	Plant	no toxicity	Palsikowsk et al., 2017
PBAT/PLA	Plant	no toxicity	
PLA	Plant	no toxicity	
PBS	Earthworms	no toxicity	Zhang et al., 2010
PLA	Plant	no toxicity	Vázquez-Morillas et al., 2016
PLA	Plant	no toxicity	Rudeekit et al., 2012
PLA/Starch	Plant	no toxicity	
PLA+Clay1	Plant	no toxicity	Balaguer et al., 2015
PLA+Nano-CaCO ₃	Plant	no toxicity	
PLA+Nano-SiO ₂	Plant	no toxicity	
Starch-based plastic	Microbial nitrification	no toxicity	Ardisson et al., 2014
Starch-based plastic	Bacteria, protozoa, algae, plants, crustaceans, and earthworms	no toxicity	Sforzini et al., 2016
Starch-based plastic	Kinetic luminescent bacteria	no toxicity	Kapanen et al., 2008
Mater-Bi	Mussel	no toxicity	Magni et al., 2020 10.1016/j.scitotenv.2020.137602

Nota: PLA: poly(lactic acid); PLLA: poly(L-lactic acid); PBS: poly(butylene succinate); PBAT: poly(butylene adipate co-terephthalate); n-PHB: poly-([R]-3-hydroxybutyrate); a-PHB: poly-([R,S]-3-hydroxybutyrate); Ecoflex, BTA: poly-([1,4-butylene terephthalate)-co-(1,4-butylene adipate)]

Tuttavia, i test effettuati riguardano l'ecotossicità a breve termine (ovvero risposte acute) e tutt'ora mancano prove sperimentali sull'ecotossicità a lungo termine (Sintim & Flury, 2017) .

Infatti, la potenziale ecotossicità della plastica biodegradabile può derivare non solo dai polimeri e dai composti rilasciati dai polimeri durante il processo di biodegradazione, ma anche da additivi come plastificanti, stabilizzanti termici e UV, e antiossidanti. La quantità di additivi è solitamente troppo piccola per

causare differenze nei test delle risposte acute, ma questi possono accumularsi a seguito di applicazioni ripetute nel tempo.

Si ribadisce quindi la necessità di test di tossicità a lungo termine per determinare completamente la sicurezza ecologica dei BDPM.

Accumulo nel suolo

Un recente studio ha ipotizzato il caso in cui un agricoltore incorpori nel terreno tutto il pacciame biodegradabile alla fine del ciclo colturale. I test standardizzati applicati alle materie plastiche (ASTM D5988 e ISO 17556) considerano un tasso di biodegradazione del 90% entro 2 anni; considerato ciò, il 45% di questa plastica rimarrà in campo durante il primo anno. Dopo il secondo anno, un 10% della plastica del primo anno rimarrà probabilmente nel suolo e la plastica dalla seconda applicazione con il suo 10% rimanente al terzo anno. Se si presume che questo 10% non si degradi mai, si accumulerà ogni anno. Gli autori ipotizzano che 350 kg / ha di plastica non degradabile riducano la resa del terreno del 6,45% al quinto anno di utilizzo di film biodegradabili incorporati nel terreno. Sfortunatamente, non esiste un metodo standard per misurare il tasso di degradazione dopo l'incorporazione nel terreno e le percentuali potrebbero essere molto variabili. (Miles, DeVetter, Ghimire, & Hayes, 2017).

2.2.3 Contaminanti residui

Visto la scarsità di studi che permettano di definire l'ecotossicità sul lungo periodo per tutte le tipologie di materiali, sia biodegradabili che non, può risultare utile realizzare una panoramica dei contaminanti rilasciati nel suolo ad ogni applicazione della pacciamatura.

Microplastiche

Il problema dei pacciami di plastica biodegradabile in agricoltura è analogo all'uso delle microsfere di plastica nei cosmetici e nei prodotti sanitari, dove le conseguenze ambientali non sono state studiate a fondo fino a quando le microplastiche non sono arrivate nell'oceano e hanno causato danni all'ambiente (Rochman, et al., 2015).

Le industrie agricole sono grandi utilizzatori di pesticidi e altre sostanze chimiche idrofobe che possono essere assorbite dalla plastica residua dai pacciami. I frammenti e le particelle di plastica possono fungere da vettore di trasporto per sostanze chimiche tossiche attraverso il suolo o l'atmosfera (Teuten, et al., 2009).

I teli di pacciamatura, a causa della degradazione, sono impossibili da rimuovere totalmente alla fine dell'applicazione e una parte rimane sopra e dentro al terreno. I frammenti di pacciami in polietilene vengono inoltre dispersi nell'ambiente dall'erosione del vento e dell'acqua, causando così ulteriore inquinamento. I fenomeni degradativi portano quindi alla generazione di microplastiche che entrano a far parte irrimediabilmente dell'ambiente.

Resta da capire se le soluzioni di pacciamatura biodegradabili generino microplastiche ed eventualmente in che entità. Si può presumere che teli realizzati in parte da polimeri non biodegradabili, sia di origine fossile che di origine biologica, generino microplastiche. Attualmente non sono presenti studi a riguardo.

Additivi

Gli additivi sono sempre presenti nei polimeri e vengono utilizzati per modificare le proprietà del materiale. Alcuni additivi sono fondamentali per garantire l'integrità della struttura dei polimeri, mentre altri sono mirati ad ottenere caratteristiche speciali del materiale finale.

Gli additivi rappresentano un problema per le applicazioni a contatto alimentare: questi infatti tendono, a causa della differenza di concentrazione, a migrare dal polimero verso il prodotto. La migrazione può avvenire anche nel suolo se il polimero viene incorporato nel terreno.

Si ritiene necessario svolgere degli studi riguardo la tipologia di additivi e le concentrazioni impiegate nelle varie soluzioni di pacciamatura.

È inoltre opportuno svolgere dei test di migrazione per quantificare l'entità della diffusione di additivi nella coltura e nel terreno, sia per quanto riguarda il polietilene che per le pacciamature alternative.

Stabilizzanti

Gli stabilizzanti polimerici sono additivi chimici utilizzati per inibire o ritardare la degradazione dei polimeri e possono essere presenti in quantità fino al 2% in peso. I più comuni sono fenoli, ammine aromatiche, composti amminici e fosfiti.

Le ammine aromatiche in particolare sono riconosciute da tempo quali agenti mutageni/cancerogeni (Kriek, 1974).

Plasticizzanti

Sono composti a basso peso molecolare, in genere oli, che vengono messi nel polimero per renderlo più elastico e meno rigido. Anche questi vengono scelti in funzione del tipo di polimero da trattare. Vengono utilizzati a livelli compresi fra il 10% e il 40%.

Storicamente il più usato è il di-2-etilstilftalato (DOP, DEHP), un ortoftalato a basso peso molecolare.

Sono state espresse preoccupazioni sostanziali sulla sicurezza di alcuni plastificanti polimerici, soprattutto perché alcuni ortoftalati a basso peso molecolare sono stati classificati come interferenti endocrini (Halden, 2010).

Per questo motivo, gli ftalati a basso peso molecolare stanno venendo progressivamente sostituiti.

Coloranti

I coloranti plastici sono composti chimici utilizzati per colorare la plastica. Questi composti si presentano sotto forma di coloranti e pigmenti. Il tipo di colorante viene scelto in base al tipo di resina polimerica, che deve essere colorata. I pigmenti sono più adatti per l'uso con le poliolefine.

Il pigmento più utilizzato nei film di pacciamatura è il carbon black.

Filler

I filler sono materiali di riempimento aggiunti alle resine polimeriche per migliorare proprietà specifiche, rendere il prodotto più economico o entrambe le cose. La maggior parte dei materiali di riempimento utilizzati nelle materie plastiche sono materiali di riempimento a base minerale o di vetro.

Nei film di pacciamatura in polietilene il filler più utilizzato è il carbon black, in quanto esso assorbe la radiazione luminosa e la trasforma in calore, riscaldando il terreno e prevenendo il degrado fotochimico del pacciame.

Il carbon black è stato riconosciuto come potenziale sostanza cancerogena dall'IARC (IARC, 2021)

Distaccanti

Vengono distribuiti sullo stampo per evitare che il manufatto rimanga incollato, ed è il motivo per cui gli articoli in plastica spesso risultano unti superficialmente.

Lubrificanti

Servono per far fluire i polimeri durante il processo di estrusione. Ce ne sono di specifici per ogni tipo di applicazione. Quantitativamente vengono usati da migliaia di ppm a qualche grado %.

2.3 Studio di fattibilità tecnico-economica

Allo scopo di determinare la migliore opzione di pacciamatura a livello economico, si è compilato uno studio di fattibilità tecnico-economico sul confronto tra materiali biodegradabili alternativi e materiali tradizionali.

L'analisi tecnica iniziale è stata condotta su tutte le alternative biodegradabili al polietilene, quali biopolimeri, polimeri fossili biodegradabili e cellulosa.

La successiva modellizzazione dei costi è stata condotta per i film polimerici di pacciamatura, sia biodegradabili che non biodegradabili, in quanto attualmente utilizzati per la produzione commerciale.

Data la loro completa rinnovabilità ed il loro diffuso utilizzo, si è posta particolare attenzione sui materiali a base Mater-Bi.

2.2.1 Analisi Tecnica

Diversi studi hanno dimostrato che i teli di pacciamatura commerciali in plastica biodegradabile (base amido, PLA e PBAT) e carta possono avere una resa analoga al pacciame in PE nella coltivazione di ortaggi annuali (Miles, et al., 2012) (Li, et al., 2014a) (Cowan, Miles, Andrews, & Inglis, 2014) (Wortman, Kadoma, & Crandall, 2016) (Ghimire, Wszelaki, Moore, Inglis, & Miles, 2018) (Liu, Zhang, Dong, & Yan, 2021) (Zhang, Flury, Miles, Liu, & DeVetter, 2020).

Misura e interazione dei principali indicatori di prestazione

Anche se la validità tecnica dei film di pacciamatura è stata ampiamente discussa negli studi analizzati, nei prossimi studi che verranno condotti è comunque opportuno verificare i principali parametri tecnici della pacciamatura, in quanto essi influenzano la successiva resa della coltura.

Di seguito si sono indicati i parametri di performance della pacciamatura, l'importanza per la resa finale ed il metodo per misurarli.

Umidità

Il mantenimento dell'umidità nel terreno permette di risparmiare acqua di irrigazione, nonché di limitare la lisciviazione dei fertilizzanti nel suolo.

Il mantenimento dell'umidità dipende dalle proprietà di traspirazione del pacciame.

Misura della traspirazione del pacciame

ISO 15105-1:2007 : specifica due metodi per determinare la velocità di trasmissione del gas di film o fogli di plastica monostrato e strutture multistrato sotto una pressione differenziale.

ISO 15106-1:2003 : specifica un metodo strumentale per determinare la velocità di trasmissione del vapore acqueo di film plastici, fogli di plastica e strutture multistrato inclusa la plastica, utilizzando un sensore di rilevamento dell'umidità. Questo metodo fornisce misurazioni rapide su un'ampia gamma di velocità di trasmissione del vapore acqueo.

Misura dell'umidità nel suolo

Sonde FDR (Frequency Domain Reflectometry): la costante dielettrica di un determinato elemento di volume attorno al sensore dipende dalla quantità di acqua presente. Misurando la differenza tra un'onda di uscita generata da un oscillatore e la frequenza dell'onda di ritorno, si può misurare il contenuto volumetrico di acqua nel suolo.

Sonde TDR (Time Domain Reflectometry): l'impedenza lungo le aste delle sonde TDR varia con la permittività dielettrica del terreno circostante, e quindi dalla quantità di acqua presente. Il contenuto volumetrico di acqua del suolo può essere dedotto misurando la variazione di ampiezza di onde riflesse tra le aste della sonda.

Temperatura

Il mantenimento della temperatura del terreno permette di limitare gli sbalzi termici per le radici della pianta. Inoltre, ne risulta una temperatura media del suolo maggiore rispetto all'ambiente, consentendo la germinazione anticipata delle piante, espandendo il periodo di raccolta della coltura.

La temperatura del terreno dipende dal colore del pacciame. Pacciami scuri generano temperature maggiori a quella media ambientale, riscaldando quindi il terreno e consentendo di limitare i danni del gelo nei climi e nei periodi freddi. Pacciami chiari generano temperature inferiori rispetto a quella media ambientale, raffreddando quindi il terreno e consentendo di limitare i danni del calore nei climi e nei periodi eccessivamente caldi.

Misura della temperatura del suolo

Sonde TDR: stimano la temperatura del suolo sempre attraverso la misurazione dell'impedenza.

Sonde a Termistori e Termocoppie: i primi sono resistori il cui valore di resistenza varia in maniera significativa con la temperatura, mentre i secondi si basano sull'effetto Seebeck. Permettono di misurare la temperatura puntuale o la temperatura media di una zona del suolo.

Riduzione delle malerbe

Il contenimento delle malerbe consente di ridurre la competizione per il suolo e i nutrienti, limitare i danni alle radici della coltura dovuti alla rimozione meccanica delle malerbe, evitare l'uso di eventuali erbicidi.

La riduzione delle malerbe dipende dalla capacità del pacciame di assorbire la luce solare (tra cui le radiazioni fotosinteticamente attive), impedendo la germinazione e la crescita delle piante infestanti. Mentre i pacciami neri/scuri sono efficaci nella soppressione delle malerbe, ciò non vale per i pacciami bianchi/chiari.

I pacciami in plastica trasparente sono utilizzati come aiuto per la solarizzazione: la luce passa direttamente attraverso il film di pacciamatura e il terreno viene notevolmente riscaldato uccidendo spore di erbacce e batteri che vivono nel letto, a patto che si raggiungano temperature sufficientemente alte per un periodo di tempo prolungato.

Misura delle malerbe

I dati sulle infestanti possono essere raccolti rimuovendo le malerbe da un blocco di 1 m del letto tre volte durante ogni stagione: 3 settimane dopo il trapianto, a metà stagione e 2 settimane prima dell'ultimo raccolto. Per ogni valutazione è opportuno campionare una nuova area. Le erbacce vanno tagliate dalla superficie del suolo e contate per specie. Si registra la biomassa totale fresca fuori terra per tutte le erbe infestanti combinate per appezzamento. I campioni possono essere quindi essiccati a data temperatura (generalmente 60°C) per 48 ore per determinare la massa secca totale. (Moore & Wszelaki, 2019) (Ghimire, Wszelaki, Moore, Inglis, & Miles, 2018)

Degradazione del pacciame nel tempo

L'andamento della degradazione influisce sul mantenimento delle proprietà della pacciamatura precedentemente elencate.

La degradazione nel tempo dipende dalla tipologia di materiale (polietilene, bioplastica, cellulosa, ...)

Misura della degradazione

Può essere misurato come esposizione percentuale del suolo (Percent Soil Exposure - PSE), che è un indicatore della funzionalità e delle prestazioni del pacciame. La PSE dovrebbe essere valutata visivamente dalla medesima persona in un'area di 1 m² al centro della pacciamatura a intervalli di dati prefissati (in genere due volte al mese). Un PSE dello 0% rappresenta un pacciame completamente intatto, mentre una valutazione del 100% rappresenta un terreno completamente esposto. Le valutazioni si effettuano con incrementi dell'1% fino al 20% di esposizione, e poi con incrementi del 5%. (Zhang, Flury, Miles, Liu, & DeVetter, 2020) (Moore & Wszelaki, 2019) (Ghimire, Wszelaki, Moore, Inglis, & Miles, 2018)

Isolamento dei frutti della pianta dal terreno e dall'umidità

L'isolamento del fusto, delle foglie e dei frutti della pianta dal terreno e dall'umidità consente di ridurre la proliferazione di organismi patogeni che andrebbero a inficiare la qualità della coltura.

L'isolamento della pianta dal terreno e dall'umidità dipende dalla capacità del pacciame di limitare i ristagni d'acqua e i fenomeni di condensazione.

Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche della pacciamatura influiscono sulla velocità di posa e la resistenza ad abrasioni.

Le proprietà meccaniche fondamentali sono:

- Allungamento a rottura e modulo elastico: materiali più elastici si adattano meglio alla superficie del terreno
- Carico di snervamento e carico di rottura a trazione: materiali più resistenti richiedono meno cura nella posa

Prova di trazione per materiali flessibili

ASTM D882 → Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting

ASTM D828 → Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus

ISO 527-3 → Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets

ISO 1924-2 → Paper and board — Determination of tensile properties — Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min)

Prove di strappo

ISO 6383-1 → Plastics — Film and sheeting — Determination of tear resistance — Part 1: Trouser tear method

Prove di puntura

ASTM D2582 – 21 → Standard Test Method for Puncture-Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting

ISO 12236 → Geosynthetics — Static puncture test (CBR test)

Prove di impatto

ISO 7765-2 → Plastics film and sheeting — Determination of impact resistance by the free-falling dart method — Part 2: Instrumented puncture test

ASTM D1709 → Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method

Raccolta di studi sul campo

Allo scopo di verificare l'idoneità dei film di pacciamatura biodegradabili, sono stati raccolti, scomposti e analizzati i seguenti studi. Per ognuno di essi, si è identificata data e luogo di esecuzione, tipologia di coltivazione, pacciami utilizzati e relative caratteristiche e performance agronomiche. Inoltre per alcuni studi sono state riportate alcune considerazioni particolarmente importanti.

* * *

Miles, C., Wallace, R., Wszelaki, A., Martin, J., Cowan, J., Walters, T., & Inglis, D. (2012). Deterioration of potentially biodegradable alternatives to black plastic mulch in three tomato production regions.

HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science, 47(9), 1270–1277.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.9.1270>

Data: 2010					
Luogo:					
Tennessee, clima estivo caldo e umido (temperature media 22°C, umidità relativa media 73%)					
Texas, clima estivo caldo e secco (temperature media 22,5°C, umidità relativa media 59%)					
Washington State, clima estivo fresco e umido (temperature media 15°C, umidità relativa media 83%)					
Tipo di coltivazione: pomodoro, tunnel alti e campo aperto					
Pacciamatura	Composizione	Deterioramento	Soppressione malerbe	Produzione	Smaltimento
Polietilene (riferimento)	Polietilene	Nessuno	Efficace	Generalmente migliore	Rimozione e incenerimento o discarica

				(+30%) rispetto al suolo nudo	
BioTelo Agri	Amido di Mais + Biopolimeri; Biodegradabile /compostabile nero 0.02 mm	< 10% durante stagione di crescita 20-30% a fine stagione	Analogo al controllo	Analogo al controllo	Completa biodegradabilità da verificare
Weed Guard Plus	Cellulosa; Biodegradabile /compostabile Nero 0.23 mm	< 10% durante stagione di crescita 30% a fine stagione	Analogo al controllo	Analogo al controllo	Completa biodegradabilità
SB-PLA-10	Acido polilattico; Compostabile Bianco traslucido 0.64 mm	Nessuno	Analogo al controllo	Migliore in climi molto caldi	Rimozione e compostaggio (100% biodegradazione)

* * *

Zhang, H., Flury, M., Miles, C., Liu, H., & DeVetter, L. (2020). Soil-biodegradable plastic mulches undergo minimal in-soil degradation in a perennial raspberry system after 18 months. *Horticulturae*, 6(3), 47.

<https://doi.org/10.3390/horticulturae6030047>

Data: 2017 - 2019					
Luogo: Lynden, WA, USA, terreno sabbioso, estati calde secche e inverni piovosi miti/freddi					
Tipo di coltivazione: fragola, perenne (5-6 anni), campo aperto, singola applicazione di pacciamatura					
Film di pacciamatura	Composizione	Deterioramento	Soppressione malerbe	Produzione	Smaltimento
BASF 0.5	PLA + PBAT 12.7 µm	5 mesi: < 10% 8 mesi: < 70% 12 mesi: ~ 90%	Efficace	Analogo al controllo	Bassa biodegradazione dopo 18 mesi, in certi casi rimozione necessaria.
BASF 0.6	PLA + PBAT 15.2 µm				
Novamont 0.5	Base Amido + Copoliestere PBAT 12.7 µm				
Novamont 0.6	Base Amido + Copoliestere PBAT 15.2 µm				
PE (Controllo)	Polietilene 25.4 µm	Inferiore 5% dopo 12 mesi	Efficace		Rimozione dal campo

- Tutti i BDPM nel presente studio contenevano fino al 20% di materiali a base biologica (cioè, PLA o materiali a base di amido)
- I BDPM sono più suscettibili ai danni del pacciame PE, perché non si allungano altrettanto ed è più facile che si strappino. Ciò accade perché le materie prime a base biologica utilizzate possono ridurre

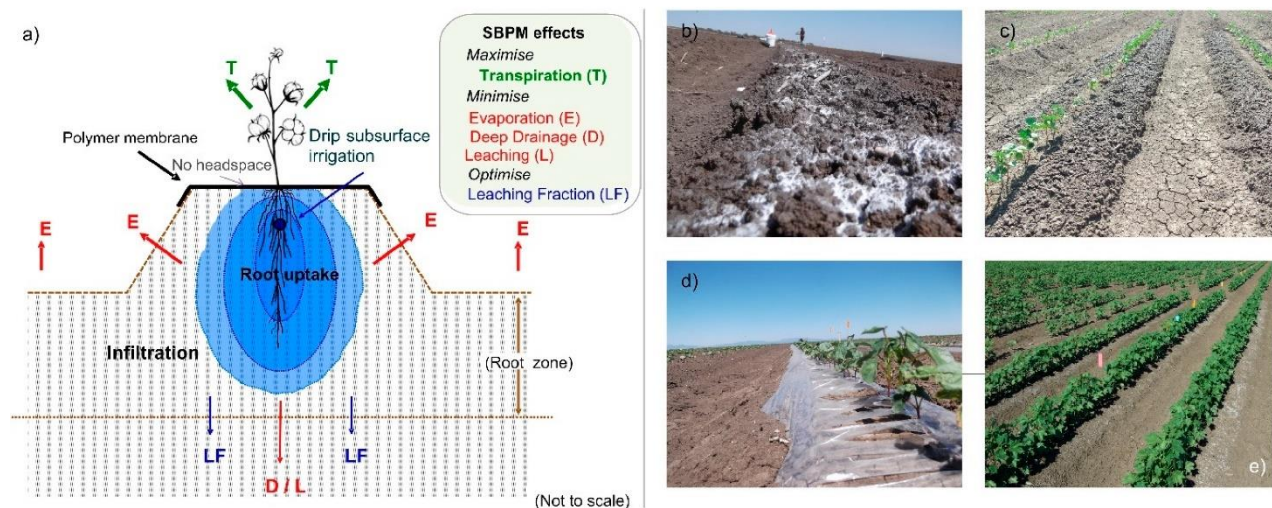
significativamente le proprietà meccaniche del pacciame, inclusi l'allungamento e la tensione di rottura.

- I film di pacciamatura utilizzati in questo studio non presentavano un'estesa degradazione visiva dopo 18 mesi di interrimento del suolo. I risultati di questo studio sono coerenti con altri studi con climi simili ma in sistemi di produzione annuale. I potenziali fattori che possono rallentare la degradazione dei BDPM in questo clima includono temperature del suolo e dell'aria moderatamente calde, precipitazioni estive moderate e la ridotta abbondanza di microrganismi dovuta alle pratiche di fumigazione del suolo.

* * *

Braunack, M. V., Adhikari, R., Freischmidt, G., Johnston, P., Casey, P. S., Wang, Y., ... Filipović, V. (2020). Initial experimental experience with a sprayable biodegradable polymer membrane (SBPM) technology in cotton. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 10(4), 584. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040584>

Data: 2014 - 2015			
Luogo: Narrabri, New South Wales, Australia, terreno con argilla e limo, estati calde secche e inverni piovosi miti/freddi			
Tipo di coltivazione: cotone, stagionale			
Pacciamatura	Composizione	Resa	Smaltimento
Nessuna (controllo)			
Slotted oxo-degradable polyethylene (ODP) film	PE oxo-degradabile Trasparente	Analoga al controllo	Incorporamento nel terreno (dannoso)
Biodegradable spray-on mulch based on sodium alginate	Alginato di sodio (20%), alghe e crusca di frumento	Maggiore del controllo (+ 7%)	Biodegradamento



* * *

Jia, H., Wang, Z., Zhang, J., Li, W., Ren, Z., Jia, Z., & Wang, Q. (2020). Effects of biodegradable mulch on soil water and heat conditions, yield and quality of processing tomatoes by drip irrigation. *Journal of Arid Land*, 12(5), 819–836. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0108-4>

Data: Maggio – Settembre 2019						
Luogo: Toutunhe District, Urumqi, Cina; terriccio; zona climatica semi-arida continentale medio-temperata (temperatura media Maggio-Settembre 26.8°C)						
Tipo di coltivazione: pomodoro, stagionale, campo aperto						
Pacciamatura	Composizione	Deterioram.	Temperatura	Umidità	Produzione	Costo
PE (controllo)	Polietilene Trasparente 0.008 mm	Richiede diversi anni		Maggiore del 1.5%–3.0% rispetto al suolo nudo		
BM1	PBAT Nero 0.01 mm	90% in 45 giorni 90% in 65 giorni	Temperatura media del suolo leggermente inferiore rispetto al PE	Umidità ed efficienza di utilizzo acqua leggermente inferiori al PE	Ridotta del 3 – 9% rispetto al PE	Maggiore del 5,8% rispetto al PE
WM1	PBAT Bianco 0.01 mm					
BM2	EPB Nero 0.01 mm					
WM2	EPB Bianco 0.01 mm					

EPB: eco-benign plastic, LLDPE + Agente Ossidante

* * *

Moore, J. and A. Wszelaki. 2019. The use of biodegradable mulches in pepper production in the southeastern United States. *Horticultural Science* 54(6):1031-1038.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI13942-19>

Data: 2017 – 2018					
Luogo: Knoxville, TN, USA, terreno limoso e ben drenato, clima subtropicale (temperatura media 23°C, umidità media 73%)					
Tipo di coltivazione: peperoni, stagionale (2 stagioni)					
Pacciamatura	Composizione	Deterioramento	Controllo malerbe	Temperatura	Produzione
PE (controllo)	Polietilene Nero 0.0254 mm	16% a fine stagione	Efficace	Troppo elevate, danneggia la pianta	Peggiora che a suolo nudo
WeedGuardPlus	Carta crespa Marrone chiaro 0.24 mm	> 90% a fine stagione	Analogo al PE	Ottimale	Migliore che PE
Bio360	Poliesteri + Amido Nero	40 – 60% a fine stagione	Meno efficace	Troppo elevate	Analogo PE

	0.018 mm				
Organix A.G. Black	PBAT + PLA Nero 0.0178 mm	40 – 60% a fine stagione	Meno efficace	Troppo elevate	Carente
Organix A.G. White on Black	PBAT + PLA Bianco ↑ Nero ↓ 0.0178 mm	20% a fine stagione	Meno efficace	Ottimale	Migliore che PE
Naturecycle	Amido + Poliestere Nero 0.0254 mm	40 – 60% a fine stagione	Meno efficace	Troppo elevate, danni peggiori	Carente
Exp-PLA/PHA	PLA + PHA Nero 0.025 mm	> 90% a fine stagione	Meno efficace	Troppo elevate	Analogo PE

In determinati climi e condizioni, i pacciami di colore nero possono ridurre i raccolti e persino degradare il suolo (Díaz-Pérez, 2010)

* * *

Ghimire, S., A.L. Wszelaki, J.C. Moore, D.A. Inglis, and C.A. Miles. 2018. Use of biodegradable mulches in pie pumpkin production in two diverse climates. *Horticultural Science* 53(3):288-294.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI12630-17>

Data: 2015 – 2016					
Luoghi:					
Mount Vernon, WA, clima estivo mite e umido (temperatura media 15 °C, umidità relativa media 82%), terreno argilloso limoso poco drenato					
Knoxville, TN, clima estivo caldo e umido (temperatura media 23 °C, umidità relativa media 73%), terreno limoso fine ben drenato					
Tipo di coltivazione: zucche, stagionale (2 stagioni)					
Pacciamatura	Composizione	Deterioram.	Controllo malerbe	Temperatura	Produzione
Polietilene (controllo)	Polietilene Nero 0.0254	Minore dell'1% a fine stagione	Efficace	Maggiore di 1-3°C rispetto alla Tambiente	
BioAgri	Mater-Bi (Amido e Poliestere) Nero 0.0180 20-25% biobased	10-36% a fine stagione	Efficace	Leggermente inferiore al PE	Inferiore del 10%
Experimental	PLA/PHA Nero 0.0250 mm 86% biobased	5-15% a fine stagione	Efficace	Leggermente inferiore al PE	Inferiore del 10%
Naturecycle	Amido e Poliestere Nero	61-100% a fine stagione	Qualche malerba a	Leggermente inferiore al PE	Inferiore del 10%

	0.0254 mm >20% biobased		fine stagione		
Organix	BASF Ecovio (PBAT + PLA) Nero 0.0178 mm 10% biobased	< 10% a fine stagione	Efficace	Leggermente inferiore al PE	Inferiore del 10%
WeedGuardPlus	Cellulosa Marrone 0.2400 mm 100% biobased	20-100% a fine stagione	Efficace	Inferiore al PE di 1-3°C	Inferiore del 25%

- Lo studio indica che la resa totale e la qualità della zucca coltivata con BDPM sono paragonabili al pacciame PE, tuttavia, i frutti che riposano per tempi prolungati su film di pacciamatura in plastica biodegradabile possono avere un'adesione del pacciame che ne può ridurre la resa commerciabile.
- Le osservazioni in entrambi i luoghi dell'esperimento indicano che il pacciame aderente può essere rimosso dalla frutta al mattino presto, quando i frutti sono umidi per la rugiada mattutina; tuttavia, man mano che la temperatura aumenta e il pacciame si secca sul frutto, diventa più difficile da rimuovere.
- Il costo del lavoro aumenta quando il pacciame aderente deve essere pulito dai frutti e la resa commerciabile diminuisce se questi frutti devono essere scartati a causa di problemi di qualità.
- L'adesione del pacciame sulla frutta aumenta il rischio che la plastica entri nel flusso di lavorazione degli alimenti e comprometta la qualità e la sicurezza alimentare dei prodotti e dei sottoprodotti.

* * *

DeVetter, L.W, H. Zhang, S. Ghimere, S. Watkinson, and C.A. Miles. 2017. Plastic biodegradable mulches reduce weeds and promote crop growth in day-neutral strawberry in western Washington. *Horticultural Science* 52(12): 1700-1706. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12422-17>

Data: 2014-2015				
Luogo: Mount Vernon, WA, clima estivo mite e umido (temperatura media 15 °C, umidità relativa media 82%), terriccio limoso				
Tipo di coltivazione: fragole bifere, stagionale (estate e inizio autunno), campo aperto				
Pacciamatura	Composizione	Deterioram.	Controllo malerbe	Resa
Polietilene (riferimento)	PE Nero 0.020 mm	Nulla a fine stagione	Efficace	200% rispetto al suolo nudo
Bio360	Mater-Bi + PBAT Nero 0.020 mm	5-15% a fine stagione	Più efficace	Analoga al PE
Sperimentale	TPS + PHA Nero 0.020 mm	40-90% a fine stagione	Leggermente meno efficace	Analoga al PE
WeedGuardPlus	Cellulosa Marrone 0.230	10-35% a fine stagione	Meno efficace	Inferiore al PE (circa 20% in meno)

* * *

Saglam, M., Sintim, H. Y., Bary, A. I., Miles, C. A., Ghimire, S., Inglis, D. A., & Flury, M. (2017). Modeling the effect of biodegradable paper and plastic mulch on soil moisture dynamics. *Agricultural Water Management*, 193, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.011>

Il deterioramento del pacciame biodegradabile ha causato una maggiore evaporazione, ma ha ridotto il deflusso dell'acqua piovana rispetto al pacciame in polietilene.

* * *

Lahoz, I.; Macua, J.I.; Cirujeda, A.; Aibar, J.; Marí, A.I.; Pardo, G.; Suso, M.; Pardo, A.; Moreno, M.M.; Moreno, C.; et al. Influencia del acolchado biodegradable en la producción de pimiento. In Proceedings of the XIII Jornadas del Grupo de Horticultura, I Jornadas del Grupo de Alimentación y Salud; Sociedad Española de Ciencias Hortícolas: Logroño, Spain, 2014; pp. 203–208. <http://hdl.handle.net/10532/3242>

Per la coltivazione dei peperoni, i materiali di pacciamatura biodegradabile hanno generato rese maggiori rispetto al polietilene.

* * *

Cowan, J. S., Miles, C. A., Andrews, P. K., & Inglis, D. A. (2014). Biodegradable mulch performed comparably to polyethylene in high tunnel tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production: Biodegradable mulch performed comparable to polyethylene in high tunnel tomato production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(9), 1854–1864. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6504>

Tutti i trattamenti con pacciamatura hanno controllato le erbe infestanti al di fuori del SB-PLA-10 (PLA). BioAgri (Mater-Bi), BioTelo (Amido e Biopolimeri) e polietilene hanno aumentato le rese totali del 20%, sebbene la commerciabilità sia stata ridotta del 14% rispetto al terreno nudo e ai trattamenti WeedGuardPlus (cellulosa).

* * *

Cowan, J. S., Inglis, D. A., & Miles, C. A. (2013). Deterioration of three potentially biodegradable plastic mulches before and after soil incorporation in a broccoli field production system in northwestern Washington. *HortTechnology*, 23(6), 849–858. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.6.849>

Alla fine del periodo di studio, 397 giorni dopo l'incorporazione del terreno, Crown1 (PHA) e BioAgri (Mater-Bi) si erano deteriorati rispettivamente del 100% e del 65%; mentre SB-PLA-11 (PLA) ha mostrato un deterioramento molto limitato.

* * *

Costa, R., Saraiva, A., Carvalho, L., & Duarte, E. (2014). The use of biodegradable mulch films on strawberry crop in Portugal. *Scientia Horticulturae*, 173, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.020>

L'agrobiofilm nero (Mater-Bi) è un valido sostituto del film convenzionale in polietilene per la coltivazione delle fragole.

2.2.2 Analisi Economica

Allo scopo di determinare quale tra i materiali di pacciamatura sia il più economicamente conveniente, si sono modellizzati i costi e la resa della pacciamatura.

In termini di costi, differenti tipologie di pacciamatura differiscono sotto molti aspetti, a partire dal prezzo di acquisto e di installazione, fino ad arrivare ai costi di rimozione.

Per quanto riguarda la resa, pacciamature diverse possono originare raccolti differenti in termini di qualità e quantità.

Si ha un beneficio a passare dal film di pacciamatura in polietilene ad una delle altre soluzioni se:

$$\Delta resa > \Delta costi$$

Modello di costo dei film di pacciamatura

La modellizzazione dei costi è stata condotta per i film polimerici di pacciamatura, sia biodegradabili che non biodegradabili, in quanto attualmente utilizzati per la produzione commerciale. Tuttavia questo modello può essere riadattato in futuro ad altre tipologie di pacciamatura (pacciamature organiche, pacciamature polimeriche spruzzabili) che attualmente non sono applicate commercialmente su larga scala.

Dettagli del modello di costo

Il costo complessivo può essere espresso in € su metro di pacciamatura (misura più precisa), € su m² di pacciamatura (misura precisa) o in € su ettaro (ha) di terreno pacciamato (stima generica).

Si può passare da €/m a €/ha conoscendo il numero e la lunghezza delle file pacciamate in un ettaro di terreno.

Si può passare da €/m a €/m² conoscendo la larghezza del rotolo di pacciamatura.

Il modello di costo è la somma delle seguenti voci di costo ed è specifico per ogni tipologia/marca/materiale di pacciamatura:

$$costo\ totale = costi\ di\ acquisto + costi\ di\ gestione + costi\ di\ smaltimento$$

Divisione dei costi

- Costi di acquisto:
 - Prezzo Pacciamatura
 - Costo di Spedizione
- Costi di gestione (o costi operativi)
 - Costi di Installazione
 - Ammortamento dei macchinari
 - Costo del carburante
 - Costo della manodopera
 - Costi di manutenzione: gestione malerbe, riposizionamento, ecc...
 - Costi relativi alla coltivazione (acqua, fertilizzanti, ecc...)
 - Costi di rimozione

- Ammortamento del macchinario
- Costo del carburante
- Costo della manodopera
- Costi di smaltimento: prezzo + trasporto

Si procede analizzando ciascuna voce nel dettaglio.

Costi di acquisto

I costi di acquisto si dividono in prezzo di acquisto e costo di spedizione.

$$\text{Costo di Acquisto} = \text{Prezzo Pacciamatura} + \text{Costo di Spedizione}$$

Il prezzo di acquisto può essere espresso in €/rotolo (e quindi è necessario conoscerne la lunghezza).

Dati utili:

- Produttore
- Materiale
- Lunghezza rotolo
- Larghezza
- Spessore
- Peso specifico per unità di area
- Prezzo al m, m2 o rotolo
- Costo di spedizione

Prezzo di Acquisto e Costo di Spedizione sono influenzate da:

- Fornitore
- Dimensione del lotto di acquisto
- Distanza dal fornitore

I dati richiesti si possono verificare direttamente con i fornitori.

Tabella 5. Prezzi di acquisto dei teli di pacciamatura, dati aggiornati al 2021

Fonte	Data	Tipologia	Costo
Di Giulio S.r.l. https://digiuliosrl.it/	Agosto 2021	PE Nero 1 m, 30 µm Non forato, Foratura Semplice Max 1000m	0.115 €/m Iva Inclusa Spedizione 10 – 30 €
		PE Nero 1.2 m, 30 µm Non forato, Foratura Densa Max 1000m	0.130 €/m Iva Inclusa Spedizione 10 – 30 €
		Biodegradabile 1 m, 15 µm Non forato, Foratura Semplice Max 1700m	0.13 – 0.14 €/m Iva Inclusa Spedizione 10 – 30 €
Viscardi S.r.l. https://viscardisrl.it/	Agosto 2021	PE Nero 1 m, 50 µm Non Forato Max 100 m	0.16 €/m
Garden Home https://gardenhome.it/	Agosto 2021	Mater-Bi 0.8 m Non Forato Max 250 m	0.244 €/m
Compro Bio https://comprobio.net/	Agosto 2021	Mater-Bi 1 m, 15 µm Non Forato Max 1000 m	0.36 €/m
Fornitore di mezzi tecnici (Cesena)	Settembre 2021	BASF Ecovio 1,00-1,10-1,20-1,40 m, 15 µm 42-45 mq/kg Bobine da 52kg	6,35 €/kg + iva 4% Trasporto BO €0.25/kg Es: larghezza 1 m, 1 kg per 42m, 6.35+0.25 €, 0.157€/m
		PE Nero 1,00-1,10-1,20-1,40-5,00-6,00 m 50 µm 20 mq/kg Bobine 1mt 52kg, 1,10mt 62kg, altre misure 72kg	3,25€/kg + iva 22% Trasporto BO €0.25/kg Es: larghezza 1 m, 1 kg per 20m, 3.25+0.25 €, 0.175€/m
Consorzio Agrario Adriatico (Cesena)	Settembre 2021	PE Nero 60 µm 18 mq/kg	3.30€/kg + iva 22% Es: larghezza 1 m, 1 kg per 18m, 0.183€/m
		Mater-Bi 15 µm 54 mq/kg	6,5€/kg + iva 4% Es: larghezza 1 m, 1 kg per 54m, 0.120€/m
		BASF Ecovio 15 µm 45 mq/kg	6,5€/kg + iva 4% Es: larghezza 1 m, 1 kg per 54m, 0.120€/m

Tabella 6. Prezzi di acquisto dei teli di pacciamatura negli anni passati

CRPV (2003) Studio sui Meloni Bio	2003	PE Nero 45 µm 22mq/kg	1.39€/kg Es: larghezza 1 m, 1 kg per 22m, 1.39€, 0.063€/m
		Mater Bi (Novamont) 12 µm 70mq/kg	5.3€/kg Es: larghezza 1 m, 1 kg per 70m, 5.3€, 0.076€/m
		Mater Bi (Novamont) 15 µm 55mq/kg	5€/kg Es: larghezza 1 m, 1 kg per 55m, 5€, 0.091€/m
		Ecopac - cellulosa (PATI) 9mq/kg	1.55€/kg Es: larghezza 1 m, 1 kg per 9m, 1.55€, 0.17€/m
CRA CAT Scafati (2011) Introduzione di film biodegradabili a base di Mater-Bi	2011	PE Nero 45 µm 22mq/kg	1.15 €/kg + iva 22% Es: larghezza 1 m, 1 kg per 22m, 1.15€, 0.052€/m
		Mater Bi (Novamont) 12 µm 70mq/kg	6 €/kg + iva 4% Es: larghezza 1 m, 1 kg per 70m, 6€, 0.086€/m
		Mater Bi (Novamont) 15 µm 55mq/kg	6 €/kg + iva 4% Es: larghezza 1 m, 1 kg per 55m, 6€, 0.110€/m

Considerazioni:

- I teli di pacciamatura biodegradabili godono di agevolazioni sull'IVA.
- La crisi produttiva dovuta al Covid-19 ha causato un'impennata del prezzo dei teli in polietilene, mentre il prezzo di Mater-Bi ed Ecovio è cresciuto relativamente poco.
- Il costo per unità di peso dei teli biodegradabili era circa 5 volte quello dei teli in polietilene prima del 2019, mentre adesso è circa 2 volte maggiore.

Costi di gestione (costi operativi)

I costi di gestione o costi operativi sono i costi relativi alla gestione del metodo di pacciamatura scelto. Si dividono in costi di installazione, costi di manutenzione, costi relativi alla coltivazione e costo di rimozione, e si ottengono moltiplicando il relativo coefficiente di costo, espresso in euro su unità di tempo, per il tempo richiesto per l'operazione.

Costi di installazione

Per l'installazione della pacciamatura è necessario un trattore, una macchina pacciamatrice, del carburante e degli operatori. Ognuno di essi ha un costo.

C. di Installazione

$$= \text{Tempo Richiesto} * (\text{Consumo Orario Trattore} * \text{Costo Gasolio Agricolo} + \text{Quota Oraria Amm. Trattore} + \text{Quota Oraria Amm. Pacciamatrice} + \text{Costo Orario Operatore} * \text{N° di Operatori})$$

Il tempo richiesto può essere espresso in ore su ha oppure ore, minuti o secondi su metro, ettometro o chilometro. Il tempo richiesto è funzione del materiale (materiali più delicati richiedono velocità di posa minori) e lunghezza del rotolo (rotoli più corti richiedono operazioni di cambio più frequenti).

- Proprietà meccaniche: se la tensione e l'allungamento a rottura sono maggiori, allora l'operazione di posa può procedere in maniera più spedita, riducendo quindi il tempo necessario.
- Lunghezza del rotolo: è necessario considerare il numero di volte in cui i lavoratori devono fermarsi per cambiare rullo, interrare le estremità e fissarle al terreno.

I pacciami di carta devono essere installati più lentamente perché non sono flessibili e si rompono facilmente. Inoltre, un rotolo di PE contiene solitamente 2400 metri lineari di pacciamatura mentre un rotolo di carta contiene circa 250 metri lineari (Marí, Pardo, Cirujeda, & Martínez, 2019).

$$\text{Tempo richiesto (approssimato)} = \frac{1}{\text{Velocità di pacciamatura}}$$

$$\text{Tempo richiesto (stima migliore)} = \frac{1}{\text{Velocità di Pacciamatura}} + \frac{\text{Tempo di Cambio Rotolo}}{\text{Lunghezza Rotolo}}$$

Per il passaggio da tempo/lunghezza a tempo/area di campo coltivato è necessario sapere il numero e la lunghezza delle file di pacciamatura e il tempo necessario per preparare la pacciamatura di una nuova fila e fissare la pacciamatura a fine fila.

La quota di ammortamento oraria di un macchinario si ottiene dividendo il prezzo di acquisto per la vita utile del macchinario. Ciò vale sia per i trattori che per le pacciamatrici.

$$\text{Quota Oraria di Amm. Macchinario } [€/h] = \frac{\text{Prezzo di Acquisto } [€]}{\text{Vita del Macchinario } [h]}$$

Domande:

- A che velocità si effettua la pacciamatura?
- Quanto tempo è necessario per effettuare il cambio del rotolo?
- Quanto tempo è necessario per fissare una fila di pacciamatura?
- Quanto tempo è necessario per iniziare una nuova fila di pacciamatura?
- Quanto consuma un trattore durante la pacciamatura?
- Qual è il costo di un trattore e qual è la sua vita utile (in ore)?
- Qual è il costo di una pacciamatrice e qual è la sua vita utile (in ore)?
- Quanti operatori servono durante la pacciamatura? Qual è il costo orario lordo di ogni operatore?

Tabella 7. Costo orario di un operaio agricolo.

Operaio agricolo	
Fonte	Costo [€]
Quanto Guadagna un Operaio Agricolo? (2021) (jobbydoo.it)	Orario: mediamente 10.50 Lordi
Tariffe operai agricoli a tempo determinato (unitus.it)	Orario: 12 – 14 Lordi
Lavoro occasionale in agricoltura, retribuzione oraria (2017) (money.it)	Orario: 6.50 – 7.50

Tabella 8. Prezzo del carburante agricolo.

Carburante	
Fonte	Costo [€]
Gasolio agricolo: caratteristiche, prezzo e normativa di riferimento (2019) (newsmondo.it)	0.75 – 0.90 / L
Prezzo Gasolio agricolo: +30% con il Decreto Clima (2021) (6sicuro.it)	0.75 – 0.90 / L
Gasolio agricolo, prezzo sull'altalena. Ecco perché. (2021) (agronotizie.imagelinenetwork.com)	0.70 / L

Tabella 9. Costo di acquisto di un trattore agricolo.

Trattore	
Fonte	Costo
Come calcolare il costo orario del trattore (2017) (ilnuovoagricoltore.it)	250 cv – 175000 € 350 cv – 255000€ Durata: almeno 15000 h
Trattori scheda modello NHO7084 (2021) (Motornet.it)	New Holland - T 7.165S DT Cab 158 cv – 120000€
Trattori scheda modello LAN7644 (2021) (Motornet.it)	Landini - 6-135 H DT Cab 126 cv – 80000€
Trattori scheda modello LAN7663 (Motornet.it)	Landini - 4-090D DT Cab 88 cv – 50000€

Tabella 10. Consumo di carburante di un trattore agricolo.

Consumo Trattore	
Fonte	Consumo
Consumo Trattore (2011) (forumdiagraria.org)	Landini 115cv, 20 L/h in aratura
	Renault 145cv, 19-22 L/h in aratura
Tabelle relative ai consumi medi dei prodotti petroliferi impiegati in lavori agricoli, orticoli, in (regione.lazio.it)	Mediamente 10 L/ha in pacciamatura
Estimation of mulching energy intensity (emu.ee)	John Deere 7930 (220 – 260cv), 33 L/h in pacciamatura

Tabella 11. Prezzo di acquisto di una pacciamatrice.

Pacciamatrice	
Fonte	Costo
Raised Bed Maker Ridger With Plastic Mulch Applicator (Alibaba.com)	1800\$
Rivenditore di mezzi agricoli	Pacciamatrice piccola (12 – 40 cv) – 1830€
	Pacciamatrice semplice 1.300 + iva e trasporto
	Pacciamatrice ammortizzata a partire da 1600€
	Pacciamatrice ammortizzata Ferrari, 2500€

Tabella 12. Velocità di movimentazione di una pacciamatrice.

Velocità di pacciamatura	
Fonte	Velocità
Stenditore di film plastico Plastic Stop Plus (Checchiemagli.coo)	Max 6-8 km/h
Abdelsamia Meselhy, A. (2020). Development the wide ridges machine for laying drip irrigation tubes and plastic mulch in Ras sudr-south of Sinai. <i>International Journal of Applied Agricultural Sciences</i> , 6(5), 135. https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20200605.15	2-4 km/h
Marihonnappanavara, S., & Veerangouda, M. (2017). Development and evaluation of tractor operated plastic mulch laying equipment. <i>International Journal of Agricultural Engineering</i> , 10(2), 374–378. http://dx.doi.org/10.15740/HAS/IJAE/10.2/374-378	2-4km/h

Nota: nei due studi sopra indicati sono stati eseguiti vari test per individuare la velocità ottimale in termine di efficienza e resa del terreno. Risulta che per velocità superiori la qualità della pacciamatura eseguita è minore e che il miglior compromesso si ha intorno ai 2-3 km/h. Per ottenere produttività maggiori è quindi opportuno utilizzare una pacciamatrice multipla a velocità inferiori.

Costi di manutenzione

Sono i costi relativi alla manutenzione del campo pacciamato, quali ad esempio la rimozione di erbe infestanti, il riposizionamento del pacciame, riparazioni, e simili.

$$\text{Costi di Manutenzione} = \sum_{\text{Operazioni}} \text{Tempo richiesto} * \text{Costo Orario Operatore}$$

I costi di manutenzione sono un po' criptici e probabilmente è più facile reperirli per ha di coltivazione.

Domanda: sono necessarie delle operazioni di manutenzione relative alla pacciamatura? Quanti operatori e per quanto tempo richiedono?

Costi relativi alla coltivazione

Si potrebbe conteggiare tra i costi anche l'acqua consumata e i fertilizzanti necessari, ma a scopo comparativo è opportuno realizzare un confronto a parità di irrigazione e fertilizzazione, considerando poi la differenza di performance nella voce di resa.

Costi di rimozione

Per la rimozione della pacciamatura è necessario un trattore e un macchinario dedicato, del carburante e degli operatori.

C. di Rimozione

$$\begin{aligned} &= \text{Tempo Richiesto} * (\text{Consumo Orario Trattore} * \text{Costo Gasolio Agricolo} \\ &+ \text{Quota Oraria di Amm. Trattore} + \text{Quota Oraria Amm. Depacciamatrice} \\ &+ \text{Costo Orario Operatore} * \text{N° di Operatori}) \end{aligned}$$

Il tempo richiesto può essere espresso in ore su ettaro oppure ore, minuti o secondi su metro, ettometro o chilometro. Il tempo richiesto è funzione del materiale (materiali biodegradabili richiedono unicamente la rimozione della manichetta di irrigazione e quindi tempi minori).

$$\text{Tempo richiesto (approssimato)} = \frac{1}{\text{Velocità di Depacciamatura}}$$

$$\begin{aligned} &\text{Tempo richiesto (stima migliore)} \\ &= \frac{1}{\text{Velocità di Depacciamatura}} + \frac{\text{Tempo di Spostamento/Scarico}}{\text{Capienza Depacciamatrice}} \end{aligned}$$

Per il passaggio da tempo/lunghezza a tempo/area di campo coltivato è necessario sapere il numero e la lunghezza delle file di pacciamatura.

A fine stagione, il film di pacciamatura in polietilene va rimosso (tramite apposito macchinario), si rimuovono i tubi di irrigazione, si fresa/ara il terreno.

La macchina avvolgitrice per complessità e funzionalità è molto simile alla macchina pacciamatrice e per questo si può supporre che abbia un costo simile ad essa.

Il costo della rimozione può essere minimizzato nel momento in cui il materiale è biodegradabile e non necessita di essere rimosso dal terreno, in quanto l'incorporamento nel suolo avviene durante la normale operazione di fresatura/aratura, necessaria per la coltivazione successiva. È comunque necessario rimuovere i tubi di irrigazione.

La quota di ammortamento oraria di un macchinario si ottiene dividendo il prezzo di acquisto per la vita utile del macchinario. Ciò vale sia per le avvolgitrici delle pacciamature che per le avvolgitrici delle sole manichette.

$$\text{Quota Oraria di Amm. Macchinario } [€/h] = \frac{\text{Prezzo di Acquisto } [€]}{\text{Vita del Macchinario } [h]}$$

Domande:

- A che velocità si effettua la depacciamatura?

- Che macchinari sono necessari per la depacciamatura? E quanto costano?
- Quanto tempo è necessario per la sola rimozione della manichetta di irrigazione?
- Quanto tempo è necessario per scaricare la depacciamatrice?
- Quanto consuma un trattore durante la depacciamatura?
- Qual è il costo di un avvolgitore per la pacciamatura e qual è la sua vita utile (in ore)?
- Qual è il costo di un avvolgitore per la sola manichetta e qual è la sua vita utile (in ore)?
- Quanti operatori servono durante la depacciamatura? Qual è il costo orario lordo di ogni operatore?

Tabella 13. Prezzi di acquisto di una macchina avvolgitrice di paccime plastico.

Avvolgitrice	
Fonte	Costo
Plastic Mulch Layers and Lifter (elitemetaltools.com)	n.d.
CropCare PR2500 Plastic Mulch Lifter-Wrapper (watermanfarmmachinery.com)	n.d.
Plastic Mulch Layer and Lifter (mechanicaltransplanter.com)	n.d.

Tabella 14. Velocità di movimentazione di una macchina avvolgitrice.

Velocità di Depacciamatura	
Fonte	m/s
Plastic Mulch Retriever removes plastic mulch fast and easy (youtube.com)	2.5
GDM EzyLift Plastic Mulch Lifter (youtube.com)	1
Plastic Mulch Retriever (youtube.com)	2

Costo di smaltimento

L'eventuale materiale rimosso dal campo necessita di essere opportunamente smaltito. Il centro di raccolta o il riciclatore potrebbero addebitare dei costi per lo smaltimento, che si andrebbero a sommare al costo del trasporto fino allo stabilimento.

C. di Smaltimento

$$\begin{aligned}
 &= \text{Tempo Richiesto} * \text{Costo Orario Operatore} * \text{N° di Operatori} \\
 &+ \text{Distanza da Percorrere} * \text{Consumo Carburante Veicolo} * \text{Costo Carburante} \\
 &+ \text{Tariffa Smaltimento} * \text{Peso Paccime}
 \end{aligned}$$

Il peso del paccime può essere specifico (g/m o g/m²) oppure riferito all'ha di campo coltivato (kg/ha).

Nel caso di materiali incorporati nel terreno, i costi di smaltimento sono nulli.

I rifiuti speciali provenienti dall'attività agricola, siano essi pericolosi o non pericolosi, devono essere raccolti temporaneamente, per gruppi omogenei, in appositi ambienti che posseggano caratteristiche tali da impedire danni a cose o a persone (Sipram, 2019).

I rifiuti speciali dell'attività agricola possono poi essere smaltiti attraverso il servizio pubblico, se esiste una specifica convenzione, o attraverso il conferimento a ditte autorizzate allo smaltimento, strada obbligata per i rifiuti speciali pericolosi (come i contenitori dei fitofarmaci).

Gli oneri relativi allo smaltimento sono a carico del detentore dei rifiuti, siano essi pericolosi o non pericolosi.

In Emilia-Romagna i teli di pacciamatura in polietilene rientrano tra i rifiuti speciali agricoli non pericolosi, sotto il codice CER 020104: "rifiuti plastici (ad esclusione degli imballaggi)". Il codice comprende inoltre la copertura delle serre e silos, reti per filari e/o antigrandine, spaghi e avvolgimento rotoballe (reti e film).

Dalle rilevazioni eseguite la tariffa di smaltimento per i teli di pacciamatura in polietilene risulta essere di circa 10€ a quintale.

I rifiuti speciali agricoli CER 020104 sono assimilabili ai rifiuti urbani e pertanto possono essere conferiti direttamente nelle isole ecologiche (dette anche centri di raccolta). Durante i mesi estivi, nei quali avviene la rimozione del pacciame, il conferimento dei film di polietilene usati può essere gratuito. Il requisito fondamentale è che i teli siano divisi per colore/trasparenza e lavati dai detriti residui (CesenaToday, 2018).

L'operazione di smistamento e lavaggio dei teli potrebbe comportare ulteriori costi in termini di manodopera.

$$\text{Costo di lavaggio} = \text{Tempo di Lavaggio} * \text{Costo Orario Operatore}$$

Domande:

- Dove viene smaltito il pacciame? Chi se ne occupa?
- Quanto tempo richiede lo smaltimento del pacciame? Quanti operatori sono coinvolti?
- Quanto dista il centro di smaltimento dall'azienda?
- Qual è la tariffa di smaltimento?
- Nella rimozione del pacciame in polietilene, quanto ne rimane all'incirca nel terreno?
- È necessario lavare il pacciame in polietilene prima dello smaltimento? Quanto tempo richiede questa operazione?

Tabella 15. Tariffa di smaltimento della pacciamatura.

Smaltimento Pacciamatura	
Fonte	Costo
Smaltitore autorizzato – Tariffa Standard	10€/quintale
Consorzio Agricolo – Smaltimento Convenzionato	50€/tonnellata
Consorzio Agricolo – Smaltimento con tariffa forfettaria	120€/anno

Tabella 16. Tariffa di smaltimento della manichetta di irrigazione.

Smaltimento Manichetta	
Fonte	Costo
Smaltitore autorizzato – Tariffa Standard	Conferimento Gratuito
Consorzio Agricolo – Smaltimento Convenzionato	Conferimento Gratuito

Modello di Resa

La resa (€/ha coltivato o €/m di pacciamatura) è uguale a:

$$resa = \sum_i^n quantità_i * valore_i$$

Dove:

- i è il singolo calibro/dimensione/qualità della coltivazione
- $quantità_i$ è la quantità raccolta di quel determinato calibro, in kilogrammi, quintali o tonnellate su ha o m
- $valore_i$ è il valore di quel calibro, espresso in € su kilogrammo, quintale o tonnellata

Il valore inoltre è influenzato dal prezzo di mercato al momento della raccolta, che è tanto maggiore quanto la raccolta può essere anticipata.

La resa è influenzata principalmente dai seguenti parametri, ampiamente discussi nei capitoli precedenti:

- Umidità → traspirazione del pacciame
- Temperatura → colore del pacciame
- Riduzione delle malerbe → durabilità e pigmentazione del pacciame
- Durabilità nel tempo del pacciame → materiale del pacciame

Il confronto delle rese dei vari pacciami va effettuata a parità di condizioni al contorno:

- Luogo di coltivazione
- Periodo di coltivazione
- Quantità di irrigazione
- Quantità di fertilizzazione

Influenza sul prezzo d'acquisto

L'etichettatura o la commercializzazione degli alimenti coltivati su prodotti biodegradabili può offrire ai coltivatori l'opportunità di aumentare i ricavi.

Uno studio americano ha evidenziato come la vendita di fragole pubblicizzate per la loro pacciamatura biodegradabile possa permettere un prezzo di vendita fino al 10% superiore alle categorie di persone più sensibili alla tematica (persone a reddito più alto, con tendenze ecologiste, informati sulla pacciamatura o di genere femminile), e che la diffusione di informazioni positive ai potenziali consumatori possa permettere un aumento generale del prezzo di vendita del 2% (Chen, Marsh, Tozer, & Galinato, 2019).

Effetti sul lungo termine

Per determinare il vantaggio economico sul lungo termine, è necessario includere nell'analisi i benefici economici associati a una migliore fertilità e conservazione del suolo che possono verificarsi come risultato a lungo termine dell'uso del BDPM.

Ad esempio, quando il pacciame di PE viene rimosso, parte del terriccio si attacca al pacciame e viene perso a causa dello smaltimento della plastica. La perdita del suolo superficiale potrebbe comportare non solo la sostituzione annuale del suolo superficiale (una spesa aggiuntiva) ma anche una riduzione della produttività del suolo nel lungo periodo (Velandia, et al., 2018).

Inoltre, durante l'operazione di rimozione del pacciame in polietilene è comune che alcuni frammenti di film rimangano intrappolati nel terreno. A lungo termine, l'accumulo di plastica nel suolo può ridurre la fertilità.

Tuttavia, anche il pacciame biodegradabile può accumularsi nel suolo a causa della parziale degradazione, con effetti analoghi al pacciame in polietilene. L'eventualità che ciò accada per il Mater-Bi è tutto sommato remota, viste le numerose testimonianze presenti in rete sulla completa biodegradazione del film di pacciamatura (Magnani, 2021) (Novamont, 2021).

2.2.3 Stima comparativa dei costi di pacciamatura per film in Polietilene e Mater-Bi

In questo capitolo si effettuerà un'analisi comparativa dei costi delle pacciamature in plastica, basata sui dati raccolti, allo scopo di determinare quale sia la tipologia di pacciamatura più conveniente in termini di costi. Si ricorda che negli studi precedentemente analizzati non vi è sostanziale differenza di resa tra i teli biodegradabili e quelli in polietilene, per tale motivo i costi associati possono determinare o meno la convenienza economica di un materiale di pacciamatura rispetto ad un altro.

Si considereranno 3 tipologie di teli: polietilene di spessore 50 μm (Polietilene 50), mater-bi 15 μm (MaterBi 15), mater-bi 12 μm (MaterBi 12).

Dal colloquio con alcuni fornitori di mezzi tecnici della provincia di Forlì-Cesena, i film di pacciamatura più utilizzati sono Polietilene 50 e MaterBi 15. Si considera anche il MaterBi 12 quale confronto in un'ottica di risparmio del materiale, allo scopo di minimizzare le risorse utilizzate e l'impatto ambientale.

Ipotesi

Allo scopo di semplificare la comparazione, altrimenti estremamente complessa e potenzialmente inconcludente, si sono adottate le seguenti ipotesi:

- Data la variabilità dei dati, per ogni soluzione di pacciamatura si definiranno due casi estremi: uno che considera tutti gli estremi inferiori delle voci di costo, e una che considera tutti gli estremi superiori delle voci di costo. In tal modo, si otterranno i due estremi che racchiuderanno un intervallo dei costi plausibili.
- I costi oggetto di questa analisi differenziale saranno: acquisto e spedizione, installazione, rimozione e smaltimento.
- Si prenderanno a esempio teli di pacciamatura larghi 1 m.
- Per semplicità, nel considerare i tempi di pacciamatura e depacciamatura, non si considereranno esplicitamente i tempi necessari per il cambio da una fila di pacciamatura ad un'altra, e non si considererà nemmeno il tempo necessario per il cambio rotolo (spesso avviene con continuità senza interrompere l'operazione). Per compensare ciò, si arrotonderà per difetto la velocità di pacciamatura e depacciamatura.
- Installazione e rimozione richiedono 2 persone, un trattore (costo 80000€, consumo 20L/h) e macchinari specializzati per la pacciamatura/depacciamatura.
- Per il traino di una pacciamatrice da 1 m (costo: 1500 – 3000€, durata plausibile: 1500 h) è sufficiente un trattore a trazione posteriore da 80cv (costo: 50000€, durata: 10000 h). La pacciamatura si esegue a 0.5 – 1 m/s.
- Per la posa delle pacciamature biodegradabili è necessario procedere a una velocità leggermente inferiore (0.3 – 0.8) rispetto alle pacciamature in polietilene (0.4 – 1 m/s).
- Per la rimozione della pacciamatura serve un macchinario detto avvolgitrice o depacciamatrice, il cui costo è analogo a quello di una pacciamatrice (1500 – 3000€) e una durata analoga se non superiore (almeno 3000h). La depacciamatura procede ad una velocità di 0.5 – 1 m/s.
- Per la rimozione della sola manichetta di irrigazione, come accade per i teli biodegradabili, si utilizza un'avvolgitrice dedicata di costo contenuto (500€) e durata analoga (1500h). La rimozione della manichetta procede ad una velocità di 2 – 2.5 m/s.

- Nella successiva conversione in costo per ettaro di terreno coltivato, si considererà un quadrato di lato 100m (superficie totale 1 ettaro o 1000 mq) con una distanza tra le file e i bordi di 0.5m, per un totale di 66 file da 99m, ovvero 6534m.

Calcolo dei coefficienti di costo operativi (per macchinari e personale)

I costi di pacciamatura e depacciamatura sono costi operativi, ovvero dipendono sostanzialmente dalla loro durata e dal costo per unità temporale di personale e macchinari. In questa sezione si andrà a stimare i costi per unità temporale di manodopera, trattore (incluso carburante), pacciamatrice, avvolgitrice per pacciamatura e manichetta di irrigazione.

Manodopera

$$\text{Coeff. Costo Manodopera} \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Costo Orario Lordo} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] * \text{Numero di Persone}}{3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]}$$

Tabella 17. Calcolo del coefficiente di costo della manodopera.

Manodopera	
Costo Orario Lordo Manodopera [€/h]	14
Numero di Persone	2
Coeff. Costo Manodopera [€/s]	0.007777778

Trattore (incluso carburante)

$$\text{Coeff. Costo Trattore} \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right] = \frac{\frac{\text{Costo Trattore} [\text{€}]}{\text{Vita Utile} [\text{h}]} + \text{Consumo Trattore} \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right] * \text{Costo Gasolio} \left[\frac{\text{€}}{\text{L}} \right]}{3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]}$$

Tabella 18. Calcolo del coefficiente di costo dell'utilizzo del trattore agricolo.

Trattore	
Costo Trattore [€]	80000
Vita Utile [h]	10000
Quota Oraria Ammortamento Trattore [€/h]	8
Consumo Trattore [L/h]	20
Costo Gasolio Agricolo [€/L]	0.7
Costo Orario Gasolio [€/h]	14
Coeff. Costo Trattore [€/s]	0.006111111

Pacciamatrice

$$\text{Coeff. Costo Pacciamatrice} \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Costo Pacciamatrice} [\text{€}]}{\text{Vita Utile} [\text{h}] * 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]}$$

Tabella 19. Calcolo del coefficiente di costo della pacciamatrice.

Pacciamatrice	
Costo Pacciamatrice [€]	2500
Vita Utile [h]	1500
Quota Oraria Amm. Pacciamatrice [€/h]	1.666666667
Coeff. Costo Pacciamatrice [€/s]	0.000462963

Avvolgitrice Pacciamatura (Depacciamatrice)

$$\text{Coeff. Costo Avvolgitrice Pacciamatura} \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Costo Avvolgitrice Pacciamatura [€]}}{\text{Vita Utile [h]} * 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]}$$

Tabella 20. Calcolo del coefficiente di costo dell'avvolgitrice per la pacciamatura.

Avvolgitrice Pacciamatura (Depacciamatrice)	
Costo Avvolgitrice Pacciamatura [€]	2500
Vita Utile [h]	1500
Quota Oraria Amm. [€/h]	1.666666667
Coeff. Costo Avvolgitrice Pacciamatura [€/s]	0.000462963

Avvolgitrice Manichetta

$$\text{Coeff. Costo Avvolgitrice Pacciamatura} \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{Costo Avvolgitrice Pacciamatura [€]}}{\text{Vita Utile [h]} * 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]}$$

Tabella 21. Calcolo del coefficiente di costo dell'avvolgitrice per la manichetta.

Avvolgitrice Manichetta	
Costo Avvolgitrice Manichetta [€]	500
Vita Utile [h]	1500
Quota Oraria Ammortamento [€/h]	0.333333333
Coeff. Costo Avvolgitrice Manichetta [€/s]	9.25926E-05

Riepilogo e considerazioni

Tabella 22. Tabella riepilogativa dei coefficienti di costo espressi in €/s.

Riepilogo	
Coeff. Costo Manodopera [€/s]	0.00778
Coeff. Costo Trattore [€/s]	0.00611
Coeff. Costo Pacciamatrice [€/s]	0.00046
Coeff. Costo Avvolgitrice Pacciamatura [€/s]	0.00046
Coeff. Costo Avvolgitrice Manichetta [€/s]	0.00009

Considerazioni:

- Il coefficiente di costo maggiore è quello relativo alla manodopera, seguito dal termine che raccoglie trattatrice agricola e carburante.
- Gli altri costi sono praticamente trascurabili, soprattutto nel caso dell'avvolgitrice della sola manichetta.

Calcolo dei costi per unità di pacciamatura

Una volta definiti i costi operativi, è possibile procedere a definire il costo di installazione e rimozione per unità di pacciamatura, oltre ai costi di acquisto e smaltimento.

Acquisto

Il costo complessivo di acquisto è dato dal prezzo della pacciamatura, a cui si aggiunge l'IVA e la tariffa di spedizione.

Il prezzo dei film di pacciamatura viene spesso indicato dai fornitori in € per Kg di materiale. Dividendo questo valore per la riuscita del film, espressa in m² su kg, è possibile ottenere il prezzo al m². Risultato analogo si ottiene se si moltiplica il prezzo al kg per il peso specifico espresso in kg su m².

$$\text{Prezzo} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] = \frac{\text{Prezzo} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]}{\text{Riuscita} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right]} = \text{Prezzo} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] * \text{Peso Specifico} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

Per l'aggiunta dell'IVA al prezzo di acquisto, è sufficiente moltiplicarlo per un fattore pari a 1 + IVA[%]

$$\text{Prezzo (IVA inclusa)} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] = (1 + \text{IVA}) * \text{Prezzo} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right]$$

Anche il costo di spedizione viene spesso indicato per unità di massa dell'oggetto spedito. In tal caso, per ottenere il prezzo per unità di superficie il ragionamento è analogo a quello del prezzo.

$$\text{Costo Spedizione} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] = \frac{\text{Costo Spedizione} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]}{\text{Riuscita} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right]} = \text{Costo Spedizione} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] * \text{Peso Specifico} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

Il costo totale di acquisto è dato dalla somma di prezzo (IVA inclusa) e costo di spedizione.

$$\text{Costo di Acquisto} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] = \text{Prezzo (IVA inclusa)} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] + \text{Costo Spedizione} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right]$$

Per il passaggio da unità di superficie a unità di lunghezza, è sufficiente moltiplicare per la larghezza del film di pacciamatura.

$$\text{Costo di Acquisto} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}} \right] = \text{Costo di Acquisto} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] * \text{Larghezza Telo} [\text{m}]$$

Tabella 23. Calcolo del costo complessivo di acquisto.

	Polietilene 50		MaterBi 15		MaterBi 12	
	[-]	[+]	[-]	[+]	[-]	[+]
Peso specifico [kg/m ²]	0.0500	0.0500	0.018	0.018	0.014	0.014
Prezzo Pacciamatura [€/kg]	1.15	3.3	5	6.5	5.3	6.5
Prezzo Pacciamatura [€/m ²]	0.0575	0.1650	0.0900	0.1170	0.0742	0.0910
Iva [%]	22	22	4	4	4	4
Prezzo (IVA Inclusa) [€/m ²]	0.07015	0.2013	0.0936	0.12168	0.077168	0.09464
Costo di Spedizione [€/kg]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Costo di Spedizione [€/m ²]	0.0125	0.0125	0.0045	0.0045	0.0035	0.0035
Totale Acquisto (Prez. + Sped.) [€/m ²]	0.0827	0.2138	0.0981	0.1262	0.0807	0.0981
Larghezza Pacciamatura [m]	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Totale Acquisto (Prez. + Sped.) [€/m]	0.0827	0.2138	0.0981	0.1262	0.0807	0.0981

Installazione

Il costo di installazione si ottiene moltiplicando i coefficienti di costo di manodopera, trattore e pacciamatrice per il tempo impiegato per posare l'unità di lunghezza della pacciamatura, o il reciproco della velocità di pacciamatura.

$$\text{Costo di Installazione} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}} \right] = \frac{(\text{Coeff. Costo Manodopera} + \text{Trattore} + \text{Pacciamatrice}) \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right]}{\text{Velocità di Pacciamatura} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}$$

Tabella 24. Calcolo del costo di installazione.

	Polietilene 50		MaterBi 15		MaterBi 12	
	[-]	[+]	[-]	[+]	[-]	[+]
Velocità di Pacciamatura [m/s]	1	0.4	0.8	0.3	0.8	0.3
Costo di Installazione [€/m]	0.0144	0.0359	0.0179	0.0478	0.0179	0.0478

Rimozione

Il costo di installazione si ottiene moltiplicando i coefficienti di costo di manodopera, trattore e avvolgitrice per il tempo impiegato per rimuovere l'unità di lunghezza della pacciamatura, o il reciproco della velocità di depacciamatura. Per quanto riguarda i teli biodegradabili, si considera il coefficiente di costo dell'avvolgitrice per manichette al posto del coefficiente di costo dell'avvolgitrice per teli di pacciamatura.

$$\text{Costo di Rimozione} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}} \right] = \frac{(\text{Coeff. Costo Manodopera} + \text{Trattore} + \text{Avvolgitrice}) \left[\frac{\text{€}}{\text{s}} \right]}{\text{Velocità di Pacciamatura} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}$$

Tabella 25. Calcolo del costo di rimozione.

	Polietilene 50		MaterBi 15		MaterBi 12	
	[-]	[+]	[-]	[+]	[-]	[+]
Velocità di Rimozione [m/s]	1	0.5	2.5	2	2.5	2
Costo di Rimozione [€/m]	0.0144	0.0287	0.0058	0.0072	0.0056	0.0070

Smaltimento

La tariffa di smaltimento in genere viene indicata per unità di materiale, è può essere comprensiva o meno del servizio di ritiro in loco. Il costo di smaltimento per unità di superficie di pacciamatura si ottiene moltiplicando la tariffa di smaltimento per il peso specifico, e moltiplicando questo valore per la larghezza del telo di pacciamatura si ottiene il costo di smaltimento per unità di lunghezza.

$$\text{Costo di Smaltimento} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] = \text{Tariffa di Smaltimento} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] * \text{Peso Specifico} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\text{Costo di Smaltimento} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}} \right] = \text{Costo di Smaltimento} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] * \text{Larghezza Telo} [\text{m}]$$

Tabella 26. Calcolo del costo di smaltimento.

	Polietilene 50		MaterBi 15		MaterBi 12	
	[-]	[+]	[-]	[+]	[-]	[+]
Tariffa di Smaltimento [€/kg]	0.05	0.1	0	0	0	0
Costo di Smaltimento [€/m ²]	0.0025	0.005	0	0	0	0
Costo di Smaltimento [€/m]	0.0025	0.005	0	0	0	0

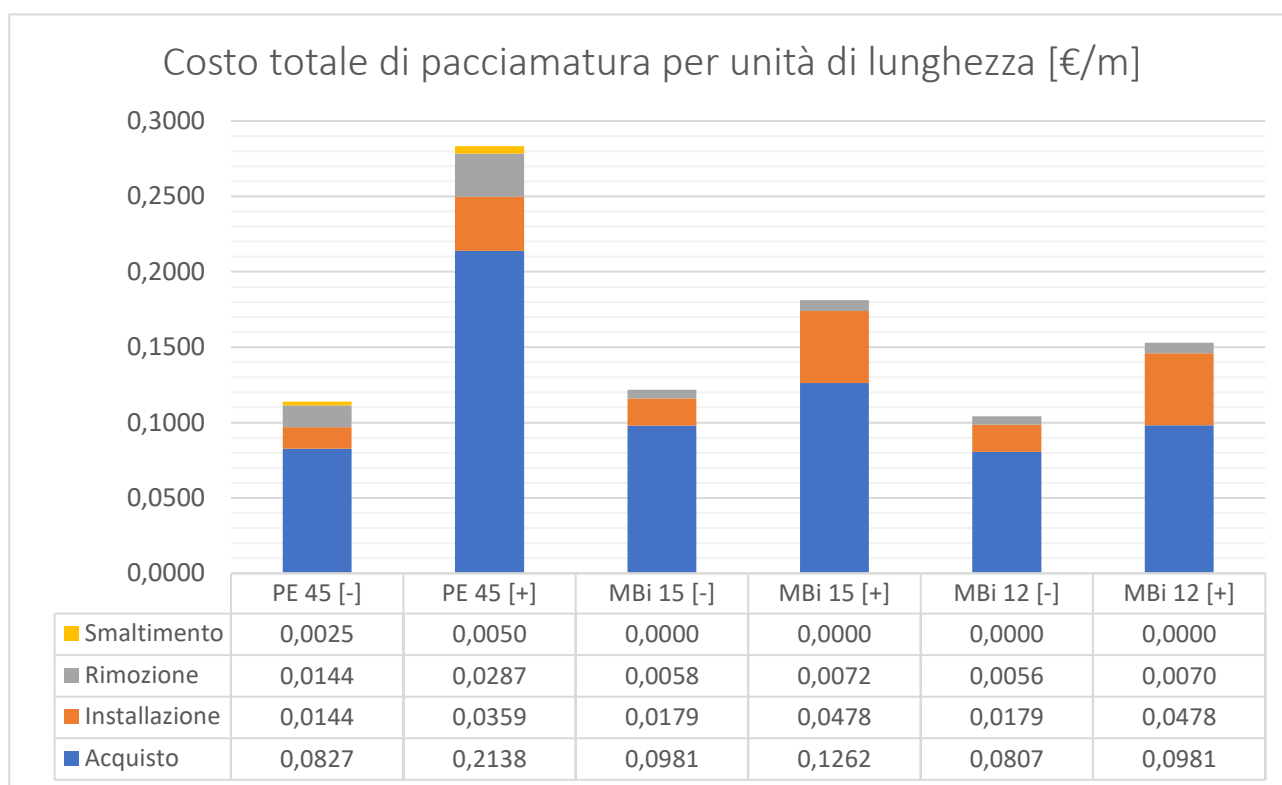
Costo totale per unità di lunghezza

Il costo totale è dato dalla somma delle voci di costo precedentemente calcolate.

Tabella 27. Calcolo del costo totale per ogni pacciamatura, espresso in €/m.

	Polietilene 50		MaterBi 15		MaterBi 12	
	[-]	[+]	[-]	[+]	[-]	[+]
Acquisto [€/m]	0.0827	0.2138	0.0981	0.1262	0.0807	0.0981
Installazione [€/m]	0.0144	0.0359	0.0179	0.0478	0.0179	0.0478
Rimozione [€/m]	0.0144	0.0287	0.0058	0.0072	0.0056	0.0070
Smaltimento [€/m]	0.0025	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Totale [€/m]	0.1139	0.2834	0.1218	0.1812	0.1042	0.1530

Figura 13. Grafico del costo totale di pacciamatura per unità di lunghezza con evidenziati i costi parziali.



Discussione dei risultati ottenuti

Come si può notare dal grafico sopra riportato, i teli Mater-Bi nel loro ciclo di vita hanno costi di poco superiori ai teli in Polietilene negli scenari minimi (-), mentre negli scenari conservativi, che considerano i costi attuali del materiale (era covid) e dati più realistici, il polietilene risulta più costoso rispetto al Mater-Bi.

L'acquisto dei teli rappresenta la maggior voce di costo ed è di molto superiore ai costi operativi di installazione e dalla rimozione dei teli. I costi cumulati di installazione e rimozione delle tre tipologie di pacciamatura risultano inoltre paragonabili negli stessi scenari (di minimo e di massimo costo). Questo risultato è stato confermato dal colloquio con alcuni operatori del settore.

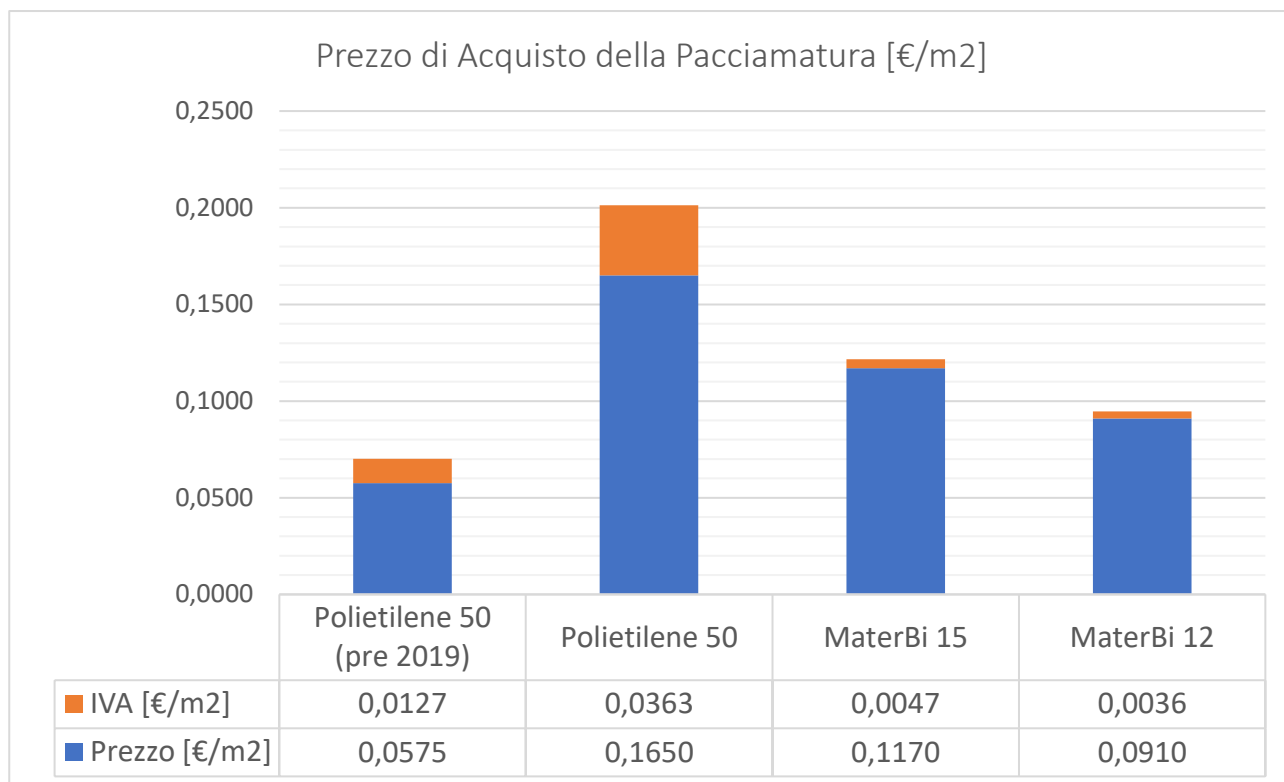
Infine, il costo dello smaltimento del polietilene risulta potenzialmente trascurabile.

Date le precedenti considerazioni, si può tranquillamente ritenere che l'unica differenza rilevante a livelli di costi di pacciamatura è quella relativa al prezzo di acquisto del materiale.

Tabella 28. Confronto dei prezzi di acquisto di Polietilene 50 (pre 2019 e attuali), MaterBi 15 e MaterBi 12.

	Polietilene 50 (pre 2019)	Polietilene 50	MaterBi 30	MaterBi 20
Peso specifico [kg/m ²]	0.0500	0.0500	0.018	0.014
Prezzo [€/kg]	1.15	3.3	6.5	6.5
Prezzo [€/m²]	0.0575	0.1650	0.1170	0.0910
Iva [%]	22	22	4	4
Prezzo (IVA Inclusa) [€/m²]	0.0702	0.2013	0.1217	0.0946

Figura 14. Confronto dei prezzi di acquisto, iva esclusa e iva inclusa, di Polietilene 50 (pre 2019 e attuali), MaterBi 15 e MaterBi 12 (attuali)



Sebbene il prezzo per unità di massa di materiale del Mater-Bi sia 2 volte quello del Polietilene, il prezzo finale per unità di superficie di pacciamatura in Mater-Bi risulta largamente minore in entrambi i casi, anche nel caso in cui non si considerasse l'agevolazione sull'IVA. Se il prezzo del polietilene in futuro scenderà ai livelli del 2019, esso tornerà ad essere la scelta economicamente più conveniente.

Si conclude ricordando che i film di pacciamatura biodegradabili sono tutt'ora poco utilizzati, e che La diffusione del loro impiego potrebbe portare, per economia di scala e miglioramento dei processi produttivi, ad una riduzione del prezzo del materiale, rendendo i teli in pacciamatura biodegradabili estremamente competitivi in confronto al polietilene.

2.4 Conclusioni raggiunte sulle varie soluzioni di pacciamatura

In questa prima parte dello studio sono stati analizzate diverse soluzioni di pacciamatura.

La soluzione più utilizzata è il film di pacciamatura in polietilene, mentre le alternative biodegradabili commercializzate sono i film in Mater-Bi (Novamont), a base di amidi di mais e olii vegetali, ed Ecovio (BASF), a base di polibutirrato e acido polilattico.

Il film in Mater-Bi si pone come ottima alternativa al polietilene per i seguenti motivi:

- La resa delle colture è paragonabile e a volte migliore.
- Il costo per la pacciamatura di colture stagionali attualmente è minore rispetto ai teli in polietilene.
- È prodotto con materie rinnovabili e naturali, a meno di particolari additivi che però sono presenti in quantità minime.
- Gli studi analizzati non hanno evidenziato alcuna forma di ecotossicità (tuttavia sono necessari altri studi di approfondimento).
- Se in futuro si verificherà sperimentalmente che la biodegradazione nel suolo è completa, le microplastiche disperse nell'ambiente sono minime o nulle (a differenza del polietilene).

Tabella 29. Riepilogo dei materiali disponibili per la pacciamatura.

Materiale	Utilizzo Commerciale	Resa	Costo	Durabilità	Bio-degradabilità	Impatto Ambientale
Polietilene	Sì					
Mater-Bi	Sì	=	<	<	>>	<
BASF Ecovio	Sì	=	<	=	>	
Cellulosa	No	<	>>	<<	>>>	<
Pacciami Naturali	No			<<	>>>	<<<
Polimeri Spray	No	=		<	>>	

Legenda: rispetto al polietilene, < indica che la voce è minore, > indica che la voce è maggiore, = indica che la voce è uguale. Il verde indica un vantaggio, l'arancione indica uno svantaggio, il giallo una parità, il grigio la mancanza di studi a riguardo.

Le altre soluzioni di pacciamatura che si sono analizzate attualmente non sono utilizzate su larga scala.

Dagli studi analizzati, la pacciamatura in cellulosa non è sufficientemente performante e conveniente per essere una valida alternativa ai film plastici.

L'utilizzo di spray polimerici biodegradabili è in fase di ricerca: potenzialmente potrebbero avere una resa maggiore e un costo inferiore ai classici film polimerici. Tuttavia le formulazioni sono in via di sviluppo e non è possibile fare previsioni o giungere a conclusioni definitive.

Per quanto riguarda la pacciamatura con materiali naturali, essa viene praticata da sempre ed una volta era l'unica possibile forma di pacciamatura. Negli ultimi decenni essa è stata gradualmente soppiantata dalla plasticoltura, in quanto più pratica e performante.

Tuttavia, grazie allo sviluppo delle conoscenze e delle tecniche agrarie si potrebbe rivalutare la sostituzione dei film di pacciamatura con materiali naturali che, oltre a creare il giusto microclima per la coltivazione,

migliorino anche la fertilità del suolo biodegradandosi e rilasciando nutrienti e sostanze fertilizzanti, il tutto a impatto zero.

Il progresso di tali tecniche potrebbe dar luogo ad un'economia circolare a kilometro zero nel quale i residui di aziende agricole e industrie agroalimentari vengono riutilizzate nei campi limitrofi come pacciamatura.

2.4.1 Pacciamatura della fragola

Ora che è stata verificata genericamente la validità del Mater-Bi quale materiale alternativo al polietilene, sia a livello economico che ambientale, si conclude questo studio sulle pacciamature verificandone l'applicazione nella coltivazione delle fragole.

In Europa, la Spagna detiene il primato di produzione della fragola, seguita da Polonia e Italia. In Emilia-Romagna la fragola è la casistica principale di impiego della pacciamatura e per tale motivo è la coltura di riferimento per il progetto STEP a cui questo studio fa riferimento.

Le numerose varietà coltivate si classificano in:

- unifere: anche dette brevidiurne o non rifiorenti, fruttificano in abbondanza per 2-3 settimane l'anno durante la primavera (aprile-giugno)
- bifere: anche dette longidiurne o rifiorenti, fruttificano fino alle prime gelate invernali (settembre-ottobre)
- fotoindifferenti: possono crescere e fruttificare in qualsiasi periodo dell'anno, purché la temperatura sia stabile e superiore ai 10°C

La coltivazione della fragola prevede l'utilizzo della pacciamatura generalmente nera con disposizione delle piante in file doppie o singole, su letti rialzati stretti e alti (probe baulate) con distanze dei fori variabili tra 25 e 40 cm tra le file e 20-35 cm nella stessa fila. Le piante vengono travasate nelle file pacciamate tra settembre e ottobre.

Figura 15. Pacciamatura della fragola con teli in Mater-Bi. (Novamont, 2013)



Sono stati individuati due studi sul confronto tra polietilene e Mater-Bi per la pacciamatura della fragola:

Tabella 30. Riepilogo degli studi sulla pacciamatura delle fragole con polietilene e Mater-Bi

Studio	Coltivazione Luogo	Pacciamatura	Resa
Novamont (2013). Coltura della fragola con telo di pacciamatura biodegradabile in suolo. Recuperato il 15 Settembre 2021 dal sito Materbi.com	Fragole Unifere Sotto Tunnel Campania	Mater-Bi Nero 18 µm PE Nero 50 µm	Produzione commerciale maggiore e migliore qualità complessiva per il Mater-Bi.
	Fragole Unifere Sotto Tunnel Emilia-Romagna		Produzione commerciale maggiore per il Mater-Bi, stessa qualità complessiva.
	Fragole Unifere Sotto Tunnel Andalusia (Spagna)		Produzione commerciale minore per il Mater-Bi, stessa qualità complessiva.
Morra, L.; Bilotto, M.; Leone, V.; Coppola, R.; Pasquariello, M.; Cerrato, D.; Petriccione, M.; Cozzolino, E.; (2015). Film biodegradabile in Mater-bi per la pacciamatura della fragola: effetti su sviluppo delle piante, resa e qualità dei frutti. <i>Unità di ricerca di Caserta</i> . doi:10.13140/RG.2.1.2148.5205	Fragole Unifere Sotto Tunnel Campania	Mater-Bi Nero 18 µm PE Nero 50 µm	La produzione è stata analoga per i due tipi di pacciamatura. Sono stati misurati contenuti di polifenoli, flavonoidi ed antociani totali più elevati nei frutti allevati sul Mater Bi

Resa

Il film in Mater-Bi ha mantenuto una sufficiente resistenza meccanica e copertura del suolo per i 9 mesi richiesti, durante le quali il controllo malerbe e il riscaldamento terreno sono stati garantiti. I livelli produttivi conseguiti, seppur variabili per coltivazioni e luoghi distinti, denotano una sostanziale equivalenza. Le caratteristiche chimico-fisiche delle coltivazioni di fragola analizzate sono circa equivalenti sia per polietilene che per Mater-Bi. Si evidenzia invece un maggior accumulo di composti antiossidanti per le fragole coltivate sul Mater-Bi. Oltre ad essere una valida motivazione per il passaggio ai film biodegradabili in Mater-Bi, esso potrebbe essere anche un fattore di valorizzazione economica delle fragole prodotte in questo modo.

Costi

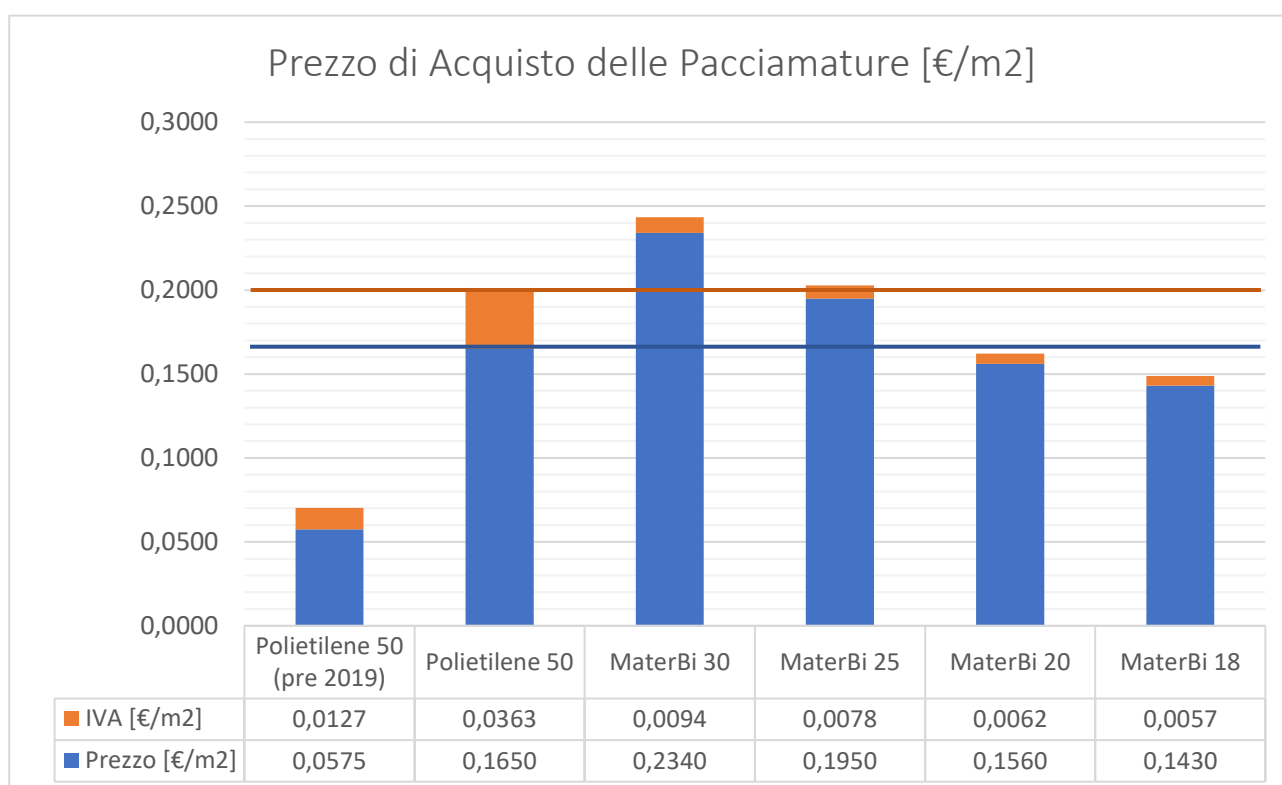
Per la coltivazione di fragole unifere sotto tunnel si utilizzano film in polietilene e di spessore 50 µm, mentre la Novamont consiglia l'utilizzo di un telo in MATER-BI di colore nero con spessore 18 o 20µm, che può assicurare la copertura del suolo con buone performance per un ciclo di 9-10 mesi. La coltivazione in campo aperto richiede invece uno spessore maggiore (25-30 µm). Non si hanno riscontri di varietà bifere o fotoindifferenti coltivate su Mater-Bi.

Visto la necessità di uno spessore maggiore, la resa superficiale per kilogrammo di materiale si riduce, e quindi aumenta anche il prezzo. Riportiamo qui di seguito i prezzi di acquisto.

Tabella 31. Calcolo dei prezzi di acquisto per i teli di pacciamatura della fragola.

	Polietilene 50 (2019)	Polietilene 50	MaterBi 30	MaterBi 25	MaterBi 20	MaterBi 18
Peso specifico [kg/m ²]	0.0500	0.0500	0.036	0.03	0.024	0.022
Prezzo [€/kg]	1.15	3.3	6.5	6.5	6.5	6.5
Prezzo [€/m²]	0.0575	0.1650	0.2340	0.1950	0.1560	0.1430
Iva [%]	22	22	4	4	4	4
Prezzo (IVA Inclusa) [€/m²]	0.0702	0.2013	0.2434	0.2028	0.1622	0.1487

Figura 16. Visualizzazione dei prezzi di acquisto per i teli di pacciamatura della fragola.



Nella coltivazione sotto tunnel, sia il MaterBi 18 che il MaterBi 20 risultano più convenienti rispetto al Polietilene 50, mentre per la coltivazione in campo aperto il MaterBi 25 risulta al pari del Polietilene 50, mentre il MaterBi 30 lo supera di un 25%. Tuttavia l'incremento del prezzo di acquisto potrebbe essere compensato dalla riduzione dei costi di rimozione e dal miglioramento delle proprietà del prodotto finale.

In ogni caso si consiglia sempre di utilizzare il film più sottile possibile, in un'ottica di riduzione dei costi e dell'impatto ambientale complessivo.

Se in un prossimo futuro i prezzi dei due materiali di pacciamatura dovessero nuovamente variare, sarà semplice verificare nuovamente la convenienza economica di uno rispetto all'altro.

3 – Favorire il riciclo e il riuso delle reti antigrandine e antinsetto

Per quanto riguarda le reti antigrandine e antinsetto, la plastica convenzionale copre ancora un ruolo fondamentale e difficilmente sostituibile in quanto possiede caratteristiche prestazionali elevate (resistenza a urti e deformazione), durata e resistenza idonee all'esposizione climatica. Combinate con la facilità di lavorazione e il basso costo rispetto ad altri materiali, la rendono l'unica soluzione attualmente viabile.

Per ridurre l'impatto della plastica in questa applicazione l'unica soluzione è definire un sistema di gestione a fine vita delle reti antigrandine e antinsetto al fine di favorirne il riuso e riciclo, a scapito di termovalorizzazione e discarica, secondo i principi dell'economia circolare.

3.1 Introduzione alle reti antigrandine e antinsetto

Dal punto di vista della sicurezza alimentare, le reti di plastica, in particolare quelle in grado di proteggere le piante da insetti, grandine e vento, sono fondamentali per la disponibilità di prodotti agricoli, la cui domanda aumenterà costantemente nel tempo a causa della crescita della popolazione mondiale (Vidogbéna, et al., 2015).

Ci sono innumerevoli benefici agricoli attribuiti all'applicazione di reti di plastica, come la diminuzione della presenza di parassiti e insetti e una conseguente riduzione dell'utilizzo di pesticidi (Yang, et al., 2018). Oltre al controllo dei parassiti, le reti di protezione riducono l'esposizione delle piante a condizioni climatiche estreme come l'eccessiva temperatura ed esposizione solare nei tropici, grazie alle proprietà fotoselettive uniche che influenzano il microclima (Al-Helal & Abdel-Ghany, 2010). Grazie al progresso tecnologico, le proprietà dei materiali delle reti sono migliorate nel tempo. Ne è un esempio lo sviluppo di nuove reti di nanofibre polimeriche tridimensionali realizzate tramite tecniche di fabbricazione controllabili quali l'elettrofilatura (Electrospinning) e l'elettromagliatura (Electronetting), che migliora le proprietà meccaniche e modifica la porosità del materiale (Zhang, Liu, Tang, Yu, & Ding, 2019) (Wang, Ding, Sun, Wang, & Yu, 2013).

L'eliminazione dell'uso delle reti di plastica nelle aziende agricole, secondo considerazioni di carattere ambientale, potrebbe quindi comportare degli svantaggi, quali ad esempio un aumento dell'utilizzo di pesticidi, una diminuzione della resa delle piante, un incremento dei danni dovuti a condizioni atmosferiche estreme e insetti.

Reti antigrandine

La prima applicazione delle reti in campo agricolo era nella produzione di piante da frutto, come albicocche, uva, mele, e piante ornamentali. Le reti erano trasparenti, chiare o scure e servivano a prevenire i danni causati da grandine e vento. (Briassoulis, Mistrionis, & Eleftherakis, 2007).

Figura 17. Impianto antigrandine nero per un frutteto di albicocche nei pressi di Faenza.



Tale tipologia di rete, detta antigrandine, è costituita da trame fini, tollera grandine e piogge torrenziali e protegge dai raggi ultravioletti (UV). In generale, le reti di colore nero durano circa 15 anni mentre le reti di colore bianco durano 10 anni (Amarante, Steffens, Miqueloto, Zanardi, & Pessoa dos Santos, 2009). Queste reti sono per lo più utilizzate in campo aperto, in particolare su alberi da frutto dove viene costruita una grande struttura su numerosi alberi, o viene applicata una rete su ogni singolo albero (Castellano, et al., Plastic nets in agriculture: A general review of types and applications, 2008).

Il fattore di ombreggiatura di una rete influisce sulla fisiologia dell'albero e sulla qualità dei suoi frutti, mentre il colore di una rete è fondamentale per ottenere prestazioni ottimali del raccolto in base al fabbisogno di radiazioni solari (Manja & Aoun, 2019).

Inoltre le tempeste di grandine si verificano principalmente in estate, stagione in cui l'esposizione solare è al suo picco e potrebbe a sua volta causare danni alle coltivazioni sensibili all'eccesso di temperatura e radiazione solare.

Per questi motivi, di seguito si sovrapporrà il concetto delle reti antigrandine con quello delle reti di ombreggiatura.

Reti antinsetto

A partire dalla metà del XX secolo, si è diffusa la pratica di installare reti di esclusione per proteggere le colture dai parassiti e il loro uso è diventato ancora più comune a partire dagli anni '90 (Chouinard, Firlej, & Cormier, 2016). Le reti sono costituite da fili trasparenti intrecciati in maglie di piccole dimensioni (da 1 a 7 mm di larghezza) e il loro scopo è proteggere dagli insetti (Briassoulis, Mistriotis, & Eleftherakis, Mechanical behaviour and properties of agricultural nets. Part II: Analysis of the performance of the main categories of agricultural nets, 2007). Sono utilizzati dai coltivatori come alternativa ecologica ai pesticidi, soprattutto nell'agricoltura biologica (Castellano, et al., Plastic nets in agriculture: A general review of types and applications, 2008).

La dimensione delle maglie è funzione della tipologia di insetti che si vuole escludere.

Le reti antinsetto impediscono o minimizzano l'entrata degli insetti causando nel tempo una progressiva riduzione delle popolazioni nel frutteto. Gli accoppiamenti degli insetti presenti sotto rete vengono fortemente ridotti o azzerati. Ciò probabilmente avviene a causa dell'effetto disturbo esercitato sugli insetti durante la fase di corteggiamento, nonché a causa della variazione dei parametri microclimatici. Questi fenomeni sono tutt'ora oggetto di studio. (Vernani & Caruso, 2014)

I diversi sistemi di esclusione sono classificati come completi o incompleti.

- Sistemi incompleti: il terreno non è esentato dall'area recintata
 - Monofilare: consiste nella copertura delle singole file, appoggiando la rete su apposite strutture o direttamente sulla chioma dei frutteti (se sufficientemente resistenti). Non ostacola la percorrenza dei filari, ma interferisce con le operazioni sulla pianta. È più efficace nel contrastare i danni degli insetti.
 - Monoblocco: consiste nella copertura dell'intero appezzamento, andando ad integrare l'impianto antigrandine. Ostacola l'accesso ai filari, ma non interferisce con le operazioni sulla pianta. È leggermente meno efficace nel contrastare i danni degli insetti e potrebbe essere necessario l'uso (ridotto) di insetticidi.
- Sistemi completi: il suolo è esentato dall'area recintata, che in genere si chiude sul fusto dell'albero da frutto. Risultano più efficaci dei sistemi incompleti, ma le operazioni sulla pianta possono risultare più difficoltose.

Figura 18. A sinistra, un impianto antinsetto monofilare ad esclusione completa. A destra, un impianto antinsetto monoblocco.



Le reti anti insetto devono essere in grado di resistere agli agenti atmosferici senza lacerarsi, ponendo particolare attenzione al vento.

Svantaggi delle reti antinsetto

Si è dimostrato che l'installazione di reti antinsetto in determinate occasioni può avere un impatto negativo sulla fisiologia della pianta e sull'ecosistema della coltura.

Le reti antinsetto riducono la velocità dell'aria e di conseguenza anche il ricambio dell'atmosfera intorno alla pianta, riducendo il flusso di CO₂ che è fondamentale per l'attività fotosintetica. Inoltre, una riduzione del flusso d'aria può aumentare l'umidità e la temperatura, il che è dannoso per alcune tipologie di piante e per le coltivazioni in ambiente controllato (Yang, et al., 2018).

Inoltre, le reti antinsetto possono avere un impatto negativo sull'ecologia dei predatori naturali dei parassiti. Le reti possono inibire il movimento dei ragni e lo sviluppo delle ragnatele (Pajač Živković, Lemic, Samu, Kos, & Barić, 2019). Analogamente, le reti agricole limitano i movimenti degli uccelli e disturbano i loro ecosistemi, compresa la catena alimentare. I volatili in grado di sopprimere la crescita degli artropodi e la formazione delle larve di falena, quindi l'inserimento di reti di plastica anti-insetto può contribuire alla proliferazione di artropodi dannosi (Castellano, et al., Design and use criteria of netting systems for agricultural production in Italy, 2008).

Considerando che le reti di plastica non possono fornire una protezione assoluta contro gli insetti, gli agricoltori potrebbero essere ancora obbligati a usare pesticidi come misure complementari.

3.1.1 Proprietà richieste

L'utilità delle reti di plastica negli ambienti agricoli è principalmente influenzata dalla resistenza alla trazione, dalla resistenza allo snervamento, dalla porosità e dalla geometria della rete, che influenzano l'idoneità dei materiali per l'applicazione specifica. (Castellano, Russo, & Scarascia, 2006).

Le proprietà delle reti di plastica variano per tipo di applicazione.

Resistenza alla trazione e deformazione plastica

Le prove di trazione vengono eseguite per prevedere la durabilità delle reti di plastica determinando i loro comportamenti di tensione-deformazione, la resistenza allo snervamento, la fragilità e il limite di fatica.

I test vengono condotti sia nella direzione della trama che in quella dell'ordito, in quanto le caratteristiche meccaniche sono differenti.

I materiali che mostrano deformazione plastica e strizione sono più appropriati per le applicazioni agricole in luoghi a rischio meteorologico. Anche se l'ideale sarebbe avere una maggiore resistenza alla trazione, la porosità delle reti ed il diametro limitato richiesto dall'operazione di tessitura limitano la tensione massima di rottura (Maraveas, 2020).

Le reti di plastica con migliori proprietà meccaniche dovrebbero essere utilizzate dove la resistenza all'impatto è un criterio chiave.

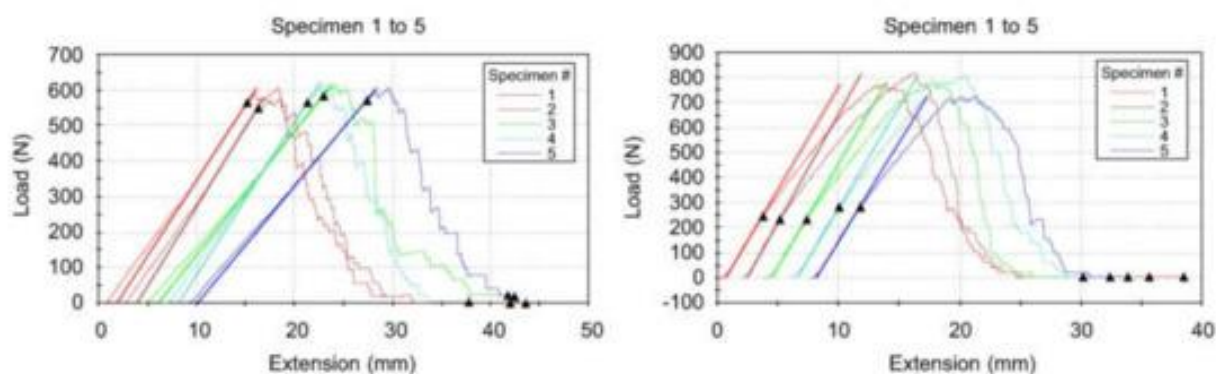
Reti antigrandine

Le reti antigrandine devono manifestare proprietà meccaniche appropriate, tra cui la deformazione plastica e l'allungamento. Tuttavia, affinché le reti di plastica resistano all'impatto della grandine, la rete deve avere

comportamento elastico lineare nella direzione della trama e non lineare nella direzione dell'ordito (Briassoulis, Mistriotis, & Eleftherakis, 2007).

La produzione di queste reti dovrebbe essere personalizzata in base alle applicazioni agricole e ai modelli meteorologici: le aziende a rischio di grandine dovrebbero essere dotate di reti con una maggiore resistenza agli urti.

Figura 19. Curve tensione-deformazione per reti antigrandine (tipo di plastica: FRU44). (Briassoulis, Mistriotis, & Eleftherakis, 2007)



Reti antinsetto

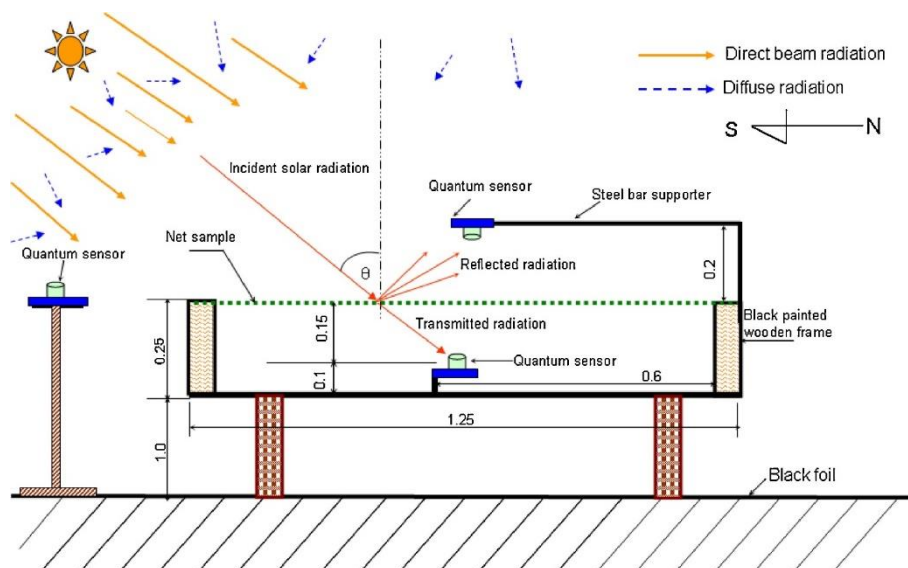
Le reti devono avere un'alta resistenza alla trazione e una gamma elastica lineare in entrambe le direzioni per resistere alla pressione del vento. Le reti di plastica disponibili in commercio presentano una maggiore resistenza alla trazione nella direzione dell'ordito e deformazione plastica nel punto di rottura in entrambe le direzioni (Briassoulis, Mistriotis, & Eleftherakis, 2007).

Altri parametri critici includono la porosità delle reti di plastica, che deve essere adattata per limitare la generazione di vortici d'aria, che sono dannosi per le piante fragili. L'impatto della rete sulla creazione di vortici può essere regolato nella fase di costruzione selezionando reti con opportuni coefficienti di pressione netta per i lati sottovento e sopravvento (Briassoulis & Mistriotis, 2010).

Trasmissività Spettrale

Le proprietà di trasmissività delle reti di plastica sono valutate utilizzando test radiometrici (Al-Helal & Abdel-Ghany, 2010). I test sono condotti utilizzando uno spettrofotometro le cui bande d'onda sono regolate per misurare la trasmissività spettrale. Le lunghezze d'onda di maggior interesse in campo agricolo sono l'infrarosso vicino (Near Infrared – NIR, 750 - 1400 nm), l'infrarosso lontano (Far Infrared – FIR, 15 μ m - 1000 μ m) e la radiazione fotosinteticamente attiva (Photosynthetically Active Radiation – PAR, 400 – 700 nm). Ulteriori misurazioni, quale la trasmissività spettrale perpendicolare, sono ottenute attraverso spettrofotometri UV-VIS-NIR, e spettrofotometri IR a trasformata di Fourier (Fourier transform infrared - FT-IR).

Figura 20. Schema del set-up sperimentale per misurare le diverse componenti della PAR globale: incidente (GP,i), trasmessa (GP,t) e riflessa (GP,r). (Al-Helal & Abdel-Ghany, 2010)



Le proprietà ottiche delle reti in plastica sono criteri essenziali per le reti utilizzate nelle applicazioni di ombreggiatura.

Le rese agricole delle piante possono essere migliorate attraverso reti che permettano il passaggio della luce di lunghezza d'onda compresa tra 400 e 700 nm (PAR), perché lunghezze d'onda più elevate sono dannose per la crescita delle piante. La gamma di radiazioni specifica del PAR influenza l'allungamento del fusto delle piante e la vegetazione di una pianta, nonché la dimensione dei frutti (Legarrea, Karnieli, Fereres, & Weintraub, 2010).

3.2 Identificazione dei materiali plastici utilizzati per realizzare reti antigrandine/ant insetto

Le reti di plastica utilizzate nelle coltivazioni protette possono potenzialmente essere fatte di polipropilene, materiali biodegradabili a base di amido, polietilene (PE), cloruro di polivinile e polietilene ad alta densità (HDPE) (Castellano, et al., 2019) (Mukherjee, Knoch, Chouinard, Tavares, & Dumont, 2019).

La scelta di un materiale al posto di un altro è influenzata dalla tipologia di applicazione, dal costo e dall'impatto ambientale.

Per esempio, la plastica biobased e biodegradabile è altamente desiderabile dal punto di vista della sostenibilità, in quanto producibile da risorse rinnovabili e degradabile nell'ambiente.

Dal punto di vista della durata, l'HDPE è particolarmente adatto perché è impermeabile all'acqua e ad altri liquidi, non è suscettibile ai raggi UV e può essere riciclato (Castellano, et al., Plastic nets in agriculture: A general review of types and applications, 2008).

L'HDPE ha inoltre un elevato modulo elastico che si avvicina ai limiti teorici (70 - 200 GPa) e un carico di rottura intorno ai 6 – 8 GPa (Briassoulis, Mistriotis, & Eleftherakis, 2007).

Le proprietà ideali del materiale, insieme alla sua bassa densità, lo rendono particolarmente adatto per applicazioni ad alta resistenza.

3.2.1 Uso di bioplastiche per le reti agricole

I biopolimeri, sia naturali (PHA, poliamminoacidi, cellulosa/amido, proteine) che sintetici (derivati di polisaccaridi - DS, poliidrossibutirrato - PHB, policaprolattone - PCL, PLA) sono stati ampiamente esplorati come alternativa per la realizzazione delle reti (Rudnik & Briassoulis, 2011) (Iwata, 2015).

Le bioplastiche non possiedono le proprietà meccaniche necessarie per le applicazioni agricole di questa tipologia e per questo devono essere miscelate con plastiche convenzionali. Tuttavia, il processo di miscelazione diminuisce contemporaneamente sia la riciclabilità che la biodegradabilità di questi materiali.

I biopolimeri hanno normalmente una durata limitata e in applicazioni quali le reti antinsetto i polimeri sono funzionali per un periodo di 4-6 anni, dopo di che necessitano di essere smaltiti (Mukherjee, Knoch, Chouinard, Tavares, & Dumont, 2019).

Anche se il polimero di base è biodegradabile, devono essere aggiunte altre sostanze per dare al materiale determinate caratteristiche, come sostanze plasticizzanti, sostanze stabilizzanti (es: nichel), indurenti, pigmenti e rivestimenti anti-UV. Questi additivi sono spesso dannosi per la salute umana e l'ambiente.

Sulla base di questi fatti, ci vorrà del tempo prima che le reti a base di HDPE possano essere sostituite da bioplastiche (Mukherjee, Knoch, Chouinard, Tavares, & Dumont, 2019).

3.2.2 Analisi delle reti commercialmente disponibili

Dall'analisi dei cataloghi dei principali produttori di reti protettive (tabella 32), sono emerse le seguenti considerazioni:

- Tutte le reti risultano realizzate in HDPE additivato con anti-UV.

- La principale differenza tra reti antinsetto e reti antigrandine risiede nella grandezza di maglia, che per l'antinsetto è molto più fine.
- Alcune reti antinsetto possono essere utilizzate anche come antigrandine.
- Sia le reti antigrandine che quelle antinsetto sono disponibili in varie colorazioni. Le reti nere hanno un maggior effetto ombreggiante e una maggior durata nel tempo. Le reti bianche e trasparenti permettono una maggiore attività fotosintetica, ma hanno una durata inferiore.

Tabella 32. Elenco di fornitori di reti antigrandine/antinsetto e dei relativi materiali impiegati.

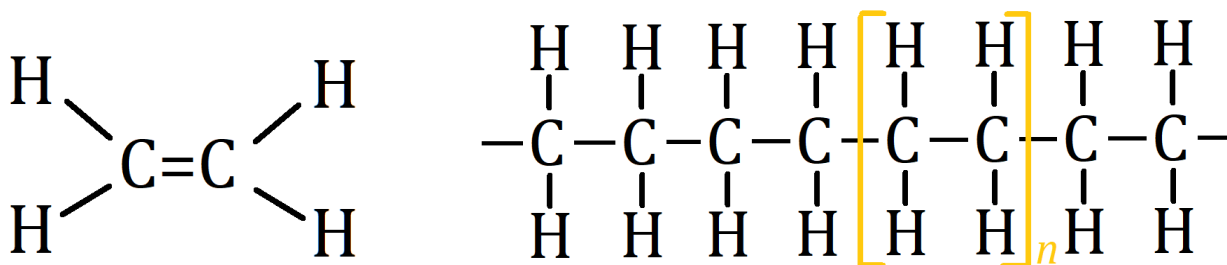
Fornitore	Sito Web	Tipologia	Materiale
Romagna Impianti	https://www.romagnaimpianti.net/	Grandine	HDPE
Retificio Padano	https://www.padano.it/	Grandine, Insetti	HDPE
Corradi Protection Systems S.r.l.	https://www.corradiimpianti.com/	Grandine, Insetti	HDPE
Arrigoni S.p.A.	https://www.arrigoni.it/	Grandine, Insetti	HDPE
Helios Group S.r.l.	http://www.helios-italia.eu/	Grandine, Insetti	HDPE
Ribola Retificio S.r.l.	https://www.retificioribola.com/	Grandine	HDPE
Carretta Tessitura S.r.l.	https://www.carrettatessitura.com/	Grandine, Insetti	HDPE
AGRINOVA II S.r.l.	https://agrinova-srl.net/	Grandine, Insetti	HDPE
Artes Politecnica S.r.l.	https://www.artespolitecnica.it/	Grandine, Insetti	HDPE
Agrotecnologie S.r.l.s.	https://www.agrotecnologie.it/	Grandine	HDPE
AGRINTECH S.r.l.	https://www.agrintech.it/	Grandine, Insetti	HDPE
Tesrete S.r.l.	https://www.tesrete.com/	Grandine, Insetti	HDPE

3.2.3 Proprietà del HDPE

Il polietilene ad alta densità (HDPE – High Density Polyethylene) è un polimero termoplastico prodotto per addizione o polimerizzazione radicalica di monomeri di etilene.

L'etilene o etene (nomenclatura IUPAC) è un idrocarburo di formula C_2H_4 . È l'olefina o alchene più semplice (un idrocarburo con doppi legami carbonio-carbonio). In condizioni ambientali è un gas infiammabile incolore.

Figura 21. A sinistra una rappresentazione dell'etilene. A destra la sua polimerizzazione in polietilene.



Per la polimerizzazione del polietilene si utilizzano catalizzatori Ziegler-Natta o Metallocene. La polimerizzazione può avvenire in sospensione in fase liquida, o in fase gassosa. (Polyethylene (PE) plastic: Properties, uses & application, s.d.).

Le catene alchiliche lineari che compongono la base del PE mancano di gruppi funzionali polari e sono inerti a molte reazioni chimiche, inclusi acidi e basi comuni, in condizioni standard.

Proprietà del HDPE (Polyethylene (PE) plastic: Properties, uses & application, s.d.)

- Temperatura di fusione: 136 – 135 °C
- Densità: 0.955 – 0.961 g/cm³
- Proprietà meccaniche (a 23°C)
 - Tensione di snervamento: 23.0 – 29.5 MPa
 - Tensione di rottura: 30.5 – 33 MPa
 - Modulo di Young: 900 – 1550 Mpa
 - Prova d'impatto Izod: 71 – 159 J/m

Queste proprietà durevoli lo rendono perfetto per contenitori pesanti e l'HDPE viene utilizzato principalmente per contenitori per latte e alimenti, bottiglie di shampoo, candeggina, olio motore e altri fluidi, in quanto l'HDPE non assorbe facilmente i liquidi. Quasi un terzo (circa otto milioni di tonnellate) dell'HDPE prodotto nel mondo viene utilizzato per questi tipi di contenitori. (AZO Cleantech, 2012)

Inoltre, l'HDPE è un materiale estremamente resistente a molti prodotti chimici, da qui il suo uso diffuso in ambienti sanitari e di laboratorio. È resistente a molti acidi, alcoli, aldeidi, esteri, basi e oli.

La scelta del polietilene ad alta densità come materiale per le reti è dovuta al suo basso costo, alla facile processabilità e alla maggiore resistenza alla trazione rispetto ad altre forme di polietilene.

L'HDPE è suscettibile ai raggi UV e al calore. Per ridurre l'invecchiamento per esposizione alle condizioni climatiche, è necessario additarlo con carbon black o altri stabilizzanti UV.

3.2.4 Fenomeni degradativi e stabilizzanti

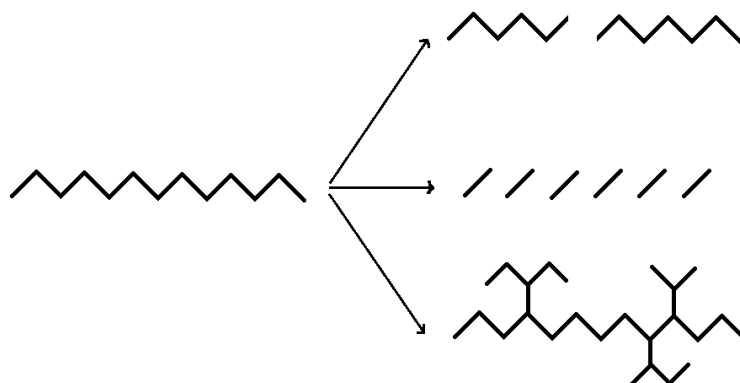
I polimeri, esposti alle condizioni ambientali e ai fenomeni atmosferici, tendono inevitabilmente a degradarsi. Il processo di degradazione consiste in fenomeni chimici irreversibili che avvengono a livello molecolare e cambiano la struttura del polimero.

La degradazione avviene ad opera di vari agenti chimico-fisici, che agendo in maniera sinergica alterano e degradano le proprietà del polimero. Questi fenomeni degradativi avvengono sia in fase di lavorazione, che durante la vita del manufatto.

Gli effetti principali sono:

- Rottura delle catene polimeriche
- Riduzione a monomeri o depolimerizzazione
- Reticolazione o crosslinking

Figura 22. Rottura, riduzione a monomeri e reticolazione di una catena polimerica.



I comuni processi di degradazione dei polimeri includono ossidazione, danni da UV, degradazione termica, ozonolisi, loro combinazioni come fotoossidazione, nonché reazioni con residui di catalizzatore, coloranti o impurezze. (Singh & Sharma, 2008)

In generale tutti i materiali polimerici per poter essere utilizzati devono essere protetti dalla termo e foto ossidazione mediante composti a basso peso molecolare (additivi essenziali) che inibiscono o ritardano il processo di ossidazione.

Gli stabilizzanti vengono utilizzati in tutte le fasi del ciclo di vita del polimero. Consentono di produrre oggetti in plastica più velocemente e con meno difetti, prolungano la loro vita utile e facilitano il loro riciclaggio. Gli additivi necessari variano in base alla suscettibilità del polimero ai vari fenomeni degradativi e all'applicazione finale.

Nel processo di riciclaggio è fondamentale conoscere lo stato di degradazione del materiale e la quantità di additivi ancora presenti nel polimero, in modo tale da poter stabilire a priori le caratteristiche del materiale riciclato e la quantità di additivi che è necessario riadditivare.

Le principali cause di degradazione del polietilene sono l'alta temperatura, l'ossigeno e le radiazioni UV.

Degradazione termica

L'aumento della temperatura amplifica le vibrazioni intramolecolari e accelera i cambiamenti conformazionali delle macromolecole. I legami chimici intracatena che sono sufficientemente sollecitati da questi moti si dissociano dando origine ai frammenti con terminali radicali. (Vohlídal, 2021)

Il peso molecolare diminuisce drasticamente e le proprietà meccaniche possono ridursi anche del 90%, perché il dimezzamento di una catena polimerica causa un calo della viscosità intrinseca intorno al 90%. La viscosità intrinseca (Intrinsic Viscosity - IV) è una misura del peso molecolare dei polimeri e quindi riflette il punto di fusione, la cristallinità e la resistenza alla trazione del materiale.

La valutazione della suscettibilità dei materiali polimerici alla degradazione ad alta temperatura avviene attraverso l'analisi termogravimetrica (TGA). Due sono le tipologie di prove:

- Prova di stabilità termica statica (forno Malthis): consente di testare la resistenza ad alta temperatura. Provini di lunghezza fissata vengono sottoposti ad invecchiamento termico a 190°C. Il provino viene fissato ad un carrello che si muove a velocità costante (2.5 mm al minuto), in modo tale che fuoriesca lentamente dalla sorgente di calore.
- Invecchiamento termico accelerato in camera climatica.

Degradazione fotochimica

A seconda dell'energia posseduta dal fotone, la radiazione luminosa può eccitare elettronicamente e quindi rendere reattivi alcuni gruppi nel polimero (luce, UV) o dissociare alcuni suoi legami con i radicali (UV). La radiazione ultravioletta possiede un'energia compresa tra i 140 e i 75 kcal/mole, sufficiente a causare la rottura dei legami chimici nella maggior parte dei polimeri.

A seconda della struttura del polimero e delle condizioni ambientali, le specie fotogenerate depolimerizzano e/o entrano in varie reazioni successive con conseguente scissione o reticolazione o modifica delle catene polimeriche. Quando il processo avviene nell'aria, l'iniziazione fotochimica è seguita dall'ossidazione del polimero (di cui si parlerà sotto) in un processo complessivamente chiamato degradazione fotossidativa.

I legami che si scindono sono diversi rispetto alla degradazione termica. Degradazione fotochimica e degradazione termica sono sinergiche.

Le degradazioni termiche e chimiche promosse dalle radiazioni infrarosse e dalle microonde non sono considerate degradazioni fotochimiche, ma degradazioni assistite dalle radiazioni.

Allo scopo di ridurre la degradazione fotochimica si utilizzano appositi foto-stabilizzanti che si dividono in assorbitori UV, disattivatori (quencher) di stati eccitati e HALS.

Degradazione mecanochimica

Le sollecitazioni meccaniche possono essere causa di formazione di frammenti radicalici, in particolare per elevati sforzi di taglio applicati a catene polimeriche lineari con alto peso molecolare.

Il riciclo meccanico causa quindi un peggioramento delle caratteristiche del polimero.

Degradazione ossidativa

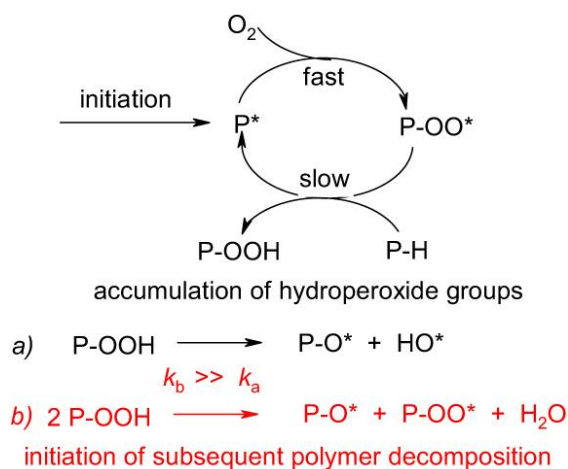
La degradazione ossidativa è la reazione a catena dei radicali ramificati ed è causa della corrosione dei polimeri esposti all'aria.

La degradazione aerobica avviene gradualmente a temperatura ambiente, ma quasi tutti i polimeri sono a rischio di ossidazione termica quando vengono lavorati ad alte temperature, come l'injection molding o lo stampaggio, che richiedono temperature superiori al punto di fusione o di transizione vetrosa (~200-300° C).

L'ossigeno reagisce con i radicali, dando il via a una reazione a catena in quanto per ogni molecola di ossigeno che reagisce con il polimero, si generano due radicali. La degradazione inizia molto lentamente, per poi aumentare in maniera esponenziale.

Una tipica degradazione ossidativa mostra un periodo di induzione di lunga durata in cui i gruppi laterali idroperossilici si formano e si accumulano gradualmente nel polimero. I gruppi -OOH contribuiscono solo in modo trascurabile all'ossidazione in questa fase di reazione, poiché la costante di velocità del primo ordine della loro dissociazione è molto bassa (Ingold, 1969). Tuttavia, se la concentrazione dei gruppi -OOH aumenta sufficientemente, inizia la loro decomposizione bimolecolare più efficiente dal punto di vista energetico. Ciò accelera fortemente la velocità di degradazione complessiva e, di conseguenza, il polimero perde rapidamente le sue proprietà originali. Pertanto, di solito non si può vedere quasi nessun cambiamento nella qualità del polimero per alcuni o molti anni e quindi una rapida diminuzione della qualità entro poche settimane o mesi. (Vohlídal, 2021)

Figura 23. Formazione e reazione dei gruppi idroperossilici in una catena polimerica. (Vohlídal, 2021)



Per ridurre il problema il polimero viene additivato con sostanze antiossidanti che si ossidano (degradandosi) al posto del polimero.

Gli antiossidanti sono spesso indicati come primari o secondari a seconda del loro meccanismo d'azione.

Gli antiossidanti primari agiscono rimuovendo i radicali perossidici ($\text{ROO}\bullet$), nonché, in misura minore, i radicali alcossilici ($\text{RO}\bullet$), i radicali idrossilici ($\text{HO}\bullet$) e i radicali alchilici ($\text{R}\bullet$). Tra di essi abbiamo:

- Fenoli stericamente impediti (hindered phenols), quali il butilidrossitoluene (BHT).
- Ammine aromatiche secondarie, come le difelammine alchilate.
- Composti amminici quali gli HALS (Hindered amine light stabilizers), che oltre come foto-stabilizzanti sono sempre più utilizzati come stabilizzanti termici.

Gli antiossidanti secondari agiscono per rimuovere gli idroperossidi organici (ROOH). In genere sono esteri fosfitici, spesso fenoli stericamente impediti.

I fosfiti sono talvolta considerati antiossidanti multifunzionali in quanto possono combinare entrambi i tipi di attività.

Gli antiossidanti generalmente sono additivi molto costosi e quindi se ne aggiunge la minima quantità indispensabile (tra lo 0,2 e l'1% in peso).

La misurazione del grado di ossidazione avviene mediante la rilevazione dell'indice di carbonile (C=O), ovvero il rapporto tra l'ampiezza del picco spettrometrico del gruppo carbonile ed il picco spettrometrico del polimero di partenza.

3.2 Caratterizzazione delle reti dismesse: quantità e qualità

Allo scopo di definire un opportuno sistema di gestione delle reti dismesse, si è reso innanzitutto necessario comprendere il quadro normativo in cui si inseriscono. Quindi si è stimata la quantità di materiale disponibile, la sua facilità di raccolta e lo stato di contaminazione.

3.2.1 Quadro Normativo

Le reti antigrandine e antinsetto rientrano tra i rifiuti speciali agricoli non pericolosi, sotto il codice CER 020104: “rifiuti plastici (ad esclusione degli imballaggi)”. Come specificato precedentemente, questa tipologia di rifiuti speciali possono essere smaltiti attraverso il servizio pubblico, se esiste una specifica convenzione, o attraverso il conferimento a ditte autorizzate allo smaltimento.

Secondo normativa, le reti antigrandine e antinsetto potrebbero essere quindi conferite direttamente presso i centri di raccolta oppure ritirate in loco dagli automezzi del servizio pubblico di gestione dei rifiuti.

3.2.2 Quantitativi disponibili

Per la copertura di un ettaro di frutteti è necessario all'incirca una superficie equivalente di rete antigrandine, quindi all'incirca 10000m².

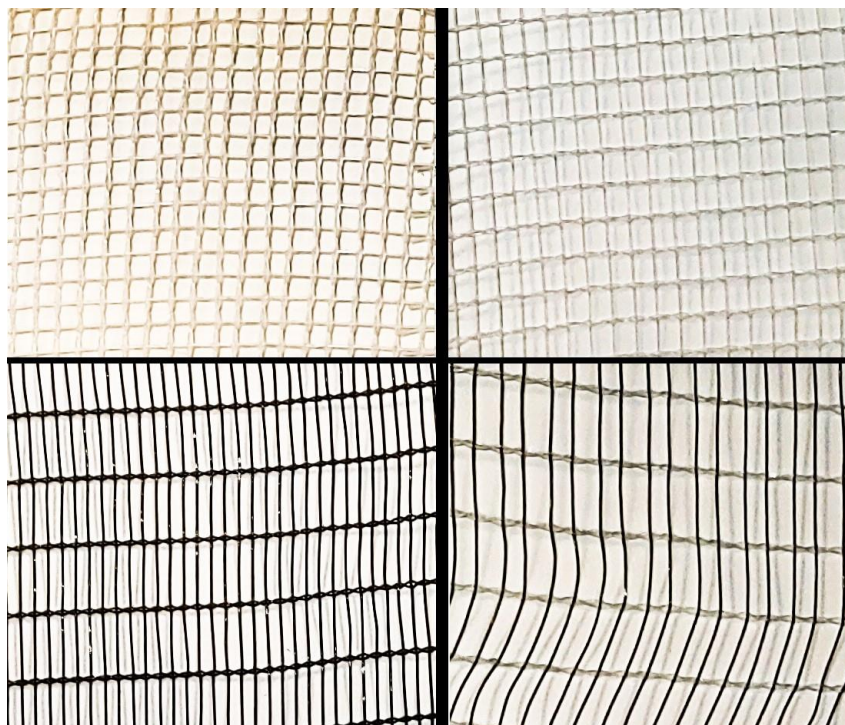
Figura 24. Vista dall'alto di un impianto antigrandine di svariati ettari nei pressi di Faenza.



Gli impianti antinsetto richiedono la copertura di una superficie maggiore a parità di ettaro, in quanto è necessaria la protezione laterale delle piante, spesso fino al suolo. Considerando un frutteto quadrato di lato 100m (superficie totale 1 ha) e di altezza 3 metri (altezza massima degli impianti), oltre alla parte superiore di 10000m² è richiesta la copertura dei quattro lati, quindi $4 \times 100\text{m} \times 3\text{m} = 1200\text{m}^2$, per un totale di 11200m² di rete. Nel caso della copertura di sistemi monofilare composto da 33 file distanti 3 metri, alte 3 metri e lunghe 100m (per un totale di 1 ha di frutteto), sono necessari $33 \times 2 \times 3\text{m} \times 100\text{m} = 19800\text{m}^2$ di rete.

Le reti antinsetto sono caratterizzate da una maglia più stretta rispetto alle reti antigrandine e conseguentemente hanno una grammatura maggiore.

Figura 25. Comparazione della dimensione di maglia per due reti antinsetto (a sinistra) e due reti antigrandine (a destra).



Moltiplicando la superficie di copertura richiesta per la grammatura delle reti, è possibile ottenere la massa di polietilene richiesta per la protezione di un ettaro di frutteto.

Tabella 33. Calcolo della quantità di rete richiesta per un impianto antigrandine o antinsetto di un ettaro.

	Antigrandine	Antinsetto	
		Monoblocco	Monofila
Dimensione Maglie [mm]	7 x 3	4 x 4	
Grammatura [gr/m²]	40 – 52	55 – 70	
Grammatura media [gr/m²]	48	60	
Superficie Richiesta [m²/ha]	10000	11200	19800
Quantità Richiesta [kg/ha]	480	672	1188

Nota: le reti antinsetto per drosophila e afidi, con maglie molto più strette, arrivano a 100-150gr/m²

Dal colloquio con alcuni produttori agricoli, risulta che per ogni ettaro di frutteto si utilizzino 4-6 quintali di reti antigrandine o 6-8 quintali di reti antinsetto. Si possono quindi ritenere verosimili i dati ottenuti.

Figura 26. Cumuli di reti antigrandine dismessa nera-verde di 15 anni (sinistra) e bianca di 10 anni (destra).



Nel 2017 in Emilia-Romagna la superficie destinata alle colture arboree era all'incirca di 58 mila ettari (24emilia.com, 2018), mentre nel 2021 la superficie coltivata a frutteti risulta essere di circa 48 mila ettari (Corriere Ortofrutticolo, 2021). Il calo delle superfici coltivate è stato parzialmente compensato dall'aumento della produttività, grazie anche all'impiego delle reti di protezione.

Attualmente non è conosciuta con precisione la quantità di ettari di frutteti protetti con reti, così come non è chiara la distribuzione delle tipologie di reti impiegate. Si stima tuttavia che il 30% di questi frutteti siano protetti da reti e che di questi impianti almeno un 50% sia di tipo antigrandine. Molti di questi impianti sono stati installati negli ultimi anni grazie anche agli incentivi regionali.

Tabella 34. Stima della quantità di reti antigrandine e antinsetto presenti nella regione Emilia-Romagna

	Emilia-Romagna		
Totale Frutteti [ha]	48000		
Percentuale Impianti [%]	30%		
Totale Impianti [ha]	14.400		
	↓	↓	↓
	Antigrandine	Antinsetto Monoblocco	Antinsetto Monofilare
Distribuzione Impianti [%]	70%	10%	20%
Totale Impianti [ha]	8.640	1.440	2.880
Quantità Richiesta [kg/ha]	480	672	1.188
Totale per Tipologia [kg]	4.147.200	967.680	2.708.640
Totale Complessivo [kg]	7.823.520		

Il colore della rete è dato dalla tipologia di additivi utilizzati. Incide sulle sue proprietà ombreggianti e sulla sua durata. Le reti più chiare presentano una minore quantità di additivi, favoriscono la colorazione dei frutti ma hanno una durata inferiore (5 – 10 anni). Le reti più scure vengono additivate con carbon black, che ne aumenta la durata nel tempo (10 – 20 anni) e ne aumenta le proprietà ombreggianti e antiscottatura. Le reti grigie hanno un grado di additivazione, durata (15 – 10 anni) e proprietà intermedie, mentre le reti di altri colori variano principalmente per proprietà ottiche.

Tabella 35. Colori delle reti antigrandine e antinsetto, relative proprietà.

Colore	Utilizzo	Additivi	Durata (anni)
Bianco	Miglior colorazione dei frutti	Antiossidanti, Stabilizzanti	5
Grigio	Proprietà intermedie	... e Carbon Black	10
Nero	Ombreggiamento, antiscottatura	... e Carbon Black	15

Le reti antigrandine generalmente sono di colore grigio/nero, mentre le reti antinsetto in genere sono di colore bianco. La vita media di una rete si attesta quindi intorno ai 10 anni.

Gli impianti attualmente presenti verosimilmente sono stati installati in maniera scaglionata nel tempo. Data la vita media delle reti, si può quindi supporre che ogni anno 1/10 di esse venga dismessa, per un totale di **782 tonnellate di polietilene ogni anno** per la regione Emilia-Romagna.

L'impiego di reti di protezione è in un trend di crescita e potrebbe raggiungere un livello di impiego più elevato del 30%, in quanto unica soluzione efficace contro grandinate frequenti e insetti esotici altamente dannosi per le colture (Crivelli, et al., 2017). Inoltre si potrebbe assistere ad una maggiore diffusione degli impianti antinsetto, che richiedendo una maggiore quantità di rete ed avendo una vita più corta, incrementerebbero ulteriormente il materiale da smaltire ogni anno.

3.2.3 Facilità di raccolta

Le reti rimosse dai frutteti vengono generalmente avvolte in balle in modo da facilitarne il trasporto e lo stoccaggio in loco. Possono essere caricate facilmente su un autocarro dotato di gru.

Figura 27. Stoccaggio delle reti dismesse: a sinistra un singolo involto di una rete antigrandine, a destra un cumulo di involti, in attesa di essere prelevati per lo smaltimento. Foto scattate nei pressi di Faenza.



3.2.4 Contaminanti

Da una prima analisi delle reti dismesse e stoccate si è notato subito un basso grado di contaminazione, come osservabile nelle foto sottostanti. Visivamente i contaminanti più voluminosi sono costituiti da sfalci di rami, seguiti da foglie.

Figura 28. Foto dei contaminanti presenti nelle reti antigrandine e antinsetto rimosse da due frutteti a Faenza, 2021



Sì è quindi prelevato un campione di rete di circa 1300gr particolarmente sporco e avendo cura di non muoverlo bruscamente, lo si è deposto su una superficie piana, si sono rimossi i contaminanti più evidenti e sì è proceduto a pesarli.

Figura 29. In ordine da sinistra, il campione di rete raccolto, i contaminanti estratti e la successiva pesatura.



Un totale di 7,1 gr di contaminanti su 1300gr di campione indica un grado di contaminazione in massa inferiore allo 0,6%, abbondantemente inferiore ai limiti richiesti dagli impianti di riciclaggio, normalmente intoro al 2-5%.

I rami inoltre possono potenzialmente essere rimossi durante lo smantellamento dell'impianto, potenzialmente annullando la massa dei contaminanti visibili, in quanto le foglie hanno un peso trascurabile.

Figura 30. Pesatura dei contaminanti dopo la rimozione degli sfalci di rami.



Residui di foglie, polvere e terra accumulata durante l'utilizzo e lo stoccaggio del rifiuto non sono un problema in quanto rimuovibili tramite lavaggio durante le operazioni preliminari al riciclaggio.

Ridurre al minimo il tempo di stoccaggio (che in genere avviene all'aperto), potrebbe inoltre permettere di ridurre ulteriormente il grado di contaminazione.

In conclusione, si ritiene che la contaminazione delle reti non ponga alcun ostacolo al loro successivo riciclo.

3.4 Analisi delle possibili soluzioni di riciclo

In ottica di economia circolare, questo studio si occupa di valutare le alternative alla discarica e all'incenerimento per lo smaltimento delle reti a fine vita. Per tanto, prenderemo come riferimento il costo e l'impatto ambientale della valorizzazione termica.

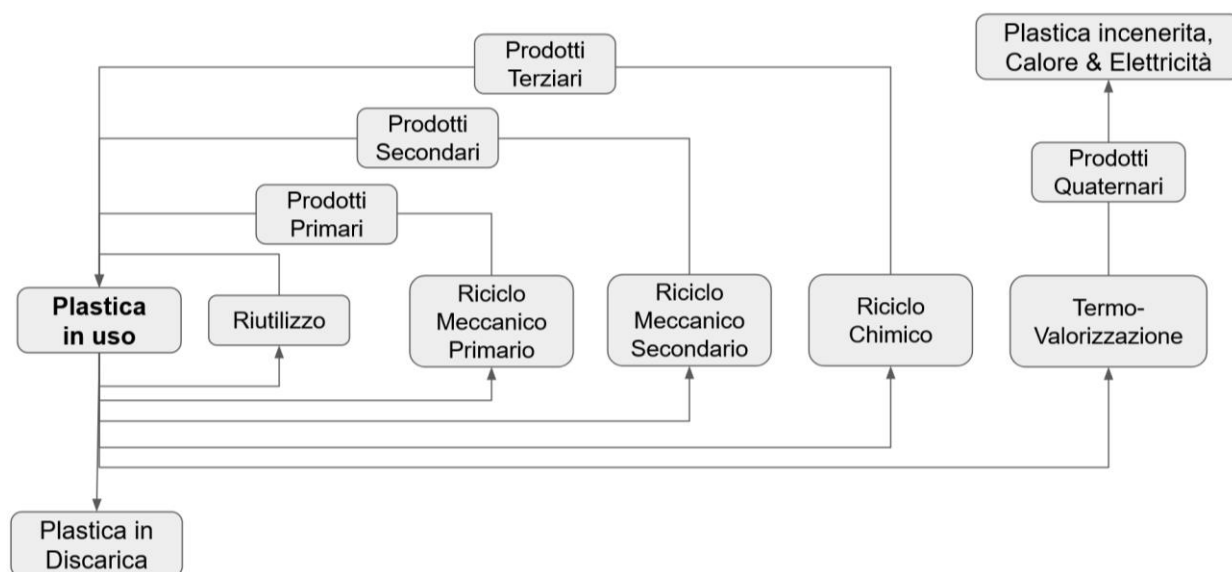
Di seguito riassumiamo i possibili metodi di gestione dei rifiuti plastici disponibili e i prodotti realizzati. I prodotti sono classificati dal primario al quaternario. I prodotti primari sono prodotti che non perdono complessità e possono servire allo stesso scopo del materiale originale. Ad esempio, il riciclaggio di bottiglie in PET per la produzione di più bottiglie in PET. I prodotti secondari hanno subito una certa riduzione della complessità, il che significa che non possono essere riutilizzati per la stessa applicazione, ad esempio riciclando le bottiglie in PET in fibra di PET. I prodotti terziari sono ottenuti tramite una trasformazione chimica. Infine, i prodotti quaternari vengono bruciati per rilasciare energia. Ad esempio, il rilascio e la cattura di calore attraverso l'incenerimento dei rifiuti di plastica. La discarica non è inclusa in questa classificazione in quanto nessun prodotto può essere derivato dall'uso della discarica. Qualsiasi plastica inviata in discarica comporta la sua perdita dalla catena del valore.

Tabella 36. Sintesi delle opzioni di gestione dei rifiuti plastici.

Gestione dei Rifiuti Plastici	Discarica	→	Nessun prodotto
	Riciclo meccanico plastiche omogenee	→	Prodotti primari: plastica riciclata
	Riciclo meccanico plastiche non omogenee	→	Prodotti secondari: plastica riciclata inferiore
	Riciclo chimico	→ Scomposizione termica	Prodotti Terziari: idrocarburi liquidi, gassosi e solidi
		→ Depolimerizzazione	Prodotti Terziari: monomeri, oligomeri
	Degradazione ambientale	→ Compostaggio	Prodotto Terziario: compost
		→ Digestione anaerobica	Prodotto Terziario: biogas
	Termovalorizzazione	→	Prodotto Quaternario: energia termica

La figura sottostante rappresenta la teoria dell'economia circolare della plastica e si ispira al modello VIVACE sviluppato dall'Università di Bologna. Più grande è il circuito, più tempo, energia e lavorazioni richiede la plastica prima di ritornare nel sistema. La rappresentazione mostra che i prodotti di riutilizzo, primari, secondari e terziari hanno tutti il potenziale per adattarsi a un'economia circolare della plastica, poiché la plastica viene conservata nel ciclo di utilizzo e non lascia il sistema. Va notato che la discarica, che non produce prodotti, e l'incenerimento, che produce calore ed elettricità quaternari, comportano perdite di materiali dal sistema e non sono quindi considerati processi che si adattano a un'economia circolare. Nella realtà, i processi primari, secondari e terziari non sono perfettamente circolari e parte del materiale verrà comunque perso dal sistema durante l'elaborazione.

Figura 31. L'economia circolare della plastica.



Nel caso della gestione delle reti antigrandine e antinsetto dismesse, tra le alternative alla valorizzazione termica, si valuteranno:

- Riutilizzo – L'argomento verrà trattato in un capitolo a parte
- Riciclo Meccanico Primario
- Riciclo Meccanico Secondario
- Riciclo Chimico

3.4.1 Termovalorizzazione

La termovalorizzazione (o recupero energetico) è la pratica di produrre elettricità a partire dalla combustione rifiuti solidi.

La termovalorizzazione viene sempre più considerata come una potenziale strategia di diversificazione energetica. Per ogni tonnellata di rifiuti inceneriti si possono generare circa 500-600 kWh di elettricità. (EPA, s.d.)

La maggior parte dei termovalorizzatori brucia rifiuti solidi urbani, ma alcuni bruciano rifiuti industriali o rifiuti pericolosi. Un impianto di termovalorizzazione moderno e correttamente gestito seleziona il materiale prima di bruciarlo e può coesistere con il riciclaggio. Gli unici oggetti che vengono bruciati non sono riciclabili, per loro natura o per questioni economiche, e non sono pericolosi.

Gli impianti di termovalorizzazione sono simili nella progettazione e nelle attrezzature con altre centrali elettriche a vapore, in particolare gli impianti a biomasse. In primo luogo, i rifiuti vengono portati all'impianto. Quindi, i rifiuti vengono smistati per rimuovere i materiali riciclabili e pericolosi. I rifiuti vengono quindi immagazzinati fino al momento della combustione. Alcuni impianti utilizzano la gassificazione, ma la maggior parte brucia direttamente i rifiuti e la tecnologia su cui si basano è matura ed efficiente. I rifiuti possono essere aggiunti alla caldaia in continuo o a lotti, a seconda della tipologia di impianto.

In termini di volume, gli impianti di termovalorizzazione inceneriscono dall'80 al 90% dei rifiuti. A volte, la cenere residua è sufficientemente pulita da essere utilizzata come materia prima nella produzione di blocchi di calcestruzzo o strade. Inoltre, i metalli residui possono essere raccolti e riciclati.

Lo smaltimento della plastica negli impianti di termovalorizzazione è pratica comune in quanto essa permette di innalzare sensibilmente il potere calorifico dei rifiuti, permettendo di ridurre l'uso di combustibili fossili per l'incenerimento completo dei rifiuti.

3.4.2 Riciclo Chimico

Consiste nell'utilizzo di processi termo-chimici per scomporre i rifiuti di plastica nelle sue parti consistenti come monomeri, oligomeri o miscele di idrocarburi liquidi, solidi e gassosi. Generalmente si applica sul bene post-consumo.

I polimeri generati a partire dai monomeri ottenuti con questo processo sono identici al materiale vergine.

Il riciclaggio chimico è il meno utilizzato di tutti i metodi di gestione dei rifiuti di plastica. Ciò può essere attribuito al fatto che le tecnologie necessarie sono in fase di sviluppo, nonché alla disponibilità di infrastrutture di riciclo chimico limitate. Nonostante ciò, il riciclo chimico è sempre più evidenziato come una potenziale opzione per migliorare la gestione dei rifiuti plastici grazie alla sua capacità di gestire quelle plastiche che non possono essere riciclate meccanicamente e che normalmente verrebbero inviate in discarica o incenerite. (Plastic Europe, s.d.)

Esistono vari processi di riciclo chimico. Per il PET ad esempio si utilizzano:

- **Idrolisi:** consiste nell'idrolisi del PET post-consumo in TPA ed EG ad alte temperature e pressioni.
- **Metanolisi:** processo attraverso il quale il PET di scarto viene riscaldato e trattato con metanolo. Il processo scompone la plastica nei suoi monomeri fondamentali, dimetiltereftalato (DMT) e glicole etilenico (EG), che vengono purificati e utilizzati per produrre nuova plastica.

Nel caso non vi sia convenienza e non si riesca a ottenere un solo prodotto in alta resa, le strade percorribili sono:

- **Pirolisi:** uso di calore (300-800°C) in un'atmosfera carente di ossigeno, allo scopo di rompere i legami idrocarburi nei rifiuti di plastica. Avvengono molte reazioni che portano alla formazione di una miscela complessa di prodotti di basso peso molecolare e residui carboniosi. La decomposizione dei polimeri dà origine a un flusso di gas, che successivamente viene in parte condensato (prodotti liquidi) e in parte utilizzato per alimentare per il forno di pirolisi (frazione gassosa). Il residuo carbonioso viene venduto come carbon black.
- **Idrocracking:** uso di calore e pressione (300°C, 10 MPa) in un'atmosfera inerte e ricca di idrogeno per rompere i legami carbonio-carbonio nei rifiuti di plastica e aggiungere idrogeno per produrre idrocarburi solidi, liquidi e gassosi.
- **Gassificazione:** uso di calore (700-800°C) e ossigeno/aria in maniera controllata per produrre syngas, una miscela gassosa ricca di idrogeno e monossido di carbonio, utile per la produzione di energia e la lavorazione di altre materie.

- **Depolimerizzazione:** uso della chimica dei polimeri per invertire le reazioni di polimerizzazione per produrre i monomeri e gli oligomeri componenti della plastica, che possono quindi essere utilizzati in ulteriori reazioni di polimerizzazione.

Pirolisi

La pirolisi è la più studiata delle tecniche di riciclo chimico, con il maggior numero di risultati di ricerca. Ciò suggerisce che siano necessarie ulteriori ricerche su gassificazione, depolimerizzazione e idrocracking.

La variabilità strutturale e la relativa inerzia chimica del PE hanno relegato la maggior parte degli studi sul riciclaggio del PE alla pirolisi. Una difficoltà primaria associata al riciclaggio pirolitico del PE è che la degradazione termica del PE di solito procede tramite scissioni casuali dei legami C-C. Questa scissione omolitica genera due catene radicali che possono andare a formare una miscela complessa di prodotti olefinici e prodotti polimerici altamente reticolati. (Jin, Gonzalez-Gutierrez, Oblak, Zupančič, & Emri, 2012)

Quando la lavorazione meccanica del PE non è più fattibile a causa del deterioramento, la depolimerizzazione del PE tramite pirolisi per produrre idrocarburi per combustibili/energia è spesso la fase finale di utilizzo di tali materiali.

Esistono due processi principali per la pirolisi del PE: pirolisi termica e pirolisi catalitica. La pirolisi termica consiste semplicemente nel riscaldare il PE ad alta pressione per scindere la struttura polimerica e formare molecole organiche più piccole. La pirolisi catalitica utilizza un catalizzatore nel tentativo di ridurre la temperatura e il tempo di reazione e quindi migliorare la redditività economica e, in alcuni casi, la selettività.

Pirolisi termica

In uno studio di Ahmad et al. (Ahmad, et al., 2015) la pirolisi termica a 350°C di pellet di HDPE commercialmente disponibili ha prodotto un prodotto oleoso liquido con una resa dell'81%. L'olio era costituito principalmente da idrocarburi paraffinici, la maggior parte dei quali conteneva tra 6 e 16 atomi di carbonio. La specificità per un singolo prodotto chimico dalla pirolisi del PE, tuttavia, rimane sfuggente.

Una strategia divergente è stata ideata da Palos et al. (Palos, et al., 2019) che ha evitato il problema della selettività e ha invece cercato di prendere l'HDPE di scarto e trasformarlo chimicamente in una miscela complessa simile al petrolio "greggio". Fintanto che la miscela complessa è composta da molecole simili a quelle che si trovano nel petrolio, una miscela così complessa potrebbe ipoteticamente essere lavorata con tecniche consolidate di raffinazione e cracking del petrolio. Questo approccio utilizza l'HDPE di scarto che già selezionato, lavato e triturato. I campioni di HDPE così preparati sono stati quindi riscaldati in un reattore in autoclave batch a 430°C con tempi di reazione brevi, fino a 38 min, per produrre "olio di plastica", con rese fino all'85-90 wt% di olio recuperato. L'olio ottenuto non è sufficientemente pulito per essere utilizzato direttamente al posto del carburante, ma può essere raffinato con metodologie consolidate. Il principale svantaggio di questo approccio è l'energia elevata richiesta per la produzione su larga scala.

Lo studio di Das e Tiwari (Das & Tiwari, 2018) ha esaminato l'importante differenza tra l'utilizzo di prodotti in plastica vergine e rifiuti plastici misti. La miscela era costituita da HDPE, LDPE e PP. Polimeri vergini commercialmente disponibili sono stati comparati con plastica di scarto ottenuta principalmente sotto forma di imballaggi, contenitori di plastica e bottiglie. La pirolisi termica di questi rifiuti misti è stata effettuata a

350 o 400°C per 8 h. Temperature più basse hanno prodotto idrocarburi più leggeri (< C20) mentre un aumento della temperatura ha prodotto idrocarburi più pesanti (> C20). Ciò permette potenzialmente di poter regolare la composizione dell'olio ottenuto attraverso la temperatura di reazione, e di poter sfruttare i flussi di rifiuti misti difficilmente separabili e riciclabili meccanicamente.

Un ulteriore studio sulla pirolizzazione è stato condotto su rifiuti plastici misti composti da polimeri alchilici lineari (PP e PE), polistirene aromatico (PS) e PET (Miandad, et al., 2017). Questi rifiuti sono stati frantumati in polveri fini e utilizzati sia da soli che miscelati insieme in rapporti variabili, quindi pirolizzati a 450°C per 75 min. A seconda dei rapporti utilizzati, la resa dell'olio di plastica ottenuto variava dal 24 al 54%. L'olio ottenuto era costituito da grandi quantità di composti aromatici e mostrava valori di riscaldamento paragonabili a quello del diesel (43 MJ/kg).

Pirolisi catalitica

L'area della pirolisi catalitica del PE ha ottenuto notevoli progressi negli ultimi anni per quanto riguarda l'aumento delle rese e l'abbassamento del tempo/temperatura di reazione, la modulazione dei prodotti ottenuti attraverso l'uso di diversi catalizzatori (Santos, Almeida, Marques, & Henriques, 2018) e la miscelazione di diversi materiali (Chattopadhyay, Pathak, Srivastava, & Singh, 2016).

Il potenziale degli approcci pirolitici per valorizzare i rifiuti di PE è controbilanciato dall'alto costo energetico e dalla necessità di catalizzatori elaborati. Una strada più sostenibile che non richiede catalizzatori e si pone come potenziale alternativa alla pirolisi convenzionale è l'uso dell'acqua supercritica (Tan, et al., 2014) (Su, Zhao, Zhang, & Bi, 2004).

Pirolisi in acqua supercritica

La pirolisi in acqua supercritica, detta anche liquefazione in acqua critica, è un processo analogo all'idrocracking in cui la reazione di scissione avviene in acqua a condizioni supercritiche (373°C e 220bar). In tale stato l'acqua non è né liquida né gassosa (simil vapore) e diventa reattiva.

Uno studio sul cracking termico del PE in acqua supercritica, compiuto con un rapporto 5:1 di H₂O:HDPE a 425°C per 2 ore, ha ottenuto un tasso di conversione dell'olio del 90%, con una resa dell'olio ottenuto maggiore rispetto alla pirolisi e una minore produzione di carbone, la resa dell'olio organico prodotto è stata più elevata per il cracking con acqua supercritica, mentre nel processo si è formata una quantità proporzionalmente inferiore di residui carboniosi. Inoltre il prodotto finale era composto da una maggioranza di alcheni, una piccola parte di alcani e una bassissima frazione aromatica (Moriya, 1999).

Uno stabilimento che utilizza questa tecnologia è attualmente in costruzione in Teeside, Inghilterra. Il processo è stato messo appunto dalla Mura Technology e la prima linea da 20.000 tonnellate all'anno dovrebbe essere operativa nel 2022. Una volta completate tutte e quattro le linee, Mura sarà in grado di riciclare fino a 80.000 tonnellate di rifiuti di plastica all'anno, fornendo ad un'industria che produce polimeri i materiali prodotti dal processo. (Goldsberry, 2021)

L'azienda assicura che il suo processo di riciclaggio chimico avanzato consentirà di risparmiare circa 1,5 tonnellate di CO₂ per tonnellata di plastica riciclata rispetto all'incenerimento della plastica non riciclata. (Mura, 2019).

Uno studio giapponese ha utilizzato la pirolisi in acqua supercritica per il decrosslinking di polietilene reticolato, senza depolimerizzazione dei polimeri, potenzialmente riducendo l'energia richiesta per rompere la catena in monomeri e successivamente ricostruire il polimero. (Goto, 2009)

Applicazioni degli idrocarburi ottenuti

Mentre la maggior parte degli studi menzionati si è concentrata sulla produzione di carburanti attraverso la pirolisi, i prodotti possono anche essere sfruttati come materie prime per produrre altri polimeri (Achilias, Roupakias, Megalokonomos, Lappas, & Antonakou, 2007).

Si segnala inoltre come l'uso di opportune reazioni a microonde permetta di creare dei prodotti utilizzabili come plastificanti per l'acido polilattico, aumentandone la deformazione a rottura fino al 144%, rispetto al 6% ottenibile senza alcun plastificante (Nagahata & Takeuchi, 2019).

3.4.3 Riciclo Meccanico

Il riciclo meccanico consiste nell'uso di tecniche di separazione, frantumazione, calore ed estrusione per fondere i rifiuti di plastica e produrre pellet di plastica riciclata.

In linea di principio, tutti i tipi di materiali termoplastici possono essere riciclati meccanicamente con un impatto minimo o nullo sulla qualità. Attualmente è la quasi unica forma di riciclo in Europa, rappresentando oltre il 99% della quantità riciclata. (Plastic Europe, s.d.)

I flussi di rifiuti che possono facilmente fornire plastica pulita di un unico tipo in grandi quantità sono ideali per il riciclaggio meccanico e rappresentano una situazione vantaggiosa dal punto di vista ambientale ed economico: i benefici ambientali derivanti dalla sostituzione del materiale vergine generalmente superano l'onere ambientale derivante dalla raccolta, separazione, trasporto e riciclaggio.

Plastica e rifiuti contenenti plastica che non possono essere riciclati meccanicamente in modo sostenibile secondo gli standard richiesti da una prospettiva economica e ambientale forniscono una risorsa preziosa per altre soluzioni di recupero come la termovalorizzazione e il riciclo chimico per massimizzare il recupero dell'energia e delle risorse incorporate.

Riciclo meccanico primario

Il riciclo meccanico primario consiste nel trattamento di rifiuti polimerici che crea prodotti con proprietà equivalenti ai prodotti originali. Generalmente si applica sul materiale pre-consumo, come ad esempio scarti di produzione.

A causa dei fenomeni degradativi e di invecchiamento del polimero, non è quasi mai possibile utilizzare esclusivamente materiale di riciclo in un riciclo primario.

Per superare il problema, si può:

1. Miscelare il materiale riciclato con materiale vergine: la frazione di materiale riciclato che si può utilizzare insieme al materiale vergine dipende dallo stato di degradazione del materiale, dovuto alle lavorazioni subite e all'invecchiamento durante l'utilizzo. Se si utilizza una frazione di materiale riciclato inferiore al 20%, le proprietà meccaniche non vengono particolarmente penalizzate.

2. Riformulare gli additivi antiossidanti: la degradazione del materiale comporta la formazione di gruppi chimici che lo rendono meno stabile per un ulteriore utilizzo. Per ottenere resistenze simili al materiale vergine, è opportuno aggiungere nuovi antiossidanti in formulazione opportuna.

Riciclo secondario

Si procede al riciclo secondario quando il materiale è troppo degradato per attuare un riciclo primario. Generalmente si applica bene sul post-consumo e permette di ottenere un prodotto dalle proprietà inferiori.

Mentre il primario avviene sempre per plastiche omogenee, il secondario necessita di una distinzione:

- **Plastiche omogenee:** derivano da una raccolta di manufatti post-consumo, quindi è necessario sottoporli a trattamenti di macinazione, vagliatura, lavaggio ecc. Il risultato del processo di riciclo è un granulo immesso sul mercato in concorrenza con materiali vergini di basso costo (per esempio, dal riciclaggio di bottiglie di PET ottengo fibre per abbigliamento).
- **Plastiche miste:** decisamente più difficile del riciclaggio delle plastiche omogenee, perché quasi sempre i polimeri sono incompatibili fra loro (es: PE e PC, PET e rPET)

Il riciclo dell'HDPE

L'HDPE è accettato nella maggior parte dei centri di riciclaggio del mondo, in quanto è uno dei polimeri plastici più facili da riciclare. La maggior parte delle aziende di riciclaggio raccoglie i prodotti in HDPE e li porterà in grandi impianti per la lavorazione.

Innanzitutto, la plastica viene ordinata e pulita, per rimuovere eventuali detriti indesiderati. La plastica deve quindi essere omogeneizzata, in modo che venga lavorato solo l'HDPE.

Se ci sono altri polimeri plastici nel lotto, questo può rovinare il prodotto finale riciclato. L'HDPE ha una densità maggiore del PET che quindi può essere rimosso utilizzando separatori a galleggiamento. Il PP invece ha una densità specifica simile, per cui per la separazione è necessario utilizzare scanner a infrarossi.

L'HDPE viene quindi triturato e fuso per raffinare ulteriormente il polimero. La plastica viene quindi raffreddata in pellet che possono essere utilizzati nella produzione.

Il dubbio principale risiede nel procedimento di riciclaggio: data la loro conformazione, le reti potrebbero non essere trattate al pari dei normali contenitori rigidi. Mentre i contenitori rigidi vengono direttamente macinati e poi estrusi, si ritiene probabile che le reti debbano prima essere compattate con calore e pressione, così come avviene per il polietilene a bassa densità.

Il processo appena descritto viene per esempio praticato dall'azienda B & P RECYCLING Srl per il riciclo dei teli di pacciamatura e le manichette di irrigazione. (B&P Recycling, s.d.)

3.5 Sistema attuale: organizzazione e costi

Attualmente in Emilia-Romagna non esiste un sistema dedicato per la raccolta delle reti antigrandine e antinsetto. Nel momento in cui un'azienda agricola ha la necessità di smaltire delle reti dismesse, è costretta a contattare uno degli enti privati autorizzati allo smaltimento. Previo pagamento di una certa tariffa, essi si occupano del ritiro del materiale e del suo successivo avviamento agli impianti di riciclaggio.

Figura 32. Schema del funzionamento dell'attuale sistema.

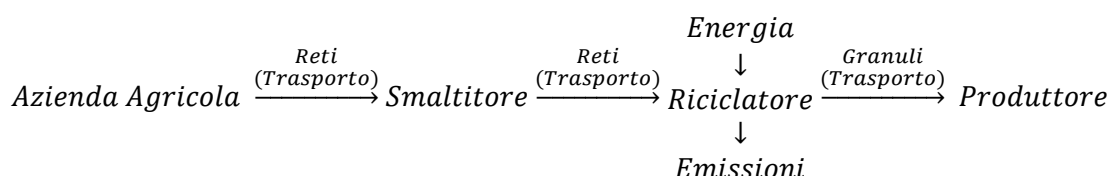


Tabella 37. Elenco di società che si occupano del ritiro di rifiuti plastici in Emilia-Romagna.

Società	Provincia	Tariffa Smaltimento Reti
Tavellin Luigi S.r.l.	Verona	30€/quintale
Casalboni Servizi S.r.l.	Forlì-Cesena	n.d.
Cascina Pulita	Torino	n.d.
Montieco S.r.l.	Bologna	n.d.
La Cart S.r.l.	Rimini	n.d.

Un agricoltore che intende smaltire il proprio impianto antigrandine (480 kg/ha) o antinsetto (670 kg/ha), dovrà quindi contattare una delle aziende che si occupa del ritiro di questi rifiuti. Prendendo come riferimento la tariffa di 30€ quintale, il costo sarà quindi di 144 – 200 € per ogni ettaro di impianto dismesso. Se paragonato al costo di acquisto di tali impianti, che indicativamente partono dai 22-24 mila € (Corradi, 2013), si tratta comunque di una cifra minima e facilmente sostenibile.

3.5.1 Riciclo meccanico

I costi delle operazioni di raccolta, separazione, trasporto e riciclaggio di molti polimeri vengono controbilanciati dai potenziali ricavi derivanti dalla vendita di materiale riciclato nel mercato. La frazione di materiale che per contaminazione o degradazione non può essere riciclata, viene generalmente mandata a incenerimento o purtroppo esportata all'estero.

Il polietilene ad alta densità è uno dei polimeri più proficui e diffusi in termini di riciclabilità.

Il riciclo meccanico delle reti antigrandine e antinsetto è una pratica attualmente in uso e per tale motivo si può dedurre che sia proficuo per gli smaltitori e i riciclatori coinvolti nel processo.

Le reti vengono quindi stoccate e poi inviate a impianti di riciclaggio di materie plastiche, affinché vengano macinate ed estruse in granuli.

Il materiale così ottenuto viene quindi inviato alle industrie che si occupano della produzione e della lavorazione di manufatti in plastica.

La società Tavellin Luigi S.r.l. che si occupa del recupero di plastiche e metalli si occupa anche dello smaltimento delle reti antigrandine e antinsetto. Il loro servizio è comprensivo di recupero, trasporto e smaltimento. Il materiale raccolto viene inviato a diversi impianti di recupero per il riciclo come materia prima seconda.

Se si considera una tariffa di smaltimento di 30€ a quintale, le potenziali 780 tonnellate di reti di scarto potrebbero generare un totale di 230.000€ di fatturato ogni anno.

Il polietilene ad alta densità viene venduto a partire da 1-1.50€/kg (PlasticPortal, 2021) (Plasticker, 2021), mentre il polimero riciclato si attesta intorno ai 0.50-0.80€/kg (RecycleInMe, 2021) (Recycling Today, 2021) (Plasticker, 2021)

Considerando il prezzo minimo di rivendita del HDPE di 500€ a tonnellata ed una riciclabilità del 90%, l'indotto generato dal riciclaggio delle 780 tonnellate di reti ogni anno potrebbe essere di 351.000€.

La somma del fatturato annesso allo smaltimento e alla vendita del polimero riciclato si attesta quindi intorno ai 570.000€/anno.

3.5.2 Termovalorizzazione

Gli impianti di termovalorizzazione possono avere un significativo vantaggio in termini di costi rispetto ai tradizionali impianti termoelettrici, in quanto l'operatore di termovalorizzazione ha un guadagno sia dallo smaltimento dei rifiuti, sia dalla produzione elettrica.

Il costo del carburante può rappresentare fino al 45 percento del costo per produrre elettricità in una centrale a carbone e il 75 percento o più del costo in un impianto alimentato a gas naturale.

L'impiego di materiale plastico innalza sensibilmente il potere calorifico dei rifiuti inceneriti, migliorandone quindi l'efficienza.

Il conferimento di rifiuti agli impianti di incenerimento risulta però più costoso del riciclaggio e si attesta intorno ai 100-150€/tonnellata. (Stato Quotidiano, 2016) (ATO-R, 2017) (Regione Veneto, 2019)

3.5.3 Riciclo chimico

Il costo e la complessità sono i principali fattori negativi: un impianto di riciclaggio chimico ha un CAPEX molto più elevato rispetto a un impianto di riciclaggio meccanico di capacità comparabile. Un regime di tassazione dell'impronta di carboni aumenterebbe il costo della produzione di resina vergine, ma anche così, un tipico progetto di riciclo chimico faticerebbe a soddisfare il ritorno dell'investimento necessario per la maggior parte delle aziende. (IHS Markit, 2019)

A livello economico, questo processo conviene quindi solo a quelle industrie chimiche che hanno già gli impianti necessari, e i campi in cui vale la pena applicare questo metodo risultano tutto sommato pochi (PET, poliammidi, policarbonati).

Tuttavia in futuro, l'aumento delle tariffe di responsabilità estesa del produttore (EPR) e di altre forme di tassazione delle materie plastiche fossili, combinato con il miglioramento dei processi di riciclo chimico, potrebbe permettere la diffusione su larga scala di questa pratica.

3.6 Analisi Sperimentali: Obiettivo e Metodi

Allo scopo di definire la validità delle opzioni di riciclo delle reti antigrandine e antinsetto, è opportuno verificare lo stato del materiale in funzione del suo periodo di utilizzo e dei suoi additivi, nonché l'aleatorietà di queste proprietà.

Se dalle seguenti analisi risulterà possibile correlare le caratteristiche conosciute della rete (colore, applicazione, dimensione di maglia, tempo di impiego) o eventualmente i risultati spettro-calorimetrici, con le proprietà meccaniche finali del polimero riciclato, allora sarà possibile definire un criterio con cui indirizzare una data rete dismessa verso un certo impianto di riciclaggio o di termovalorizzazione.

Nel momento in cui i campioni raccolti dimostrassero di avere una resistenza meccanica simile a quella originaria richiesta dall'applicazione, si potrebbe valutare la possibilità di riutilizzare il polietilene delle reti dismesse per la realizzazione diretta di nuove reti antigrandine e antinsetto.

Caso di reti ancora in uso

- Spettroscopia a infrarossi (IR): è la misura dell'interazione della radiazione infrarossa con la materia per assorbimento, emissione o riflessione. Viene utilizzato per studiare e identificare sostanze chimiche o gruppi funzionali in forma solida, liquida o gassosa. Il metodo o la tecnica della spettroscopia a infrarossi viene condotto con uno strumento chiamato spettrometro a infrarossi (o spettrofotometro) che produce uno spettro infrarosso. Uno spettro IR può essere visualizzato in un grafico dell'assorbanza (o trasmittanza) della luce infrarossa sull'asse verticale rispetto alla frequenza o alla lunghezza d'onda sull'asse orizzontale. Per questa tipologia di test sono sufficienti campioni da 1 g di materiale.
- Calorimetria differenziale a scansione (DSC - Differential scanning calorimetry): è una tecnica termoanalitica in cui viene misurata la differenza nella quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura di un materiale campione e di un materiale riferimento in funzione della temperatura. Sia il campione che il riferimento vengono mantenuti quasi alla stessa temperatura durante l'esperimento. Il campione di riferimento dovrebbe avere una capacità termica ben definita nell'intervallo di temperature da scansare. Questa tecnica può essere utilizzata per valutare la degradazione del polimero e sono necessari campioni di massa 1 g.
- Prova di trazione: è un test fondamentale di scienza e ingegneria dei materiali in cui un campione viene sottoposto a una tensione controllata fino al cedimento. Le proprietà misurate direttamente tramite una prova di trazione sono il carico di snervamento, il carico di rottura, l'allungamento massimo e la strizione. Da queste misurazioni possono essere determinate anche le seguenti proprietà: modulo di Young, coefficiente di Poisson, carico di snervamento e caratteristiche di incrudimento. La prova di trazione può essere eseguita su provini di materiale fuso, per un totale di 500g di materiale circa, allo scopo di definire le proprietà meccaniche finali di manufatti realizzati con il polimero riciclato dalle reti. Le normative di riferimento sono: "ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", "ISO 527 – Plastic, Determination of tensile properties"

Caso di reti dismesse

Nel caso di reti dismesse è possibile avere campioni più grandi, ma è possibile che si abbiano meno dati a disposizione.

Oltre alle prove precedentemente elencate, si potrebbe procedere con:

- Macinatura, fusione ed estrusione per caratterizzazione meccanica: allo scopo di meglio determinare le caratteristiche meccaniche del polimero riciclato.
- Pirolizzazione: per comprendere che molecole e composti si possono ottenere tramite la tecnica della pirolisi.

Campioni

I campioni possono essere di reti nuove/mai installate, dismesse durante la vita utile o a fine vita.

Per ogni campione si ricercano i seguenti dati:

- Condizione: nuova/mai installata/dismessa anticipatamente/a fine vita
- Produttore
- Tipologia (antigrandine - antinsetto)
- Anno di installazione
- Anno di dismissione
- Luogo di Installazione
- Stima qualitativa della quantità di contaminanti
- Analisi qualitativa dell'integrità della rete
- Colore (osservabile direttamente)

Altri dati potenzialmente utili:

- Codice prodotto
- Tipo di coltivazione
- Trattamenti effettuati sulla coltivazione durante la vita della rete

3.7 Valutazione degli impatti ambientali

Alle analisi tecnico-economiche precedenti è stata associata la valutazione degli impatti ambientali per il riciclo meccanico e il riciclo chimico a confronto alle modalità di gestione tipicamente utilizzate, ossia termovalorizzazione e discarica.

3.7.1 Termovalorizzazione

I termovalorizzatori causano meno inquinamento atmosferico degli impianti a carbone, ma più degli impianti a gas naturale. Allo stesso tempo, l'incenerimento ha un impatto climalterante inferiore rispetto allo stoccaggio in discarica: la trasformazione dei rifiuti in carburante non rilascia nell'aria metano come avviene invece per la decomposizione dei rifiuti nelle discariche (POWERmagazine, 2016).

Gli impianti di termovalorizzazione vengono progettati per ridurre l'emissione di inquinanti nei fumi scaricati in atmosfera, quali ossidi di azoto, ossidi di zolfo e particolato solido, e per distruggere gli inquinanti già presenti nei rifiuti, mediante misure di controllo dell'inquinamento come filtri a maniche, scrubber e precipitatori elettrostatici. L'alta temperatura, l'efficienza di combustione, il lavaggio dei gas di scarico e i controlli possono ridurre significativamente le emissioni di inquinanti atmosferici.

La combustione dei rifiuti urbani produce quantità significative di diossine e furani rispetto alla generazione di energia con impianti termoelettrici a carbone o gas naturale. Diossine e furani sono sostanze pericolose per la salute umana, in quanto cancerogene e interferenti con l'apparato endocrino. Tuttavia, i progressi nei progetti di controllo delle emissioni, le nuove normative governative molto rigorose e l'opposizione dell'opinione pubblica hanno causato una drastica riduzione della quantità di diossine e furani prodotti dagli impianti di termovalorizzazione.

Le diossine sono sostanze particolarmente stabili e resistenti, ma a temperature superiori agli 800°C esse si degradano perdendo la loro pericolosità, per cui munendo i termovalorizzatori di un camino che raggiunga certe temperature si riesce a minimizzare il problema. Oggi i prodotti in uscita dal camino del termovalorizzatore sono prevalentemente CO₂ e vapor d'acqua. I dati delle emissioni dei vari inceneritori sono spesso pubblicamente disponibili come avviene per i due termovalorizzatori presenti a Forlì (HERAmbiente, s.d.) (EcoEridania, s.d.).

Gli impianti di termovalorizzazione producono ceneri leggere e pesanti come avviene per la combustione del carbone. La quantità totale di ceneri prodotte dai termovalorizzatori varia dal 15% al 25% in peso della quantità originaria di rifiuti, e le ceneri leggere ammontano a circa il 10%-20% delle ceneri totali. La cenere volatile costituisce di gran lunga il maggior pericolo per la salute umana (rispetto alla cenere pesante) perché contiene metalli tossici quali piombo, cadmio, rame e zinco, nonché piccole quantità di diossine e furani. La cenere pesante può contenere o meno livelli significativi di sostanze pericolose per la salute.

La legge richiede che le ceneri siano testate per la tossicità prima dello smaltimento nelle discariche. Se le ceneri risultano pericolose, possono essere smaltite solo in discariche accuratamente progettate per evitare che gli inquinanti possano raggiungere le falde acquifere sotterranee.

3.7.2 Riciclo chimico

Il riciclo chimico è molto energivoro e ha multiple richieste energetiche intrinseche e ausiliari, rendendola una tecnologia non sostenibile. Anche se i prodotti vengono bruciati per energia, non esiste attualmente una tecnologia di riciclo chimico che consenta di ottenere un bilancio energetico positivo (Rollinson & Oladejo, 2020).

La gassificazione di materie prime plastiche è associata alla produzione di ftalati, BPA, composti bromurati tossici e IPA - molti dei quali sono mutageni, cancerogeni e dannosi per i sistemi respiratorio o neurologico. (Verma, Vinoda, Papireddy, & Gowda, 2016)

È anche noto che la pirolisi crea prodotti organici tossici e i fattori di emissione di IPA mutageni dal polietilene aumentano notevolmente con temperature superiori a 700°C (Rollinson & Oladejo, 2020).

3.7.3 Riciclo meccanico

Il riciclo meccanico richiede preliminarmente la raccolta e la movimentazione di voluminose quantità di plastica. In particolare la raccolta e la movimentazione richiedono l'utilizzo di mezzi stradali che consumano carburante e producono emissioni nocive.

I processi di selezione e lavaggio richiedono flussi costanti di acqua che, anche se depurata, causa l'immissione nell'ambiente di sostanze contaminanti quali microplastiche, metalli pesanti e composti organici.

Il processo di macinatura ed estrusione comporta invece il consumo di energia elettrica convertita in forma di lavoro meccanico e calore.

3.7.4 LCA: Confronto tra riciclo chimico, riciclo meccanico, incenerimento e discarica

Riciclo meccanico, riciclo chimico e termovalorizzazione comportano tutti l'emissione di sostanze inquinanti e l'utilizzo di energia elettrica e combustibili in quantità variabili. Allo scopo di determinare quale delle tre soluzioni comporta l'impatto ambientale minore, sono stati identificati ed analizzati 11 studi LCA. Questi studi sono stati scelti in quanto comparano almeno un metodo di riciclaggio chimico, termovalorizzazione e riciclo meccanico. Gli studi individuati considerano l'efficienza energetica nonché l'emissione di sostanze climalteranti e inquinanti.

Tabella 38. Raccolta delle LCA comparative per riciclo meccanico, riciclo chimico e termovalorizzazione, e relative conclusioni.

Studio	Conclusioni
Perugini, F., Mastellone, M. L., & Arena, U. (2005). A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. <i>Environmental Progress</i> , 24(2), 137–154. https://doi.org/10.1002/ep.10078	Recycling scenarios are always preferable to those of nonrecycling. New plastic waste management schemes may couple feedstock and mechanical recycling processes.
Al-Salem, S. M., Evangelisti, S., & Lettieri, P. (2014). Life cycle assessment of alternative technologies for municipal solid waste and plastic solid waste management in the Greater London	The scenarios including hydrogenation (VCC) result in the highest savings in terms of eutrophication potential. This is mainly due to the avoided impact for the naphtha production.

area. <i>Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)</i>, 244, 391–402. https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.01.066	In terms of GWP, including a Material Recovery Facility provides the best solution for the treatment of plastic solid waste, when the substitution factor is 1; this is because of the avoided emissions associated with the production of virgin plastic. If the substitution factor is 0.5 or less, the low temperature pyrolysis reactor becomes the best environmental technology. Hence the potential of the market to absorb reprocessed products should be considered.
Cosate de Andrade, M. F., Souza, P. M. S., Cavalett, O., & Morales, A. R. (2016). Life cycle assessment of poly(lactic acid) (PLA): Comparison between chemical recycling, mechanical recycling and composting. <i>Journal of Polymers and the Environment</i>, 24(4), 372–384. https://doi.org/10.1007/s10924-016-0787-2	Considering the categories: climate change, human toxicity and fossil depletion, the LCA showed that mechanical recycling presented the lowest environmental impact, followed by chemical recycling and composting. Among the forms of recycling, the most important input was the electricity consumption. Electricity consumption exhibited the highest impacts amongst the inputs for chemical and mechanical recycling of PLA. The results can be explained by the fact that the recycling alternatives have recycled polymer as an output, which can be used again while the composting does not. This difference leads to a necessity of polymer replacement from the traditional route, causing higher environmental impacts.
Khoo, H. H. (2019). LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. <i>Resources, Conservation, and Recycling</i>, 145, 67–77. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.010	The article demonstrated that selected plastics recycling/conversion technologies – along with their associated available (or combination of) capacities – play a significant role in the potential environmental benefits and drawbacks of plastic waste treatment. The scenario where 7% of plastic wastes for pyrolysis, 11% for mechanical recycling, and the rest to the WTE is recommended as the best option due to the reduction of 31,000 tons CO₂-eq, potential energy output of 3 × 10⁶ GJ and prevention of about 3,000 tonnes of solid waste.
Maga, D., Hiebel, M., & Thonemann, N. (2019). Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid. <i>Resources, Conservation, and Recycling</i>, 149, 86–96. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.018	The conducted LCA study shows that all investigated PLA recycling technologies (mechanical, chemical, solvent-based) perform better from an environmental perspective than waste incineration. The reason for that is the substitution of virgin PLA material and the avoidance of linked environmental impacts such as agricultural land occupation, global warming, eutrophication or acidification. In addition, the cumulative energy demand of recycling is lower compared to incineration. The named environmental advantages were shown for industrial

	waste (mechanical recycling) and consumer waste (mechanical, chemical, solvent-based recycling).
Faraca, G., Martinez-Sanchez, V., & Astrup, T. F. (2019). Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres. <i>Resources, Conservation, and Recycling</i> , 143, 299–309. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.014	Drawing upon the comparison of three key archetypes of hard plastic waste recycling routes (two mechanical recycling scenario characterised by a simpler – sMR – and a more advanced – aMR – technology, respectively and one feedstock recycling scenario by pyrolysis – FR) we showed that quality-oriented recycling is preferable from both an environmental and financial assessment perspective. Scenario aMR provided the largest savings in the highest number of impact categories, including global warming potential (GWP). Scenario sMR typically ranked second, apart from the case of GWP where the pyrolysis alternative appeared more beneficial than a simple material recovery facility (MRF) treatment due to considerable emissions from incinerating a large amount of plastic rejects. Scenario aMR also provided the lowest total costs (negative costs), followed by FR and sMR scenarios (positive costs). The results demonstrated that if high quality of the recycled plastic is achieved, then both environmental savings and financial revenues are possible.
Demetrious, A., & Crossin, E. (2019). Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis. <i>Journal of Material Cycles and Waste Management</i> , 21(4), 850–860. https://doi.org/10.1007/s10163-019-00842-4	Gasification-pyrolysis of mixed plastic waste has higher acidification, climate change, eutrophication and photochemical oxidation potential than incineration because of the higher natural gas usage and lower energy production savings.
Volk, R., Stallkamp, C., Steins, J. J., Yogish, S. P., Müller, R. C., Stapf, D., & Schultmann, F. (2021). Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study. <i>Journal of Industrial Ecology</i> , (jiec.13145). https://doi.org/10.1111/jiec.13145	The combined mechanical and chemical recycling (pyrolysis) of lightweight mixed packaging waste shows considerable saving potentials in GWP (0.48 kg CO ₂ e/kg input), Cumulative Energy Demand (13.32 MJ/kg input), and cost (0.14 €/kg input) and a 16% higher carbon efficiency compared to the baseline scenario with state-of-the-art mechanical recycling in Germany.
Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. <i>The Science of the Total Environment</i> , 769(144483), 144483. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483	Three LCA studies under three perspectives: waste, product and a combination of the two. The results suggest that chemical recycling via pyrolysis has a 50% lower climate change impact and life cycle energy use than the energy recovery option. The climate change impact and energy use of pyrolysis and mechanical recycling of MPW are similar if the quality of the recyclate is taken into account. Furthermore, mixed plastic waste recycled by pyrolysis has a significantly lower climate change impact (–0.45 vs 1.89 t CO ₂ eq./t plastic) than the equivalent made from virgin fossil resources. However, pyrolysis has significantly higher other

	impacts (acidification, eutrophication, photochemical and ozone formation) than mechanical recycling, energy recovery and production of virgin plastics. Sensitivity analyses show that some assumptions have notable effects on the results, including the assumed geographical region and its energy mix, carbon conversion efficiency of pyrolysis and recyclate quality.
Schwarz, A. E., Ligthart, T. N., Godoi Bizarro, D., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & van Harmelen, T. (2021c). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. <i>Waste Management (New York, N.Y.)</i> , 121, 331–342. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020	On an European scale, most CO ₂ reduction is obtained through polyolefin recycling. Polyolefins, which have the highest total CO ₂ emissions when demand volumes are assessed, although per kg the CO ₂ emissions are the lowest. Emissions are cut significantly when polyolefins are not incinerated (with energy recovery) but recycled through the lowest emission technology (gasification to monomers).
Zhao, X., & You, F. (2021). Consequential life cycle assessment and optimization of high-density polyethylene plastic waste chemical recycling. <i>ACS Sustainable Chemistry & Engineering</i> , 9(36), 12167–12184. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03587	In the optimal technology pathway of waste HDPE chemical recycling, the waste HDPE is treated through fast pyrolysis catalyzed by the HZSM-5 catalyst and converted into downstream products.

Dall'analisi delle conclusioni derivanti dagli 11 documenti LCA esaminati sono emersi alcuni punti in comune.

Per gli studi LCA che hanno modellato utilizzando il metodo di modellazione di tipo comparativo, un confronto diretto tra riciclaggio meccanico, riciclaggio chimico e incenerimento, mostra che:

- il riciclaggio meccanico di solito funziona meglio del riciclaggio chimico
- qualsiasi processo di riciclaggio funziona meglio dell'incenerimento
- la termovalorizzazione è più performante della discarica.

Basandosi su questa conclusione, un'ulteriore scoperta chiave di molti dei modelli combinati è che il riciclaggio chimico è una buona opzione per supportare i processi di riciclaggio meccanico. Ad esempio, utilizzando tecniche di riciclaggio chimico per i rifiuti di plastica che il riciclaggio meccanico non è in grado di gestire, come le pellicole di plastica o i multimateriali. Ciò rafforza ulteriormente la necessità di allontanarsi da LCA comparativi di riciclaggio meccanico e chimico per muoversi verso studi di LCA combinati che determinano il potenziale d'uso del riciclaggio chimico con altri processi di gestione dei rifiuti di plastica.

Quando i processi di riciclaggio chimico vengono confrontati tra loro, la pirolisi è la tecnologia consigliata più frequentemente. Tuttavia la pirolisi è anche la tecnica di riciclo chimico che viene modellata più frequentemente, oltre ad essere il processo con il maggior numero di risultati di ricerca. Ciò indica una potenziale distorsione o incompletezza del corpo dei risultati e dei dati, poiché sono disponibili più dati sulla pirolisi rispetto ad altri metodi di riciclaggio chimico. È necessaria quindi una maggiore modellizzazione delle altre tecniche di riciclaggio chimico, in modo da costruire un quadro più equilibrato degli impatti di tutti i metodi di riciclaggio chimico (gassificazione, idrocracking e depolimerizzazione).

Per quanto riguarda la prospettiva combinata di prodotti e rifiuti, uno studio ha evidenziato come il riciclaggio chimico per pirolisi abbia un impatto sul cambiamento climatico leggermente superiore (7%) rispetto al riciclaggio meccanico, ma inferiore del 42% rispetto all'opzione di recupero energetico. La maggior parte degli altri impatti considerati, tra cui l'acidificazione, l'eutrofizzazione, la formazione di ozono fotochimico, risultano invece significativamente più elevati per il riciclo chimico rispetto al riciclaggio meccanico e al recupero energetico a causa della richiesta elevata di energia nei processi di pirolisi e purificazione (Jeswani, et al., 2021).

Dal punto di vista delle specifiche del modello LCA, è stato riscontrato che alcuni modelli LCA utilizzano un approccio comparativo, confrontando i metodi di riciclaggio chimico con altre tecniche di gestione dei rifiuti di plastica per determinare il metodo migliore. Poiché è stato evidenziato che il riciclo chimico dovrebbe supportare il riciclo meccanico e non sostituirlo, si è concluso che il confronto diretto tra riciclo chimico e riciclo meccanico non ha più valore. Invece, un altro approccio osservato alle LCA di riciclaggio chimico è quello di modellare l'uso di metodi di riciclaggio chimico in combinazione con altre tecniche di gestione dei rifiuti di plastica per trattare un flusso di rifiuti di plastica misti. I modelli combinati analizzano l'impatto ambientale dell'inclusione di diversi metodi negli scenari di gestione dei rifiuti di plastica. Si è concluso che la modellazione del riciclaggio chimico tramite questi modelli di tipo combinato è più utile per rappresentare e analizzare potenziali scenari futuri dell'infrastruttura di gestione dei rifiuti di plastica.

Perché il riciclo chimico non può sostituire il riciclo meccanico

Sebbene gli studi analizzati concludano che il riciclo chimico dal punto di vista ambientale sia un'ottima alternativa al riciclo meccanico e all'incenerimento, nella realtà vi sono alcune criticità non indifferenti, che spesso e volentieri non sono state considerate:

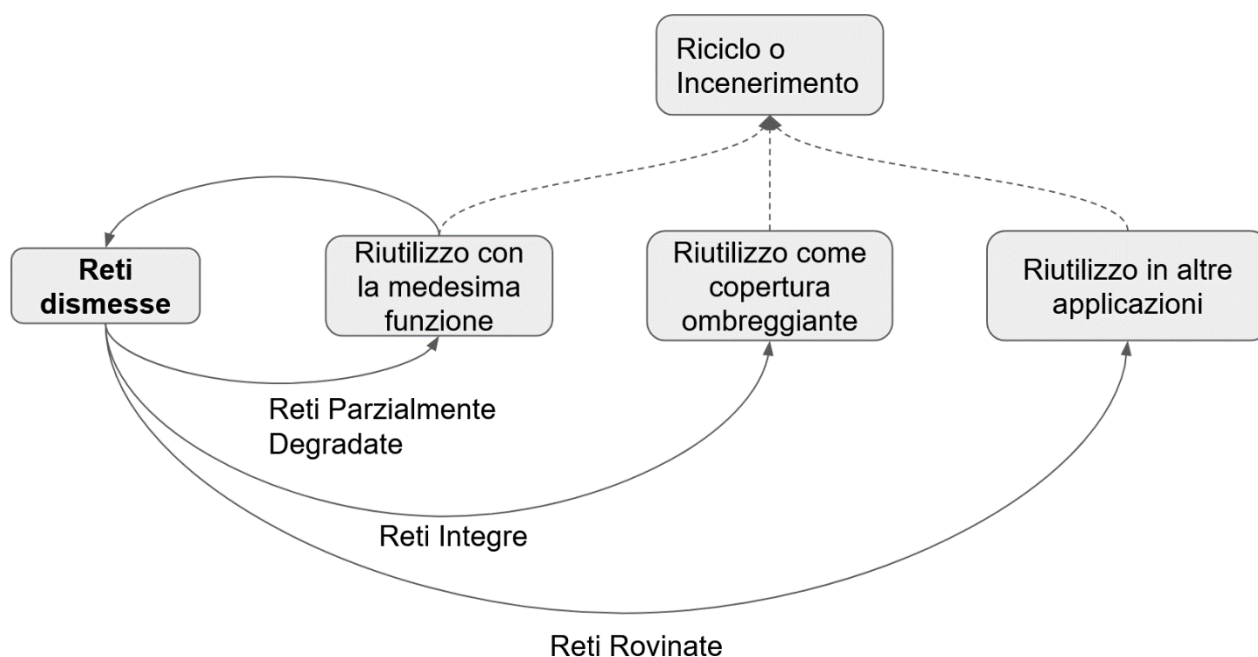
- Attualmente non esistono impianti industriali su larga scala che conducano il riciclo chimico della plastica direttamente in altra plastica (Quicker, 2019).
- A causa del suo consumo energetico e delle perdite significative di materiale nel processo, il riciclo chimico è considerato una forma di riciclo a basso valore rispetto al riciclo meccanico. (Patel, Moon, Tangri, & Wilson, 2020).
- L'output della pirolisi non è direttamente plastica riciclata, sono necessari ulteriori riprocessamenti. L'olio ottenuto dalla pirolisi richiede di essere diluito con nafta vergine per raggiungere gli standard necessari al cracking termico. Ciò significa che solo una parte del materiale riciclato chimicamente torna sotto forma di nuova plastica. (Hann & Connock, 2020).
- Nonostante molte industrie affermino che il riciclo chimico può processare varie tipologie di mix plastici, flussi di plastica relativamente omogenei e puliti sono necessari per ottenere alte rese e prodotti utilizzabili per la produzione di nuove resine. (Hann & Connock, 2020)
- Gli indicatori di tossicità sono spesso omessi nelle LCA e negli studi di impatto ambientale del riciclaggio chimico, sebbene questa categoria di impatto dovrebbe essere di grande importanza quando si valuta una nuova tecnica nota per generare flussi di rifiuti altamente inquinati.

3.8 Riutilizzo delle reti antigrandine e antinsetto

Si ritiene che il riutilizzo delle reti, quando applicabile, sia la strategia più efficace per ridurre l'impatto ambientale di questi manufatti polimerici, in quanto non comporta sostanziali emissioni e permette di evitare direttamente la produzione di nuove reti.

La strada del riutilizzo è perseguibile in quei casi in cui la rete possiede ancora una certa integrità funzionale e meccanica. Nel caso in cui la rete fosse in stato avanzato di degradazione, i fili di cui è composta potrebbero iniziare a demagliersi e si potrebbero disperdere elevate quantità di polietilene nell'ambiente.

Figura 33. Schema delle tipologie di riutilizzo delle reti antigrandine e antinsetto



Il riutilizzo può essere di varie tipologie, a seconda dello stato di degradazione delle reti:

- **Riutilizzo con la medesima funzione:** consiste nel riutilizzo delle reti antigrandine/antinsetto nuovamente nella medesima applicazione. Ciò può avvenire quando la rete viene dismessa anticipatamente rispetto alla sua completa degradazione, come accade quando un frutteto viene dismesso per le ragioni più svariate (improduttività, malattie, ed altri). Le reti dismesse in tal modo possono essere riutilizzate con la medesima funzione, in maniera economicamente conveniente, in quei frutteti già stabiliti e che avranno vita restante pari a quella rimanente della rete. Ciò è avvenuto in una delle aziende con cui si è preso contatto: le reti dismesse anticipatamente è stata presa in carico da un altro agricoltore della zona, eliminando così i costi di smaltimento per l'azienda e i costi di acquisto della rete per l'agricoltore, e riducendo l'impatto ambientale della rete stessa.
- **Riutilizzo come copertura ombreggiante:** le reti antigrandine/antinsetto dismesse possono non avere più le caratteristiche di resistenza meccanica e l'integrità necessarie per un funzionamento efficace. Tuttavia, le proprietà possono essere sufficienti per un nuovo riutilizzo in ambito agricolo, quali reti ombreggianti nelle zone che ricevono un'eccessiva esposizione solare, tale da impedire la corretta

crescita delle coltivazioni. Un'applicazione di questo tipo non richiede una perfetta continuità delle maglie (come per le reti antinsetto), o un'elevata resistenza meccanica (come per le reti antigrandine). Di questa tipologia di riutilizzo se ne è trovato un esempio in una delle aziende agricole che hanno fornito i campioni di rete: alcuni operai agricoli hanno imballato le reti dismesse da un frutteto con l'intento di spedirle in Senegal, dove saranno riutilizzate come reti ombreggianti.

- Riutilizzo in altre applicazioni: quando le reti perdono buona parte della loro integrità, il riutilizzo nei due modi precedentemente elencati non è possibile. Tuttavia, alcune sezioni della rete possono essere impiegate in nuove applicazioni (shopper, elementi di arredo, ed altri).

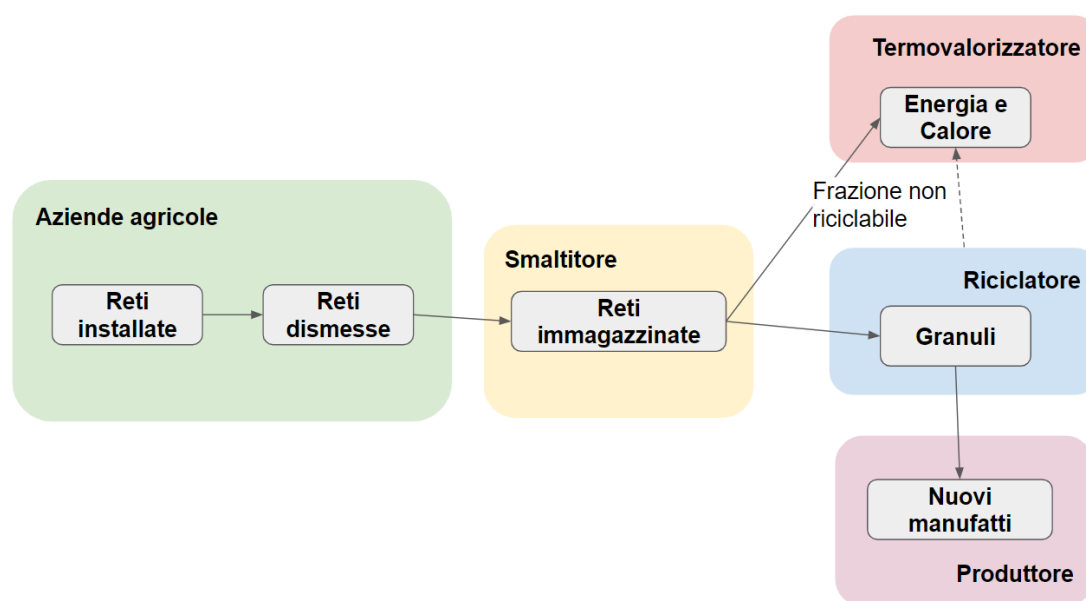
3.9 Conclusioni raggiunte sulla gestione delle reti a fine vita

Attualmente si stima che ogni anno in Emilia-Romagna si producano circa 782 tonnellate di reti protettive di scarto. Sebbene questo numero possa sembrare inizialmente considerevole, se paragonato alle 154.584 tonnellate di plastica prodotte ogni anno dalla raccolta differenziata in Emilia-Romagna (Arpae Emilia-Romagna, 2019) la percezione del problema della gestione delle reti a fine vita si ridimensiona. Tuttavia le reti sono tutte in monomateriale e presentano un basso grado di contaminazione, che ne innalza considerevolmente il valore e la possibilità di riciclo.

Le reti vengono già attualmente riciclate in buona parte come materia prima seconda. Tuttavia, il sistema di gestione attuale presenta alcune criticità dovuta alla mancata coordinazione di tutte le realtà coinvolte:

- prima di raggiungere l'impianto di riciclaggio il materiale passa dallo smaltitore, che può avere sede anche a centinaia di chilometri dalle aziende agricole e dagli impianti di riciclaggio;
- il materiale viene inviato agli impianti di riciclaggio senza una chiara valutazione del suo stato;
- molte aziende agricole non sono opportunamente informate sulla procedura e sui costi di smaltimento, così le reti dismesse possono restare stoccate in campo anche diversi mesi

Figura 34. Il sistema attuale di gestione delle reti agricole



Inoltre, se gli studi che verranno condotti sui campioni raccolti indicheranno una riduzione minima delle proprietà del polietilene, si potrà pensare al riciclo diretto delle reti in nuove reti, eventualmente tramite opportune miscele con materiale vergine. Ciò consentirebbe di riutilizzare sia il polietilene che gli additivi già presenti nelle reti antigrandine e antinsetto.

Sebbene il riciclo meccanico sia preferibile sia a livello economico che a livello ambientale, non sempre la condizione di degrado del polimero lo permette. Per tale motivo le reti antigrandine e antinsetto che si rivelano eccessivamente degradate dovrebbero essere inviate direttamente a termovalorizzazione.

In futuro lo sviluppo di nuovi impianti di pirolizzazione potrebbe rendere il riciclo chimico un'alternativa più ecocompatibile ed economica alla termovalorizzazione.

3.9.1 Gestione integrata delle reti antigrandine e antinsetto

Allo scopo di risolvere i problemi sopra menzionati, si propone l'applicazione di un modello di gestione integrato a livello regionale che coinvolga da un lato le realtà agricole strutturate del territorio (consorzi, cooperative, reti di aziende) e dall'altro gli impianti di trattamento dei rifiuti.

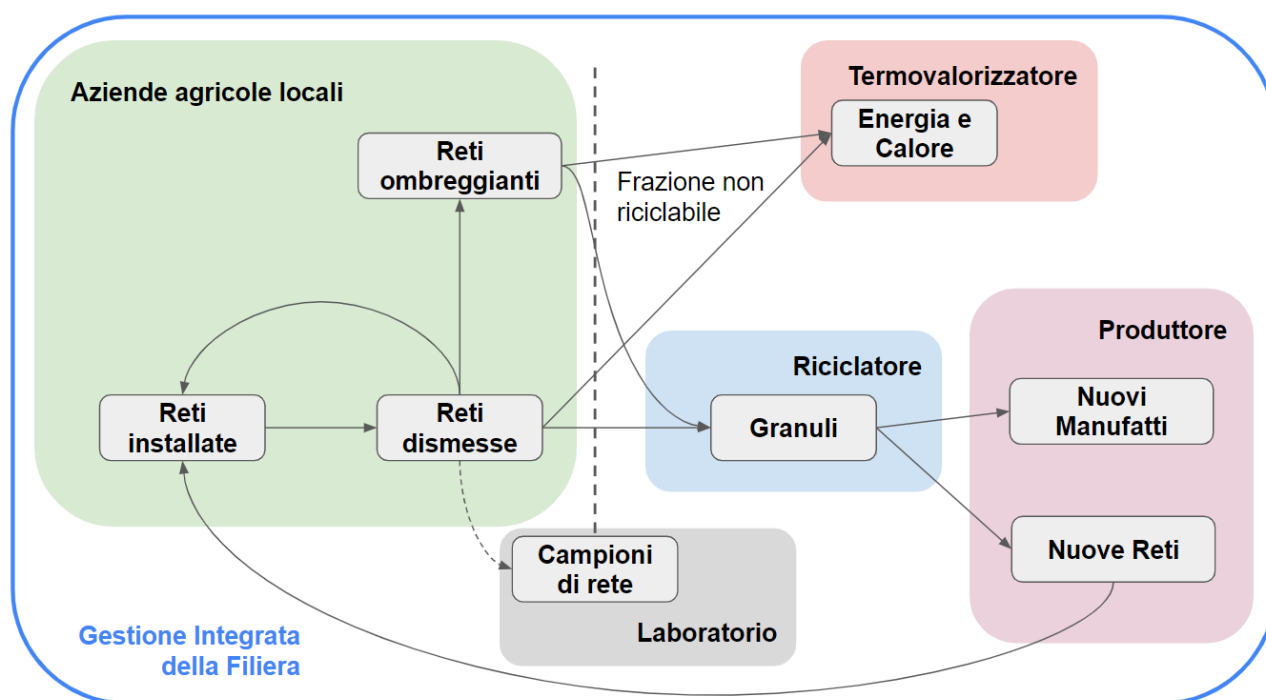
Per determinare anticipatamente la migliore opzione di trattamento di ogni impianto rete dismesso, si potrebbero effettuare preventivamente i test su campioni di rete raccolti e spediti a un laboratorio opportunamente attrezzato, quindi su indicazione dei risultati ottenuti decidere l'instradamento del materiale direttamente verso un determinato impianto di riciclaggio o termovalorizzazione, senza passare dalla zona di stoccaggio dello smaltitore. In tal modo il materiale delle reti verrebbe trattato secondo il massimo delle proprie potenzialità.

Potrebbe bastare una semplice analisi spettrofotometrica IR per determinare lo stato di degradazione del polimero.

Inoltre se gli studi sul materiale delle reti dismesse indicheranno una correlazione consistente tra dati tecnici del materiale, periodo di installazione e caratteristiche del polimero dismesso, non si renderebbe nemmeno necessaria l'analisi preventiva dei campioni di rete.

La gestione di tale sistema potrebbe essere affidata a enti regionali che già si occupano del recupero e del trasporto verso gli impianti di riciclaggio di varie tipologie di rifiuti, sia industriali che urbani, e che quindi dispongono già delle attrezzature e dei mezzi necessari.

Figura 35. Rappresentazione di un possibile modello di gestione integrata delle reti antigrandine e antinsetto.



Un servizio di questa tipologia potrebbe essere potenzialmente gratuito, vista la bassa contaminazione e il valore del HDPE, che una volta riciclato avrebbe un prezzo di rivendita di 500-800€ a tonnellata.

La diffusione della conoscenza di questo servizio tra le varie aziende agricole potrebbe avvenire attraverso i consorzi agrari, le cooperative e le reti di imprese, che già adesso sono sede di servizi dedicati alle aziende e oltre all'approvvigionamento di materiali spesso si occupano dello smaltimento dei rifiuti per conto delle piccole realtà agricole.

4 – Riepilogo

Questo studio nasce come ricerca preliminare per il progetto della regione Emilia-Romagna denominato “Strategie per la riduzione e la razionalizzazione dell'uso delle plastiche nella filiera frutticola” che aspira a trovare nuovi modi per ridurre e riciclare la plastica lungo l'intera filiera frutticola.

In questo studio, dopo un'introduzione sui problemi relativi all'utilizzo della plastica in campo agricolo, ci si è concentrati su due applicazioni in particolare: i teli di pacciamatura e le reti antigrandine e antinsetto.

Per quanto riguarda i teli di pacciamatura, si è verificata la validità economica e ambientale delle opzioni biodegradabili e rinnovabili, mentre per le reti antigrandine e antinsetto si è caratterizzato il materiale dismesso per quantità e qualità e si sono analizzate le possibili soluzioni di trattamento.

Poiché non risulterebbero studi approfonditi né sui teli di pacciamatura né sulle reti antigrandine, gli studi condotti sono stati accompagnati da un'estensiva e sistematica trattazione necessaria alla completa comprensione dei temi indagati.

Teli di pacciamatura

I teli di pacciamatura sono utilizzati massivamente in tutto il mondo in quanto consentono di migliorare la resa delle colture stagionali, riducendo al contempo le risorse e la manodopera necessarie.

Generalmente sono realizzati in polietilene a bassa densità (LDPE), materiale non biodegradabile. Al termine del ciclo di coltivazione, i teli vengono in genere rimossi dal terreno, ma, a causa della degradazione, parte di essi rimane incorporata nel suolo, contaminandolo e riducendone la fertilità di anno in anno.

Nell'ultima decade sono state commercializzate nuove alternative biodegradabili e biobased che potrebbero risolvere i problemi connessi all'utilizzo dei film in polietilene. I film di pacciamatura biodegradabili più diffusi in Italia sono a base di amidi di mais (Mater-Bi) oppure acido polilattico e polibutirrato (Ecovio).

I teli biodegradabili si differenziano dai teli in polietilene per prezzo di acquisto, tempo di installazione e resa complessiva.

I teli in Mater-Bi in particolare hanno dimostrato di avere prestazioni agronomiche paragonabili ai teli in polietilene in tutti gli studi raccolti, diversi per coltivazione e clima, nonostante siano composti principalmente da sostanze di origine rinnovabile, quali amidi, cellulosa e olii vegetali.

Lo studio economico condotto sul Mater-Bi ha generato le seguenti considerazioni:

- Sebbene il Mater-Bi abbia un prezzo di acquisto superiore (6,5€/kg), vista la maggiore riuscita in termini di superficie coperta a parità di massa e il recente aumento dei prezzi dei teli in polietilene (da 1,20€/kg a 3,30€/kg), i teli in Mater-Bi risultano generalmente più economici da acquistare.
- I teli biodegradabili richiedono alcune precauzioni in più durante l'installazione, in quanto più delicati, e quindi potenzialmente potrebbe essere necessari tempi e costi maggiori rispetto al polietilene. Tuttavia, nella realtà la differenza risulta essere minima.
- I teli biodegradabili vengono incorporati direttamente nel suolo al termine del ciclo colturale, eliminando quindi i costi di rimozione e smaltimento tipici dei teli in polietilene.

- I teli in Mater-Bi risultano quindi generalmente più economici da utilizzare rispetto ai teli in polietilene.
- Per quanto riguarda la pacciamatura della fragola, caso tipico di applicazione dei teli in polietilene nella regione Emilia-Romagna, sono necessari teli in Mater-Bi di spessore maggiore, in quanto la coltivazione richiede un minimo di 8-9 mesi. Per la coltivazione in campo aperto, i teli in Mater-Bi equivalgono in costi ai teli in polietilene, mentre nella coltivazione sotto tunnel risultano più convenienti.

A livello di impatto ambientale, i teli biodegradabili non hanno dimostrato fenomeni di tossicità acuta sui microorganismi del suolo. Inoltre le esperienze raccolte sul loro utilizzo testimoniano la loro completa biodegradazione visiva a distanza di un anno dall'applicazione.

Tuttavia non sono ancora stati studiati gli effetti a lungo termine sull'accumulo dei film biodegradabili nel suolo e non è stata nemmeno verificata sperimentalmente l'assenza di microplastiche residue.

Reti antigrandine e antinsetto

L'utilizzo di protettive antigrandine e antinsetto si sta rapidamente diffondendo in quelle economie agricole che si basano sulla coltivazione di alberi da frutto, in quanto permettono un miglioramento della resa e una riduzione dei rischi meteorologici e dell'utilizzo di pesticidi. Per questi motivi, la loro applicazione si sta espandendo progressivamente in Emilia-Romagna, grazie anche agli incentivi regionali, per una percentuale di utilizzo stimata del 30% nei 48000 ettari di coltivazioni arboree della regione.

Le reti antigrandine e antinsetto sono realizzate in polietilene ad alta densità (HDPE), materiale plastico che normalmente viene riciclato, e si differenziano per larghezza di maglia e grado di additivazione.

Un impianto protettivo antinsetto generalmente utilizza reti a maglia stretta di colore bianco (bassa additivazione, ombreggiamento limitato) e ha una durata di 5-10 anni, mentre un impianto antigrandine utilizza reti a maglia leggermente più larga di colore grigio/nero (alta additivazione, ombreggiamento maggiore) e ha una durata di 10-15 anni.

Si stima che ogni anno in Emilia-Romagna vengano dismesse 780 tonnellate di reti antigrandine e antinsetto in polietilene. Esse rientrano tra i rifiuti speciali agricoli non pericolosi (CER 020104). Da una prima analisi qualitativa, le reti dismesse presentano un basso grado di contaminazione, possono essere facilmente caricate su un autocarro e inviate agli impianti di smaltimento.

Si sono analizzate le possibili soluzioni di smaltimento di questi rifiuti in ottica di economia circolare. Le più virtuose a livello ambientale sono, in ordine:

- Riutilizzo con la stessa funzione o come reti ombreggianti: per le reti che ancora dispongono di una certa integrità funzionale.
- Riciclo meccanico primario e secondario: per le reti che dispongono ancora di una sufficiente integrità chimica.
- Termovalorizzazione: per il materiale che non possiede più le caratteristiche necessarie al riciclo meccanico.

Si è valutata anche la validità ambientale del riciclo chimico, in particolare della pirolisi in acqua critica. Essa può essere potenzialmente un ottimo strumento di gestione di quei rifiuti che non possono essere riciclati

meccanicamente, ponendosi come alternativa più eco-compatibile della termovalorizzazione. Tuttavia attualmente non esistono impianti di riciclo chimico su larga scala e non è del tutto chiaro il loro possibile impatto ambientale.

Il sistema di gestione attuale prevede il ritiro in loco dei rifiuti ad opera di smaltitori autorizzati, che quindi immagazzinano il materiale e poi generalmente lo recapitano presso gli impianti di riciclaggio meccanico.

Questo sistema presenta alcune criticità:

- Le sedi degli smaltitori sono spesso distanti sia dalle aziende agricole che dagli impianti di riciclaggio, rendendo necessaria la movimentazione di autocarri per lunghe distanze.
- Il materiale non viene inviato agli impianti di riciclaggio senza una chiara valutazione del suo stato.
- Il ritiro delle reti antigrandine e antinsetto dismesse (e anche di altre tipologie di rifiuti agricoli) non sempre avviene in maniera sistematica e trasparente.

Si propone quindi la valutazione di un sistema di gestione integrato che operi a livello regionale, mettendo in comunicazione realtà agricole e impianti di riciclaggio.

Bibliografia

- 24emilia.com. (2018, Settembre 7). *L'Emilia-Romagna ha perso il 43% dei frutteti in 20 anni*. Tratto da 24Emilia.com: <https://www.24emilia.com/lemilia-romagna-ha-perso-il-43-dei-frutteti-in-20-anni/>
- 52020DC0098 - EN. (2020, 11 3). Tratto da EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>
- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., & Antonakou, E. V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536–542. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.06.076
- Adam, A., Kouider, S. A., Youssef, B., Hamou, A., & Saiter, J. M. (2005). Studies of polyethylene multi layer films used as greenhouse covers under Saharan climatic conditions. *Polymer Testing*, 24(7), 834–838. doi:10.1016/j.polymertesting.2005.07.002
- Adhikari, R., Bristow, K. L., Casey, P. S., Freischmidt, G., & Hornbuckle, J. W. (2015). Novel sprayable biodegradable polymer membrane to minimise soil evaporation. *2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, 1–4. doi:10.1109/ICTSD.2015.7095875
- Adhikari, R., Bristow, K. L., Casey, P. S., Freischmidt, G., Hornbuckle, J. W., & Adhikari, B. (2016). Preformed and sprayable polymeric mulch film to improve agricultural water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 169, 1-13. doi:10.1016/j.agwat.2016.02.006
- Adhikari, R., Mingtarja, H., Freischmidt, G., Bristow, K. L., Casey, P. S., Johnston, P., & Sangwan, P. (2019). Effect of viscosity modifiers on soil wicking and physico-mechanical properties of a polyurethane based sprayable biodegradable polymer membrane. *Agricultural Water Management*, 222, 346–353. doi:10.1016/j.agwat.2019.05.020.
- Agricultural plastics european regulation: APE Europe*. (2016, Aprile 27). Tratto il giorno Maggio 30, 2021 da Plastiques-Agricoles.com: <https://www.plastiques-agricoles.com/appe-europe-missions/agricultural-plastics-european-regulation/>
- Agriculture*. (2018, Marzo 15). Tratto il giorno Maggio 17, 2021 da Plastic Europe: <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/agriculture>
- Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2015). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products. *International Journal of Green Energy*, 12(7), 663–671. doi:10.1080/15435075.2014.880146
- Al-Helal, I. M., & Abdel-Ghany, A. M. (2010). Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR transfer: Optical properties and evaluation. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 125–132. doi:10.1016/j.njas.2010.02.002
- Amarante, C. V., Steffens, C., Miqueloto, A., Zanardi, O., & Pessoa dos Santos, H. (2009). Light supply to 'Fuji' apple trees covered with hail protection nets and its effects on photosynthesis, yield and fruit quality. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 31, 664-670. doi:10.1590/S0100-29452009000300007

- Amare, G., & Desta, B. (2021). Coloured plastic mulches: impact on soil properties and crop productivity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1). doi:10.1186%2Fs40538-020-00201-8
- Ammala, A. B., S., D. K., Petinakis, E., Sangwan, P., Wong, S., & ... Leong, K. H. (2011). An overview of degradable and biodegradable polyolefins. *Progress in Polymer Science*, 36(8), 1015–1049. Tratto da j.progpolymsci.2010.12.002
- Arpae Emilia-Romagna. (2019). *La gestione dei rifiuti in Emilia-Romagna - Report 2019*. Tratto da ambiente.regione.emilia-romagna.it/: <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/rifiuti/documenti/report-rifiuti/arpae-report-rifiuti-2019-web-01-m.pdf>
- ATO-R. (2017, Giugno 19). *Tariffe*. Tratto da Atorifiutitorinese.It: <http://www.atorifiutitorinese.it/cms/attivita/servizi-d-ambito/tariffe>
- AZO Cleantech. (2012, Luglio 25). *Recycling of high-Density Polyethylene (HDPE or PEHD)*. Tratto da Azocleantech.Co: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=255>
- B&P Recycling. (s.d.). *Processo produttivo*. Tratto da Bandprecycling.Com: <http://www.bandprecycling.com/processo-produttivo>
- Bainbridge, D. A. (2012). *A guide for desert and Dryland Restoration: New Hope for arid lands*. Washington, D.C.: Island Press. Tratto da https://books.google.it/books?id=b1PxyCuOzwC&pg=PA239&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Biodegradable Mulch Demonstrations*. (2016, Giugno 13). Tratto il giorno Maggio 25, 2021 da Penn State University: <https://extension.psu.edu/biodegradable-mulch-demonstrations>
- Briassoulis, D., & Mistriotis, A. (2010). Integrated structural design methodology for agricultural protecting structures covered with nets. *Biosystems Engineering*, 105(2), 205–220. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.10.010
- Briassoulis, D., Mistriotis, A., & Eleftherakis, D. (2007). Mechanical behaviour and properties of agricultural nets. Part II: Analysis of the performance of the main categories of agricultural nets. *Polymer Testing*, 26(8), 970–984. doi:10.1016/j.polymertesting.2007.06.010
- Briassoulis, D., Mistriotis, A., & Eleftherakis, D. (2007). Mechanical behaviour and properties of agricultural nets—Part I: Testing methods for agricultural nets. *Polymer Testing*, 26(6), 822–832. doi:0.1016/j.polymertesting.2007.05.007
- Brodhagen, M., Goldberger, J. R., Hayes, D. G., Inglis, D. A., Marsh, T. L., & Miles, C. (2017). Policy considerations for limiting unintended residual plastic in agricultural soils. *Environmental Science & Policy*, 69, 81–84. doi:10.1016/j.envsci.2016.12.014
- Brodhagen, M., Peyron, M., Miles, C., & Inglis, D. A. (2015). Biodegradable plastic agricultural mulches and key features of microbial degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(3), 1039–1056. doi:10.1007/s00253-014-6267-5

- Browne, G. (2020, Gennaio 30). *Why food's plastic problem is bigger than we realise*. Tratto da BBC:
<https://www.bbc.com/future/ bespoke/ follow-the-food/ why-foods-plastic-problem-is-bigger-than-we-realise.html>
- Castellano, S., Di Palma, A., Germinara, G., Lippolis, M., Starace, G., & Scarascia-Mugnozza, G. (2019). Experimental Nets for a Protection System against the Vectors of *Xylella fastidiosa* Wells et al. *Agriculture*, 9(2), 32. doi:10.3390/agriculture9020032
- Castellano, S., Russo, G., & Scarascia, M. (2006). The influence of construction parameters on radiometric performances of agricultural nets. *Acta Horticulturae*(718), 283–290. doi:10.17660/ActaHortic.2006.718.32
- Castellano, S., Scarascia Mugnozza, G., Russo, G., Briassoulis, D., Mistriotis, A., Hemming, S., & Waaijenberg, D. (2008). Plastic nets in agriculture: A general review of types and applications. *Applied Engineering in Agriculture*, 24(6), 799–808. doi:10.13031/2013.25368
- Castellano, S., Scarascia Mugnozza, G., Russo, G., Briassoulis, D., Mistrotis, A., Hemming, S., & Waaijenberg, D. (2008). Design and use criteria of netting systems for agricultural production in Italy. *Journal of Agricultural Engineering*, 39(3), 31.
- CesenaToday. (2018, Giugno 26). *Rifiuti agricoli, i teli di plastica si possono conferire alla stazione ecologica di via Spinelli*. Tratto il giorno Luglio 30, 2021 da CesenaToday.it:
<https://www.cesenatoday.it/cronaca/rifiuti-agricoli-i-teli-di-plastica-si-possono-conferire-alla-stazione-ecologica-di-via-spinelli.html>
- Chattopadhyay, J., Pathak, T. S., Srivastava, R., & Singh, A. C. (2016). Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis. *Energy*, 103, 513–521. doi:10.1016/j.energy.2016.03.015
- Chen, K.-J. ..., Marsh, T. L., Tozer, P. R., & Galinato, S. P. (2019). Biotechnology to sustainability: Consumer preferences for food products grown on biodegradable mulches. *Food Research International*, 116, 200–210. doi:10.1016/j.foodres.2018.08.013
- Chen, Y., Wu, C., Zhang, H., Lin, Q., Hong, Y., & Luo, Y. (2013). Empirical estimation of pollution load and contamination levels of phthalate esters in agricultural soils from plastic film mulching in China. *Environmental Earth Sciences*, 239–247. doi:10.1007/s12665-012-2119-8
- Chouinard, G., Firlej, A., & Cormier, D. (2016). Going beyond sprays and killing agents: Exclusion, sterilization and disruption for insect pest control in pome and stone fruit orchards. *Scientia Horticulturae*, 208, 13–27. doi:10.1016/j.scienta.2016.03.014
- Corradi, C. (2013, Marzo 7). *Impianto Antigrandine Quanto Costa*. Tratto da Edagricole.it:
<https://rivistafrutticoltura.edagricole.it/archivio/impianto-antigrandine-quanto-costa/>
- Corriere Ortofrutticolo. (2021, Maggio 18). *EMILIA ROMAGNA, CONFAGRI: “STOP AL TAGLIO DEI FRUTTETI. FINANZIARE I REIMPIANTI.”*. Tratto da Corriereortofrutticolo.It:

<http://www.corriereortofrutticolo.it/2021/05/18/emilia-romagna-cofagri-stop-al-taglio-dei-frutteti-finanziare-reimpianti/>

- Cowan, J. S., Miles, C. A., Andrews, P. K., & Inglis, D. A. (2014). Biodegradable mulch performed comparably to polyethylene in high tunnel tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production: Biodegradable mulch performed comparable to polyethylene in high tunnel tomato production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(9), 1854–1864. doi:10.1002/jsfa.6504
- Crivelli, L. A., Caponero, A., Vitali, S., Bugiani, M. B., Bugiani, R., & Bariselli, M. (2017, Luglio 27). *Cimice asiatica, reti anti-insetto a confronto*. Tratto il giorno Agosto 7, 2021 da Edagricole.it: <https://terraevita.edagricole.it/tecnica-e-tecnologia/cimice-asiatica-reti-anti-insetto-confronto/>
- CRPV di Cesena. (2020, Settembre 15). *Focus Area 3A, Piano del Gruppo Operativo, Strategie per la riduzione e la razionalizzazione dell'uso delle Plastiche nella filiera Frutticola (STEP)*.
- D6400-19, A. (2019). *Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities*. West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/D6400-19
- Das, P., & Tiwari, P. (2018). Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. *Resources, Conservation, and Recycling*, 128, 69–77. doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.025
- Díaz-Pérez, J. C. (2010). Bell pepper (*capsicum annum* L.) grown on plastic film mulches: Effects on crop microenvironment, physiological attributes, and fruit yield. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 45(8), 1196–1204. doi:10.21273/HORTSCI.45.8.1196
- Dvořák, P., Hajšlová, J., Hamouz, K., Schulzová, V., Kuchtova, P., & Tomášek, J. (2010). Black Polypropylene Mulch Textile in Organic Agriculture. *Lucrări Științifice*, 52, 116 - 120.
- EcoEridania. (s.d.). *Emissioni Essere*. Tratto da gruppoecoeridania.com: <https://gruppoecoeridania.com/le-aziende/essere/emissioni/>
- EPA. (s.d.). *Energy recovery from the combustion of Municipal Solid Waste (MSW)*. Tratto il giorno Luglio 30, 2021 da Epa.gov: <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>
- Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García, Y., & Real, A. I. (2006). Plastic films for agricultural applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 22(2), 85–102. doi:10.1177/8756087906064220
- European Bioplastics. (s.d.). *Market*. Tratto il giorno Agosto 27, 2021 da european-bioplastics.org: <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- Filipović, V., Bristow, K. L., Filipović, L., Wang, Y., Sintim, H. Y., Flury, M., & Šimůnek, J. (2020). Sprayable biodegradable polymer membrane technology for cropping systems: Challenges and opportunities. *Environmental Science & Technology*, 54(8), 4709–4711. doi:10.1021/acs.est.0c00909
- Ganapini, W. (2012). *Bioplastiche: un caso studio di bioeconomia in Italia*. Milano: Edizioni Ambiente.

- Ghimire, S., Hayes, D., DeVetter, L. W., Inglis, D., Cowan, J. S., & Miles, C. A. (2018). Biodegradable plastic mulch and suitability for sustainable and organic agriculture. Tratto da <http://hdl.handle.net/2376/12917>
- Ghimire, S., Wszelaki, A. L., Moore, J. C., Inglis, D. A., & Miles, C. (2018). The use of biodegradable mulches in pie pumpkin crop production in two diverse climates. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 53(3), 288–294. doi:10.21273/HORTSCI12630-17
- Gilmore, D. F., Antoun, S., Lenz, R. W., & Fuller, R. C. (1993). Degradation of poly(β -hydroxyalkanoates) and polyolefin blends in a municipal wastewater treatment facility. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 1(4), 269–274. doi:10.1007/BF01458293
- Goldsberry, C. (2021, Aprile 22). *Dow partners with Mura technology to scale game-changing advanced recycling of plastics*. Tratto il giorno Settembre 5, 2021 da Plasticstoday.com: <https://www.plasticstoday.com/advanced-recycling/dow-partners-mura-technology-scale-game-changing-advanced-recycling-plastics>
- Goto, M. (2009). Chemical recycling of plastics using sub- and supercritical fluids. *The Journal of Supercritical Fluids*, 47(3), 500–507. doi:10.1016/j.supflu.2008.10.011
- Grant, B. L. (2014, Giugno 17). *Pine straw mulch uses - learn about pine straw mulch application*. Tratto il giorno Giugno 7, 2021 da Gardeningknowhow.com: <https://www.gardeningknowhow.com/garden-how-to/mulch/pine-straw-for-mulch.htm>
- Hablott, E., Dharmalingam, S., Hayes, D. G., Wadsworth, L. C., Blazy, C., & Narayan, R. (2014). Effect of simulated weathering on physicochemical properties and inherent biodegradation of PLA/PHA nonwoven mulches. *Journal of Polymers and the Environment*, 22(4), 417–429. doi:10.1007/s10924-014-0697-0
- Hakkarainen, M. (2002). *Aliphatic polyesters: Abiotic and biotic degradation and degradation products* (Vol. 157). Heidelberg, Berlin: Springer. doi:10.1007/3-540-45734-8_4
- Halden, R. U. (2010). Plastics and health risks. *Annual Review of Public Health*, 31(1), 179–194. doi:10.1146/annurev.publhealth.012809.103714
- Hann, S., & Connock, T. (2020). Chemical Recycling: State of Play. *Eunomia and CHEM Trust*. Tratto da <https://chemtrust.org/wp-content/uploads/Chemical-Recycling-Eunomia.pdf>
- Hayes, D. G., Dharmalingam, S., Wadsworth, L. C., Leonas, K. K., Miles, C., & Inglis, D. A. (2012). Biodegradable agricultural mulches derived from biopolymers. In *ACS Symposium Series* (p. 201–223). Washington, DC: American Chemical Society.
- HERAmbiente. (s.d.). *Termovalorizzatore Rifiuti Urbani a Forlì*. Tratto da ha.gruppohera.it: <https://ha.gruppohera.it/impianti/termovalorizzatori/forli>

- Ho, K., Pometto, A., & Hinz, P. (1999). Effects of Temperature and Relative Humidity on Polylactic Acid Plastic Degradation. *Journal of Polymers and the Environment*, 7, 83–92. doi:10.1023/A:1021808317416
- IARC. (2021). *List of Classifications – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans*. Tratto da monographs.iarc.who.int: <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- IHS Markit. (2019, Agosto 9). *Is chemical recycling a game changer?* Tratto da [ihsmarkit.com](https://ihsmarkit.com/research-analysis/is-chemical-recycling-a-game-changer.html): <https://ihsmarkit.com/research-analysis/is-chemical-recycling-a-game-changer.html>
- Ingold, K. U. (1969). Peroxy radicals. *Accounts of Chemical Research*, 2(1), 1–9. doi:10.1021/ar50013a001
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 17088 (2012) Specifications for compostable plastics. Ginevra: International Organization for Standardization.
- Iwata, T. (2015). Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly plastics. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 54(11), 3210–3215. doi:10.1002/anie.201410770
- Jacobs, K. L. (2013, Maggio 7). *How I smother weeds with newspaper*. Tratto il giorno Maggi 25, 2021 da [AGardenForTheHouse.com](https://www.agardenforthehouse.com/how-to-smother-weeds-with-newspaper/): <https://www.agardenforthehouse.com/how-to-smother-weeds-with-newspaper/>
- Jamshidian, M., Tehrani, E. A., Imran, M., Jacquot, M., & Desobry, S. (2010). Poly-lactic acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(5), 552–571. doi:10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x
- Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *The Science of the Total Environment*, 769(144483), 144483. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144483
- Jin, H., Gonzalez-Gutierrez, J., Oblak, P., Zupančič, B., & Emri, I. (2012). The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 97(11), 2262–2272. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.039
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2), 501–529. doi:10.1007/s13593-011-0068-3
- Kim, D. Y., Kim, H. W., Chung, M. G., & Rhee, Y. H. (2007). Biosynthesis, modification, and biodegradation of bacterial medium-chain-length polyhydroxyalkanoates. *The Journal of Microbiology*, 45(2), 87–97.
- Kriek, E. (1974). Carcinogenesis by aromatic amines. *Biochimica et Biophysica Acta*, 355(2), 177–203. doi:10.1016/0304-419X(74)90003-1
- Krzan, A., Hemjinda, S., Miertus, S., Corti, A., & Chiellini, E. (2006). Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics. *Polymer Degradation and Stability*, 91(12), 2819–2833. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.034

- Kyrikou, I., & Briassoulis, D. (2007). Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(2), 125 - 150. doi:10.1007/s10924-007-0053-8
- Kyrikou, I., Briassoulis, D., Hiskakis, M., & Babou, E. (2011). Analysis of photo-chemical degradation behaviour of polyethylene mulching film with pro-oxidants. *Polymer Degradation and Stability*, 96(12), 2237–2252. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2011.09.001
- Lal, R., & Stewart, B. A. (2012). *Soil water and agronomic productivity*. Boca Raton, FL: CRC Press. Tratto da https://books.google.it/books?id=TtrQASjyhxC&pg=PA461&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Lamont, W. (1999). *The Use of Different Colored Mulches for Yield and Earliness*. Tratto da CT IPM - Integrated Pest Management Program: <http://ipm.uconn.edu/documents/raw2/The%20Use%20of%20Different%20Colored%20Mulches%20for%20Yield%20and%20Earliness/The%20Use%20of%20Different%20Colored%20Mulches%20for%20Yield%20and%20Earliness.php?aid=8>
- Legarrea, S., Karnieli, A., Fereres, A., & Weintraub, P. G. (2010). Comparison of UV-absorbing nets in pepper crops: spectral properties, effects on plants and pest control. *Photochemistry and Photobiology*, 86(2), 324–330. doi:10.1111/j.1751-1097.2009.00657.x
- Legislative train schedule*. (2017). Tratto da European Parliament: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-new-boost-for-jobs-growth-and-investment/file-strategy-on-plastics-in-the-circular-economy>
- Li, C., Moore-Kucera, J., Lee, J., Corbin, A., Brodhagen, M., Miles, C., & Inglis, D. (2014b). Effects of biodegradable mulch on soil quality. *Applied Soil Ecology: A Section of Agriculture, Ecosystems & Environment*, 79, 59–69. doi:10.1016/j.apsoil.2014.02.012
- Li, C., Moore-Kucera, J., Miles, C., Leonas, K., Lee, J., Corbin, A., & Inglis, D. (2014a). Degradation of potentially biodegradable plastic mulch films at three diverse U.s. locations. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(8), 861–889. doi:10.1080/21683565.2014.884515
- Liu, E. K., He, W. Q., & Yan, C. R. (2014). ‘White revolution’ to ‘white pollution’ —agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters*, 9(9). doi:10.1088/1748-9326/9/9/091001
- Liu, E., Zhang, L., Dong, W., & Yan, C. (2021). Biodegradable plastic mulch films in agriculture: feasibility and challenges. *Environmental Research Letters*, 16(1). doi:10.1088/1748-9326/abd211
- Lönnstedt, O. M., & Eklöv, P. (2016). Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology. *Science*, 352(6290), 1213–1216. doi:10.1126/science.aad8828
- Lucas, N., Bieniaime, C., Belloy, C., Queneudec, M., Silvestre, F., & Nava-Saucedo, J.-E. (2008). Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques. *Chemosphere*, 73(4), 429–442. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.06.064

- Lugo-Pérez, J., & Lloyd, J. (2009). Ecological implications of organic mulches in arboriculture: a mechanistic pathway connecting the use of organic mulches with tree chemical defenses. *Arboriculture and Urban Forestry*, 35, 211-217.
- Magnani, A. (2021, Maggio 11). *Zucchino, i vantaggi della pacciamatura con i teli Mater-Bi*. Tratto il giorno Settembre 10, 2021 da Italiafruit.net: <http://www.italiafruit.net/DettaglioNews/60783/packaging-e-tecnologie/zucchino-i-vantaggi-della-pacciamatura-con-i-teli-mater-bi>
- Malinconico, M. (2015). *Soil degradable bioplastics for a sustainable modern agriculture*. (S. B. Heidelberg, A cura di) Heidelberg, Berlin. Tratto da http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/7370/1/Mario%20Malinconico_2017.pdf
- Manja, K., & Aoun, M. (2019). The use of nets for tree fruit crops and their impact on the production: A review. *Scientia Horticulturae*, 246, 110–122. doi:10.1016/j.scienta.2018.10.050
- Maraveas, C. (2020). The sustainability of plastic nets in agriculture. *Sustainability*, 12(9), 3625. doi:10.3390/su12093625
- Marí, A. ..., Pardo, G. ..., Cirujeda, A. ..., & Martínez, Y. (2019). Economic evaluation of biodegradable plastic films and paper mulches used in open-air grown pepper (*capsicum annum* L.) crop. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 9(1), 36. doi:10.3390/agronomy9010036
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415. doi:10.1007/s10021-011-9517-8
- MEPs clamp down on wasteful use of plastic carrier bags. (2015, Aprile 28). Tratto il giorno Giugno 10, 2021 da Europa.eu: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20150424IPR45708/meps-clamp-down-on-wasteful-use-of-plastic-carrier-bags>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239–252. doi:10.1016/j.ibiod.2016.09.017
- Miles, C., DeVetter, L., Ghimire, S., & Hayes, D. G. (2017). Suitability of biodegradable plastic mulches for organic and sustainable agricultural production systems. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 51(1), 10-15.
- Miles, C., Wallace, R., Wszelaki, A., Martin, J., Cowan, J., Walters, T., & Inglis, D. (2012). Deterioration of potentially biodegradable alternatives to black plastic mulch in three tomato production regions. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 47(9), 1270–1277. doi:10.21273/HORTSCI.47.9.1270
- Mohan, S., & T., S. (2010). Microbial deterioration and degradation of polymeric materials. *J Biochem Tech (2010) 2(4):210-215*, 2(4), 210-215. doi:10.12691/jaem-5-1-2

- Moore, J. C., & Wszelaki, A. L. (2019). The use of biodegradable mulches in pepper production in the southeastern United States. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 54(6), 1031–1038. doi:10.21273/HORTSCI13942-19
- Moriya, T. E. (1999). Characteristics of polyethylene cracking in supercritical water compared to thermal cracking. *Polymer Degradation and Stability*, 65(3), 373–386. doi:10.1016/S0141-3910(99)00026-9
- Mukherjee, A., Knoch, S., Chouinard, G., Tavares, J. R., & Dumont, M.-J. (2019). Use of bio-based polymers in agricultural exclusion nets: A perspective. *Biosystems Engineering*, 180, 121–145. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.01.017
- Mura. (2019, Agosto 8). *HydroPRS Technology*. Tratto il giorno Settembre 6, 2021 da Muratechnology.com: <https://muratechnology.com/technology/>
- Nagahata, R., & Takeuchi, K. (2019). Encouragements for the use of microwaves in industrial chemistry. *Chemical Record*, 19(1), 51–64. doi:10.1002/tcr.201800064
- Negrone, P. (2019, Aprile 19). *La collaborazione CIC - Assobioplastiche - CONAI - COREPLA*. Tratto il giorno Maggio 24, 2021 da Compost.it: <https://www.compost.it/iniziativa-conclude/la-collaborazione-cic-assobioplastiche-conai-corepla-2013-2017/>
- New biodegradable mulching paper*. (2017, Febbraio 21). Tratto il giorno Maggio 25, 2021 da Small Farmers Journal: <https://smallfarmersjournal.com/new-biodegradable-mulching-paper/>
- Novamont. (2021). *Novamont Agro - Casi Studio*. Tratto il giorno Settembre 10, 2021 da Novamont.com: https://agro.novamont.com/page.php?id_page=87
- Novamont. (s.d.). *Certificazioni - Materbi*. Tratto il giorno Agosto 20, 2021 da materbi.com: <https://materbi.com/certificazioni/>
- Novamont. (s.d.). *MATER-BI - bioplastiche biodegradabili e compostabili*. Tratto il giorno Agosto 30, 2021 da Novamont.com: <https://www.novamont.com/mater-bi>
- Pajač Živković, I., Lemic, D., Samu, F., Kos, T., & Barić, B. (2019). Spider communities affected by exclusion nets. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 879–887. doi:10.15666/aeer/1701_879887
- Palos, R., Gutiérrez, A., Vela, F. J., Maña, J. A., Hita, I., Asueta, A., & ... Bilbao, J. (2019). Assessing the potential of the recycled plastic slow pyrolysis for the production of streams attractive for refineries. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 142(104668), 104668. doi:10.1016/j.jaap.2019.104668
- Patel, D., Moon, D., Tangri, N., & Wilson, M. (2020). All Talk and No Recycling: An Investigation of the U.S. “Chemical Recycling” Industry. *Global Alliance for Incinerator Alternatives*. doi:10.46556/WMSM7198

- Plastic Europe. (s.d.). *Recycling and energy recovery*. Tratto il giorno Agosto 14, 2021 da Plasticseurope.org: <https://www.plasticseurope.org/en/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>
- Plastic mulch machine can cut labor costs in half*. (2015, Giugno 15). Tratto da Vegetable Growers News: <https://vegetablegrowersnews.com/article/plastic-mulch-machine-can-cut-labor-costs-in-half/>
- Plasticker. (2021). *Material Exchange for plastics: recyclates, surplus material, flakes and plastic Waste*. Tratto il giorno Settembre 24, 2021 da Plasticker.de: https://plasticker.de/recybase/index_en.php
- PlasticPortal. (2021). *Average resin prices*. Tratto il giorno Settembre 24, 2021 da Plasticportal.Eu: <https://www.plasticportal.eu/en/polymer-prices/lm/14/>
- Polyethylene (PE) plastic: Properties, uses & application*. (s.d.). Tratto il giorno Giugno 29, 2021 da Specialchem.com: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>
- POWERmagazine. (2016, Luglio 1). *Energy from waste: Greenhouse gas winner or pollution loser?* Tratto il giorno Luglio 30, 2021 da Powermag.com: <https://www.powermag.com/energy-waste-greenhouse-gas-winner-pollution-loser/>
- Powers, L. (2020, Giugno 23). *Polyethylene toxicity*. Tratto il giorno Settembre 11, 2021 da Nontoxu.com: <https://www.nontoxu.com/plastics-silicone/toxicity-polyethylene>
- Quicker, P. (2019). Evaluation of recent developments regarding alternative thermal waste treatment with a focus on. In S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky, F. Winter, & D. (. Juchelková, *Waste Management* (Vol. 9, p. 361-370). Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. Tratto da Vivis.de: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM9/2019_WM_359-370_Quicker.pdf
- Ramos, L., Berenstein, G., Hughes, E. A., Zalts, A., & Montserrat, J. M. (2015). Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina. *The Science of the Total Environment*, 523, 74–81. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.03.142.
- Ranjan, P., Patle, G. T., Prem, M., & Solanke, K. R. (2017). Organic mulching - A water saving technique to increase the production of fruits and vegetables. *Current Agriculture Research Journal*, 5(3), 371–380. doi:10.12944/CARJ.5.3.17
- RecycleInMe. (2021, Settembre). *Current HDPE - Injection prices - US Plastic Prices*. Tratto da Recycleinme.Com: <https://www.recycleinme.com/scrapresources/DetailedPrice?psect=2&cat=US%20Plastic%20Prices&subcat=HDPE%20-%20Injection>
- Recycling Today. (2021). *Plastic scrap prices inch upward*. Tratto da Recyclingtoday.Com: <http://magazine.recyclingtoday.com/article/march-2021/plastic-scrap-prices-inch-upward.aspx>
- Reese, M. (2020, Novembre 18). *Agricultural plastic in the U.S. and China: A blessing or a curse?* Tratto il giorno Maggio 25, 2021 da Ohio's Country Journal: <https://ocj.com/2020/11/agricultural-plastic-in-the-u-s-and-china-a-blessing-or-a-curse/>

- Regione Veneto. (2019, Luglio 12). *Dettaglio Deliberazione della Giunta Regionale - Bollettino Ufficiale della Regione del Veneto*. Tratto da Veneto.it: <https://bur.regione.veneto.it/BurvServices/Pubblica/DettaglioDgr.aspx?id=398981>
- Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6453 – 6454. doi:10.1021/es302011r
- Rochman, C. M., Kross, S. M., Armstrong, J. B., Bogan, M. T., Darling, E. S., Green, S. J., . . . Veríssimo, D. (2015). Scientific evidence supports a ban on microbeads. *Environmental Science & Technology*, 49(18), 10759–10761. doi:10.1021/acs.est.5b03909
- Rollinson, A., & Oladejo, J. (2020). Chemical Recycling: Status, sustainability and environmental impacts. *Global Alliance for*. doi:10.46556/ONLS4535
- Rudnik, E., & Briassoulis, D. (2011). Comparative biodegradation in soil behaviour of two biodegradable polymers based on renewable resources. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1), 18–39. doi:10.1007/s10924-010-0243-7
- Santos, B. P., Almeida, D., Marques, M. d., & Henriques, C. A. (2018). Petrochemical feedstock from pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene using different catalysts. *Fuel*, 215, 515–521. doi:10.1016/j.fuel.2017.11.104
- Sartore, L., Schettini, E., de Palma, L., Brunetti, G., Coccozza, C., & Vox, G. (2018). Effect of hydrolyzed protein-based mulching coatings on the soil properties and productivity in a tunnel greenhouse crop system. *The Science of the Total Environment*, 645, 1221–1229. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.259
- Scarascia-Mugnozza, G., Sica, C., & Russo, G. (2011). Plastic materials in European agriculture: Actual use and perspectives. *Journal of Agricultural Engineering*, 42(3), 15-28. doi:10.4081/jae.2011.3.15
- Schonbeck, M. (s.d.). *Synthetic Mulching Materials for Weed Management*. Tratto il giorno Maggio 25, 2021 da eOrganic.org: <https://eorganic.org/node/4872>
- Sforzini, S., Oliveri, L., Chinaglia, S., & Viarengo, A. (2016). Application of biotests for the determination of soil ecotoxicity after exposure to biodegradable plastics. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 68. doi:10.3389/fenvs.2016.00068
- Shanks, R., & Kong, I. (2012). Thermoplastic Starch. In A. Z. El-Sonbati., *Thermoplastic Elastomers* (p. 96-116). Rijeka, Croatia: InTech.
- Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93(3), 561–584. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008
- Sintim, H. Y., & Flury, M. (2017). Is biodegradable plastic mulch the solution to agriculture's plastic problem? *Environmental Science & Technology*, 51(3), 1068–1069. doi:10.1021/acs.est.6b06042

- Sipram. (2019, Agosto 10). *Servizio di raccolta e smaltimento dei rifiuti speciali agricoli*. Tratto il giorno Luglio 30, 2021 da Sipram.it: <http://www.sipram.it/servizio-di-raccolta-e-smaltimento-dei-rifiuti-speciali-agricoli/>
- Smith, A. (1931). *Effect of paper mulches on soil temperature, soil moisture and yields of certain crops*. Hilgardia. doi:10.3733/hilg.v06n06p159
- Stato Quotidiano. (2016, Settembre 23). *Costi più che raddoppiati per smaltimento rifiuti nell'inceneritore "Marcegaglia."*. Tratto da Statoquotidiano.it: <https://www.statoquotidiano.it/23/09/2016/costi-piu-che-raddoppiati-per-smaltimento-rifiuti-nellinceneritore-marcegaglia22/492394/>
- Su, X., Zhao, Y., Zhang, R., & Bi, J. (2004). Investigation on degradation of polyethylene to oils in supercritical water. *Fuel Processing Technology*, 85(8-10), 1249–1258. doi:10.1016/j.fuproc.2003.11.044
- Tan, X.-C., Zhu, C.-C., Liu, Q.-K., Ma, T.-Y., Yuan, P.-Q., Cheng, Z.-M., & Yuan, W.-K. (2014). Co-pyrolysis of heavy oil and low density polyethylene in the presence of supercritical water: The suppression of coke formation. *Fuel Processing Technology*, 118, 49–54. doi:10.1016/j.fuproc.2013.08.007
- Taylor, E. L., & Foster, D. (2018, Ottobre 12). *Pine Straw as a Ground Cover Mulch - Can pine straw be used as mulch?* Tratto il giorno Giugno 4, 2021 da Texas A&M Agrilife Extension: <https://agrillifeextension.tamu.edu/library/landscaping/pine-straw-as-a-ground-cover-mulch/>
- Teuten, E. L., Saquing, J. M., Knappe, D. R., Barlaz, M. A., Jonsson, S., Björn, A., . . . Takada, H. (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 364(1526), 2027–2045. doi:10.1098/rstb.2008.0284
- Thomas, N. ., Clarke, J. ., McLauchlin, A., & Patrick, S. (2010). *Assessing the environmental impacts of oxo-degradable plastics across their life cycle*. Department for Environment, Food and Rural Affairs, London.
- Upadhyaya, M. K., & Blackshaw, R. E. (2007). *Non chemical weed management: Principles, concepts and technology*. Wallingford, England: CABI Publishing. Tratto da https://books.google.it/books?id=6ZFdbOWaA7UC&pg=PA142&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Velandia, M. ., Smith, A. ., Wszelaki, A. ., Galinato, S. ., Marsh, T. ., Velandia, M. ., . . . Marsh, T. (2018). The economics of adopting biodegradable plastic mulch films. doi:10.22004/AG.ECON.302940
- Vergnani, S., & Caruso, S. (2014). 7. 3 RETI ANTI-INSETTO. In R. E. Romagna, *Manuale Basso Impatto*. Tratto da https://agricoltura.regione.emilia-romagna.it/fitosanitario/temi/difesa-sostenibile-delle-produzioni/uso-sostenibile/prodotti-fitosanitari/copy_of_prodotti-fitosanitari/Manuale-basso-impatto/documenti/indice
- Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., & Gowda, A. N. (2016). Toxic pollutants from plastic waste- A review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 701–708. doi:10.1016/j.proenv.2016.07.069

- Vidogbéna, F., Adégbidi, A., Tossou, R., Assogba-Komlan, F., Ngouajio, M., Martin, T., . . . Zander, K. K. (2015). Control of vegetable pests in Benin - Farmers' preferences for eco-friendly nets as an alternative to insecticides. *Journal of Environmental Management*, 147, 95–107. doi:10.1016/j.jenvman.2014.09.010
- Vohlídal, J. (2021). Polymer degradation: a short review. *Chemistry Teacher International*, 3(2), 213-220. doi:10.1515/cti-2020-0015
- Wang, X., Ding, B., Sun, G., Wang, M., & Yu, J. (2013). Electro-spinning/netting: A strategy for the fabrication of three-dimensional polymer nano-fiber/nets. *Progress in Materials Science*, 58(8), 1173–1243. doi:10.1016/j.pmatsci.2013.05.001
- Wortman, S. E., Kadoma, I., & Crandall, M. D. (2016). Biodegradable plastic and fabric mulch performance in field and high tunnel cucumber production. *HortTechnology*, 148(155), 148–155. doi:10.21273/HORTTECH.26.2.148
- Yang, G., Guo, Z., Ji, H., Sheng, J., Chen, L., & Zhao, Y. (2018). Application of insect-proof nets in pesticide-free rice creates an altered microclimate and differential agronomic performance. *PeerJ*, 6:e6135. doi:10.7717/peerj.6135
- Zhang, H., Flury, M., Miles, C., Liu, H., & DeVetter, L. (2020). Soil-biodegradable plastic mulches undergo minimal in-soil degradation in a perennial raspberry system after 18 months. *Horticulturae*, 6(3), 47. doi:10.3390/horticulturae6030047
- Zhang, S., Liu, H., Tang, N., Yu, J., & Ding, B. (2019). Electronetting. In *Electrospinning: Nanofabrication and Applications* (p. 249–282). Norwich, CT: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-323-51270-1.00008-X
- Zhao, F.-J., Ma, Y., Zhu, Y.-G., Tang, Z., & McGrath, S. P. (2015). Soil contamination in China: current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 49(2), 750–759. doi:10.1021/es5047099
- Zou, X., Niu, W., Liu, J., Li, Y., Liang, B., Guo, L., & Guan, Y. (2017). Effects of residual mulch film on the growth and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.). *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(2). doi:10.1007/s11270-017-3255-2