



FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**DEGRADACIÓN AMBIENTAL DE PELÍCULAS DE ACOLCHADO
BIODEGRADABLES DE USO AGRÍCOLA**

Autor: Celia Rinaldi Blanco

Tutor: Alice Luminita Petre Bujan

2021

Resumen

La utilización de películas plásticas de acolchado ha supuesto un gran avance en la producción agrícola. Sin embargo, los plásticos convencionales utilizados en esta práctica provocan numerosos impactos para el medio ambiente: la generación de microplásticos que por su recalcitrancia no pueden ser eliminados correctamente por los organismos del suelo, la liberación de aditivos tóxicos para la microfauna, impactos sobre la estructura edáfica y el funcionamiento del suelo. Por ello, la utilización de plásticos biodegradables es una alternativa que no solo no afecta negativamente a la eficiencia del acolchado agrícola, sino que no genera impactos sobre el medio ambiente por la ausencia de residuos plásticos tras la temporada de cultivo, ya que desaparecen por completo al ser mineralizadas a CO₂, agua y biomasa. Dentro de las películas biodegradables podemos distinguir entre aquellas que contienen enlaces éster en su estructura, susceptibles a la acción de las enzimas esterasas segregadas por los microorganismos (ácido poliláctico, polihidroxialcanoatos, polibutileno succinato, policaprolactona y ácido adípico), y aquellas que contienen en su estructura molecular polisacáridos (celulosa y almidón), cuya degradación es más rápida. Pueden proceder del petróleo o de fuentes renovables, siendo estas las que generan menor impacto sobre el medio ambiente. Existe otro tipo de películas llamadas oxo-biodegradables, que tienen un mayor impacto que las mencionadas anteriormente por tratarse de películas convencionales con aditivos que aceleran su degradación. El desarrollo de las películas biodegradables se ha incrementado en los últimos años, apareciendo numerosas empresas fabricantes de estos materiales que ofrecen calidad y garantía de sostenibilidad.

Palabras clave: Acolchado agrícola; residuos plásticos; biodegradación de polímeros; sostenibilidad; bioplásticos.

Abstract

The use of plastic mulch films has been a great advance in agricultural production. However, the conventional plastics used in this practice cause numerous negative impacts on the environment: the generation of microplastics that due to their recalcitrance cannot be eliminated correctly by soil organisms, the release of toxic additives for the microfauna, impacts on the edaphic structure and soil functioning. For this reason, the use of biodegradable plastics is an alternative that not only does not negatively affect the efficiency of agricultural mulching, but also does not generate impacts on the environment due to the absence of plastic waste after the growing season, because they completely disappear to be mineralized into CO₂, water and biomass. Within biodegradable films we can distinguish between those that contain ester bonds in their structure, susceptible to the action of esterase enzymes secreted by microorganisms (polylactic acid, polyhydroxyalkanoates, polybutylene succinate, polycaprolactone and adipic acid), and those which contain in their structure molecular polysaccharides (cellulose and starch) with faster degradation. Biodegradable plastic mulches (BDMs) can be prepared from fossil-sourced materials or renewable sources, these last ones being those that generate the lowest environmental impact. There is another type of films called oxo-biodegradable, which have a greater impact than BDMs because they are conventional films with additives that accelerate their degradation. The development of biodegradable films has increased in recent years, with the appearance of numerous manufacturers of these materials that offer quality and guarantee of sustainability.

Keywords: agricultural mulch; plastic waste; polymer biodegradation; sustainability; bioplastics.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Situación actual de la agricultura en el mundo	1
1.2 Consecuencias ambientales de la agricultura industrial	1
1.3 La plasticultura y el acolchado plástico	2
1.4 Ventajas e inconvenientes del acolchado agrícola	3
1.5 Residuos y contaminación generados por la plasticultura	5
2. Objetivos	7
3. Material y métodos	7
4. Discusión	8
4.1 Plásticos convencionales utilizados en el acolchado agrícola	8
4.1.1 Tipos de plásticos	8
4.1.2 Características de las películas plásticas	10
4.2 Películas plásticas sostenibles	11
4.2.1 Tipos de plásticos biodegradables	11
4.2.2 Plásticos oxo-biodegradables	15
4.3 Degradación de plásticos biodegradables frente a convencionales	15
4.3.1 Degradación abiótica	17
4.3.2 Biodegradación	18
4.3.3 Impacto ambiental de las películas convencionales	22
4.3.4 Ensayos de degradación de plásticos biodegradables	24
5. Conclusiones	25
6. Bibliografía	26
ANEXO I: Mar de plástico en zonas de España	34
ANEXO II: Estructura molecular de polímeros biodegradables y no biodegradables utilizados en acolchado plástico agrícola	35
ANEXO III: Marcas de acolchado biodegradable y ensayos	36

1. Introducción

1.1 Situación actual de la agricultura en el mundo

Con el crecimiento poblacional de los seres humanos en el planeta a partir del siglo XX, el consumo de recursos naturales se ha incrementado de la misma forma. El desarrollo de la tecnología ha permitido que el ser humano altere los ecosistemas para su explotación y aprovechamiento. Este suceso nace de la necesidad de alimentar a 7000 millones de personas, y es por eso por lo que el ser humano se ha visto obligado a desarrollar métodos para aumentar la producción de alimentos, aunque a día de hoy sigue existiendo hambruna en muchas partes del planeta. La agricultura supone un pilar fundamental en cuanto al desarrollo y supervivencia humana, y es una de las prácticas que ha ido cambiando, especialmente durante el siglo XX para adaptarse a las necesidades poblacionales, apareciendo la llamada agricultura industrial. Esta consiste básicamente en la utilización intensiva de pesticidas, fertilizantes y agua, así como maquinaria pesada (Lassaletta y Rovira, 2005). Esta agricultura ha supuesto un aumento considerable en la producción de alimentos durante los últimos 50 años, y se calcula que la producción deberá aumentar aún más para el año 2050, ya que se alcanzará la cifra de 9000 millones de habitantes en el planeta (Godfray *et al.*, 2010). Según las Naciones Unidas, 2600 millones de personas dependen de la agricultura, y más del 80% de la dieta está compuesta por productos derivados de ella (arroz, maíz y trigo).

1.2 Consecuencias ambientales de la agricultura industrial

Estas prácticas conllevan consecuencias negativas para el medio ambiente, especialmente por la contaminación que supone el uso de los compuestos químicos ya mencionados. El abuso de fertilizantes químicos ricos en nitrógeno tiene como consecuencia la alteración del ciclo del nitrógeno, ya que en la naturaleza el nitrógeno es un nutriente limitante, pero al introducirlo artificialmente al ecosistema se convierte en una fuente de contaminación, con consecuencias negativas como su lixiviación a las aguas subterráneas, la formación de la lluvia ácida y la eutrofización de ecosistemas acuáticos continentales. Rockstrom (2009) elaboró un marco conceptual definido como

límites planetarios que “delimitan un ámbito de actividad seguro para los seres humanos respecto de la resiliencia de la biosfera; en otras palabras, establece la capacidad de la biosfera para recuperarse de las perturbaciones (ocasionados principalmente por las actividades humanas) y regresar a un estado estable”. Es tal la contaminación de compuestos nitrogenados causada por el ser humano, que se ha rebasado considerablemente el límite planetario del ciclo del nitrógeno. Por otro lado, la práctica de agricultura intensiva conlleva una pérdida de nutrientes del suelo, lo que rompe la estructura edáfica del mismo y lo deja vulnerable a la erosión. La desertificación también es un problema derivado de la agricultura intensiva, ya que los cultivos requieren de una gran cantidad de agua para riego. Esto desemboca en la extracción masiva de agua del subsuelo a través de pozos, causando la desconexión de los acuíferos de sus respectivas aguas superficiales y por ello la desecación de numerosos humedales. Un caso muy conocido de este suceso es el ocurrido en las Tablas de Daimiel, un humedal perteneciente al río Guadiana que ha reducido considerablemente su extensión por ser explotado masivamente al extraer agua de pozos para regadío. La pérdida de tierras por sequía y desertificación se estima en 12 millones de hectáreas por año, y el 52% de las mismas se encuentra afectada por la degradación del suelo (Naciones Unidas, 2012). Por otro lado, la aparición de la plasticultura como una nueva técnica de agricultura intensiva ha fomentado la aparición de otros factores contaminantes sobre el medio agrícola, perjudiciales para suelos y aguas.

1.3 La plasticultura y el acolchado plástico

La plasticultura tiene su origen a finales de los años 1930, cuando se produce el descubrimiento del polietileno (PE), polímero resultado de la polimerización del etileno. En la agricultura era común la utilización de materiales muy costosos y duros de trabajar, como el metal, y a raíz de este descubrimiento, a principios de la década de 1950 se produjo la introducción del polietileno en forma de distintas herramientas (tubos de riego, mantillo, películas plásticas, invernaderos...) que no solo permitían un ahorro en los costes económicos, sino también un menor esfuerzo físico y que supuso un gran avance (Lamont, 1999). La plasticultura es definida por FICAPLAST (Federación de la industria centroamericana del plástico) como “La técnica de utilizar plásticos en procesos agrícolas, con la

finalidad de incrementar los rendimientos, la calidad de la producción y, lo más importante, lograr cosechas fuera de temporada. Además, contribuye a optimizar los recursos, tales como el agua, los suelos, los fertilizantes y la mano de obra". El acolchado agrícola o "*mulching*" es una práctica dentro de la plasticultura agrícola. El término se refiere a aplicar una capa de un material, generalmente plástico, sobre un suelo agrícola con el objetivo de protegerlo y por consiguiente las plántulas o brotes, aislándolos de las condiciones del medio y creando modificaciones en el ambiente donde se cultivan las plantas (Tarara, 2000).

1.4 Ventajas e inconvenientes del acolchado agrícola

Los beneficios del acolchado plástico son:

- Proteger los cultivos de temporal adverso, como las heladas o vientos fuertes, que pueden dañarlos significativamente (Lamont, 1999).
- Conseguir un uso más eficiente del agua ya que evitan la evaporación y aumentan la humedad del suelo. La disminución de la evaporación disminuye a su vez la salinidad causada por la acumulación de sales en la superficie del suelo, y favorece que el flujo del agua sea descendente y se produzca un lavado del suelo (Zribi, Faci y Aragües, 2011).
- Mantener la temperatura edáfica idónea para la germinación de semillas, disminuyendo la fluctuación entre los máximos y mínimos especialmente en los primeros 15 cm de profundidad del suelo, lo que impulsa a un mayor crecimiento radicular. Esto depende de la composición del plástico, pero generalmente lo que se consigue es una temperatura diurna menor y una nocturna mayor a la del exterior, ya que por el día reduce el paso de calor, y a su vez va acumulándolo por efecto invernadero, y por la noche reduce el paso de este calor acumulado al exterior (Zribi, Faci y Aragües, 2011).
- Extender la temporada de crecimiento de los cultivos al crear un efecto invernadero en el suelo (Lamont, 1999).
- Prevenir la pérdida de nutrientes del suelo, al ser una barrera contra los agentes atmosféricos que causan la erosión del suelo, como las gotas de lluvia o el viento (Zribi, Faci y Aragües, 2011).
- Favorecer la proliferación de microorganismos beneficiosos en el suelo que aumentan la disponibilidad de nutrientes, lo que reduce la necesidad de fertilización (Weimer, 2015). Estos microorganismos producen la

degradación de materia orgánica, lo que forma compuestos que son cementantes y le otorgan una mayor estabilidad al suelo. La actividad de estos microorganismos aumenta la porosidad del suelo, lo que es beneficioso para su aireación y para el sistema radicular de las plantas (Zribi, Faci y Aragües, 2011).

- Proteger la cosecha de enfermedades, plagas y malas hierbas competidoras (McKenzie, Lapointe y Duncan, 2001). Se ha comprobado que, con la eliminación del bromuro de metilo como fumigante en los años 2000, por su efecto destructor de la capa de ozono (Bello, 1997), los acolchados son una alternativa menos lesiva para el medio ambiente y que consiguen controlar con éxito las poblaciones que atacan al cultivo (nematodos, hongos, maleza...) e impedir los escapes de gases fumigantes a la atmósfera (Gilreath *et al.*, 2003).

Sin embargo, a pesar de todas las ventajas y beneficios que tienen las películas plásticas utilizadas en el acolchado agrícola, existen numerosos inconvenientes en el uso de esta práctica:

- La utilización de plásticos conlleva un alto coste de adquisición, transporte, mano de obra, mantenimiento y eliminación. En ocasiones, es necesario incluso maquinaria especializada para su instalación y/o recogida. Además, existe el riesgo de que se rasgue o se pierda por el viento, lo que incrementa los costes al tener que reponerlo.
- En ocasiones, el acolchado plástico puede aumentar la proliferación de algunos organismos invasores como, por ejemplo, roedores y otras plagas, al aportar un microclima apto para su propagación (Zaragoza, 2003).
- Pueden surgir problemas relacionados con exceso de calor, falta de ventilación y refrigeración, así como de condensación dentro de los acolchados plásticos (Wittwer, 1993). Esto puede desembocar en cambios en la biocenosis edáfica, al modificar el metabolismo de carbono y nitrógeno, además de potenciar la formación de micotoxinas y gases tóxicos (Steinmetz *et al.*, 2016).

El material que suele utilizarse en el acolchado agrícola es el plástico. También se utilizan otros materiales de origen orgánico como la corteza de pino, ramas trituradas, compost, estiércol, pastos secos, etc, y otros de origen mineral, como la gravilla volcánica (Ucles, 2011), pero no es tan común como el plástico, ya que

este tiene una mayor eficiencia en cuanto a la protección de los cultivos. Además, sus costes son menores, ya que el acolchado orgánico y mineral requiere de cantidades grandes para su aplicación (el espesor aplicado sobre el suelo debe ser de 10 a 15 cm), y el transporte puede volverse costoso (Ucles, 2011). La degradación de algunos tipos de acolchado orgánico es más rápida, por lo que hay que reponerlo con mayor frecuencia (ISA, 2009). También tienen otros inconvenientes, por ejemplo, el acolchado derivado de madera puede causar alelopatía negativa, lo que significa que puede influir en el crecimiento y la supervivencia del cultivo, o incluso una inmovilización de los nutrientes del suelo. Además, los acolchados orgánicos no protegen de insectos perjudiciales para los cultivos (Ucles, 2011).

1.5 Residuos y contaminación generados por la plasticultura

La utilización de plásticos en la agricultura es un problema a nivel mundial ya que proceden de fuentes no renovables, principalmente del petróleo. El proceso de producción y refinamiento de los plásticos es muy contaminante, ya que se liberan compuestos orgánicos volátiles y gases de efecto invernadero como el CO₂. Por ejemplo, durante la producción del polímero de PE se puede llegar a emitir hasta 7150 Kg CO₂/tonelada métrica (PlasticsEurope, 2020).

La gestión de los residuos plásticos generados por la plasticultura en muchos países no se realiza adecuadamente. Se ha estimado que al año se producen en el mundo entre 2 y 3 millones de toneladas de plásticos en agricultura (Kyrikou y Briassoulis, 2007), y muchos estudios predicen que en este año 2021 la producción de películas plásticas llegará a los 7,5 millones de toneladas (Sander, 2019). En el año 2020, los plásticos agrícolas suponen un 16% del total de plásticos generados a nivel mundial, y España produce el 14% del total de plásticos agrícolas de Europa, siendo el líder en el mercado de producción, seguida de Italia, Alemania, Francia y Reino Unido (PlasticsEurope, 2020). Dentro de España, las provincias con mayor tasa de producción de residuos plásticos agrícolas son Murcia y Andalucía, y un 32% son plásticos de acolchado, que son más sucios y complejos de reciclar que los plásticos procedentes de invernaderos, ya que estos se mezclan con las sustancias del suelo, lo que dificulta su correcto reciclaje. En total, representan 674000 toneladas, siendo mucho mayor su volumen (cicloplast, 2017). En el litoral Mediterráneo,

especialmente en algunas zonas de la costa de Murcia y Almería, encontramos el paisaje llamado “mar de plástico” ya que se trata de extensiones de muchas hectáreas que se encuentran total o parcialmente cubiertas por películas de plástico e invernaderos (ver Anexo I). La agricultura intensiva que emplea estos materiales plásticos es una de las principales causas de contaminación del litoral. Esto provoca una preocupación social e incluso el conflicto, como sucede en el municipio de Lorca (Región de Murcia) donde desde el 27 de enero del 2020 iba a aprobarse una ordenanza municipal para la gestión del plástico agrícola, pero aún a día de hoy no se ha aprobado (IU-verdes Lorca, 2021). A pesar de esto, ya existe legislación que trata de regular el abandono de estos residuos plásticos, como la Ley 1/2018 de 7 de febrero, de *medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental de entorno del Mar Menor*, que tipifica como infracción grave no recoger los residuos plásticos utilizados en las actividades agrarias para transferirlos a un gestor de residuos autorizado.

Además de la complicada gestión a la que tienen que ser sometidos los residuos plásticos, uno de los problemas más notorios que presentan es que una gran fracción de estos plásticos terminan en los ecosistemas marinos y terrestres, donde su degradación es lenta, especialmente en el medio marino. Durante su degradación, los plásticos convencionales liberan tóxicos al medio ambiente que degradan los suelos y aguas, e incluso pueden ser ingeridos por organismos (Subramani, Rajadurai y Prasath, 2014).

Por todo lo que conlleva el uso de plásticos convencionales en la agricultura, se plantean dos metas para la sostenibilidad de estas prácticas agrícolas:

- La producción de películas de acolchado sin usar fuentes de carbono, es decir, que provengan de fuentes renovables.
- Elaboración de materiales que sean capaces de llegar a una degradación completa al final de su ciclo de vida.

La Unión Europea impulsa estas metas desde la competitividad, el crecimiento económico sostenible y la creación de puestos de trabajo, para así realizar una transición hacia la economía circular (Valentín y Bernal, 2018). Además, la agricultura es transversal dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ya que afecta a la pobreza, al hambre, a la pérdida de biodiversidad, al cambio climático, a los usos del agua, a la desertificación, a la vida terrestre, y por ello es fundamental para la sostenibilidad en el planeta.

2. Objetivos

Debido a la gran importancia que han adquirido los plásticos de acolchado en la agricultura a nivel mundial y especialmente en España, es importante considerar que su uso a día de hoy es imprescindible. Sin embargo, la mala gestión de los residuos generados por esta práctica y el impacto que generan sobre el medio ambiente ha generado un creciente interés desde la comunidad científica que impulsa a realizar investigaciones acerca de alternativas al uso de estos plásticos. Este Trabajo Fin de Grado es un estudio bibliográfico que tiene como objetivo analizar los procesos de degradación de las películas de acolchado biodegradables para su utilización como alternativa a las películas convencionales en la agricultura. Para ello, se recopilará información relevante con respecto a las películas biodegradables y convencionales y las diferencias que existen durante su degradación, así como sus impactos medioambientales. Se consultarán y contrastarán estudios de degradación realizados por diferentes autores, permitiendo obtener conclusiones acerca de las alternativas con mayor viabilidad y sostenibilidad de cara al futuro.

3. Material y métodos

Tras revisar y analizar profundamente las distintas fuentes de información disponibles acerca de este tema, se han seleccionado las más importantes atendiendo a criterios de relevancia y calidad, así como otras fuentes adicionales que aportan información útil y relevante para desarrollar este trabajo, como pueden ser páginas web de distintas empresas fabricantes de películas de acolchado para la agricultura.

La bibliografía utilizada se compone principalmente de artículos escritos por autores especializados en química ambiental, los cuales aportan las ideas principales del tema en cuestión. Se ha hecho uso principalmente de bibliografía internacional en inglés y español, debido al alcance que tiene hoy en día la problemática de los plásticos y el medio ambiente. También se ha hecho uso de la normativa internacional relacionada con la degradación de las películas de acolchado. Para ello se han utilizado los motores de búsqueda bibliográfica Google Scholar, Dialnet, Web of Science y la biblioteca virtual de la UAH, con filtros adecuados y operadores booleanos para seleccionar los artículos con

mayor relevancia. Una vez reunida y analizada toda la información a utilizar, se ha desarrollado el trabajo de forma que se atiende a todos los aspectos fundamentales del tema, abarcándolo de la manera más amplia posible.

4. Discusión

4.1 Plásticos convencionales utilizados en el acolchado agrícola

Desde la aparición del polímero de polietileno, la utilización de este tipo de plástico se ha disparado de forma exponencial, además de otros tipos de plásticos que también son utilizados en esta práctica. A continuación, se explicarán los principales polímeros utilizados en el acolchado agrícola y otros que, si bien ya no se utilizan en esta práctica, fueron utilizados en el pasado o son de interés.

4.1.1 Tipos de plásticos

Los plásticos son polímeros, es decir, uniones de cientos o miles de moléculas que forman cadenas. Estos pueden estar formados por un solo tipo de monómero (homopolímero) o por distintos tipos (copolímero). El polímero más utilizado en el acolchado agrícola es sin duda el polietileno en diferentes formas, en especial el polietileno de baja densidad (LDPE) y baja densidad lineal (LLDPE). Se utilizan también en menor medida el polipropileno, las láminas de copolímero de etileno y acetato de vinilo, EVA (esta especialmente se utilizaba hace años) y el policloruro de vinilo (Anexo II). Estos polímeros proceden de fuentes fósiles, concretamente de derivados del petróleo fósil, el gas natural y el carbón (Chamas *et al.*, 2020). Todos estos plásticos se encuentran englobados dentro de la categoría de “termoplásticos”, ya que se funden al calentarlos y al enfriarse vuelven a ser sólidos.

Polietileno (PE): Es el más conocido y usado en agricultura. Su relación calidad precio es muy buena y sus costes bajos. Antiguamente, se utilizaba sin aditivos, por lo que las láminas de acolchado eran muy sensibles a su deterioro por radiación solar. Hoy en día se le ha dotado de diversas propiedades que permiten su larga duración, es decir, es un material muy recalcitrante y con propiedades similares a las de otros materiales más costosos (de Pedro, 1987).

Lo más común es que las películas de acolchado estén hechas de LDPE y/o LLDPE, que son materiales densos, pero no tanto como el PE de alta densidad (HDPE) (Plastisax, 2021). Es más flexible, pero sigue siendo rígido y resistente a los impactos y al calor, así como a la aplicación de productos químicos (Repsol, 2021). El LDPE se diferencia del LLDPE en que este último resiste mejor el estrés ambiental, la tracción y la perforación. El LDPE es más flexible y transparente que el LLDPE (Robertson, 2006).

Polipropileno (PP): Es ligero y versátil. Puede llevar componentes que aumenten la protección frente a rayos UV (Repsol, 2021). Es más rígido y duro que el PE, y proporciona una barrera protectora frente a la evaporación. Al calentarse se vuelve flexible, y al enfriarse vuelve a su rigidez (Plastisax, 2021). El polietileno y el polipropileno, son conocidos también por el nombre de poliolefinas, cuyo significado radica en la polimerización de olefinas (alquenos). Las olefinas, con fórmula general C_nH_{2n} , son hidrocarburos que presentan al menos un doble enlace entre átomos de carbono contiguos.

Cualquier material puede tener estructuras moleculares amorfas y/o cristalinas. Los polímeros suelen contener ambos tipos de estructuras, ya que sus cadenas son de una longitud considerable y se cruzan entre sí, por lo que existirán zonas en las que encontremos la cadena ordenada, es decir, zonas cristalinas, y zonas en las que se encuentren desordenadas, amorfas. Sin embargo, no todos los polímeros contienen el mismo número de estructuras amorfas/cristalinas. En el caso del PE, el porcentaje de zonas cristalinas es muy alto, mayor que en el PP (Textoscientíficos, 2021; PlasticsEurope, 2020).

Otros polímeros utilizados en aplicaciones agrícolas son:

Copolímeros EVA (Etilvinilacetato): Se trata de un material termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo cuyas propiedades dependen directamente del contenido de acetato de vinilo que presenten. Este copolímero es muy buen termoaislante, incluso mejor que el PE “virgen”, y cuando el contenido de acetato de vinilo es elevado, se potencia aún más esta característica. Sin embargo, en regiones calurosas como el sur de España esto no es tan beneficioso, ya que produce la dilatación del plástico y su rotura (de Pedro, 1987).

Policloruro de vinilo (PVC): Es liviano, resistente al impacto y versátil. Es muy longevo y se utiliza en tuberías que conducen agua potable, puertas y ventanas,

entre otros (Plasticoscj, 2021). No es tan común que se utilice en películas de acolchado agrícolas.

4.1.2 Características de las películas plásticas

Las películas de acolchado agrícola suelen tener un espesor que va de 12 a 80 micras, y una anchura máxima de unos 3 metros (Espí *et al.*, 2006). Los films hechos con copolímeros EVA, son más flexibles y elastoméricos que los de PE, pero más frágiles (Repsol, 2021). Después, encontramos aquellos acolchados de LLDPE que están metalizados, es decir, contienen una capa muy delgada de aluminio (<1% del peso del rollo) que da protección extra al cultivo. Por último, tenemos los plásticos para desinfección VIF (Virtually Impermeable Film) y TIF (Totally Impermeable Film), que son plásticos de 5-7 capas con estructura similar, siendo las exteriores de LDPE. Se diferencian en que la capa central del plástico VIF es de Nylon y la del TIF es de EVOH, lo que les otorga una capacidad de aislamiento mucho mayor que los mencionados anteriormente (Intergro, 2021). Es por eso por lo que estos plásticos se utilizan principalmente para aplicar desinfectantes al suelo (pesticidas o herbicidas) debido a su potencial aislante, lo que permite que el desinfectante no escape a la atmósfera y cause riesgos agudos y crónicos en la salud de los trabajadores del campo y las comunidades cercanas. Anteriormente estos plásticos para desinfección (fumigación) se utilizaban con bromuro de metilo, fumigante usado comúnmente, un gas reductor de la capa de ozono cuyo uso ha sido prohibido (Protocolo de Montreal de 1997) en favor de alternativas eficaces y menos dañinas para el ozono (López, 1998).

Los colores de los acolchados plásticos también influyen en la eficiencia del cultivo. El color negro es el más común, y al absorber la luz solar produce un aumento considerable de la temperatura del suelo, en ocasiones de más de 20°C. Bloquea la entrada de luz solar, lo que reduce la presión de las malas hierbas. Los acolchados de colores claros o transparentes dejan pasar la luz, y los blancos son recomendables para lugares en los que las temperaturas y la radiación UV son muy altas. Las películas metalizadas dejan pasar la luz, y proporcionan un rango de temperatura más estrecho entre el día y la noche. Por último, también se utilizan plásticos de tonalidades verdes y marrones, gracias a los cuales algunos rangos de luz necesarios para la maleza son bloqueados, lo

que impide su crecimiento. En comparación, proporcionan temperaturas más altas que los anteriores, aunque no más que los de color negro (Espí *et al.*, 2006; Intergro, 2021).

4.2 Películas plásticas sostenibles

Para conseguir el objetivo que plantean las metas de sostenibilidad, existen distintas opciones en cuanto a plásticos sostenibles: los plásticos biodegradables y los oxo-biodegradables.

4.2.1 Tipos de plásticos biodegradables

Los plásticos biodegradables o bioplásticos son aquellos que pueden ser completamente asimilados por los microorganismos, liberando todo el carbono de la estructura del plástico en forma de CO₂ (Castellón, 2010). Dentro de este gran grupo, encontramos:

Plásticos Biobasados: son aquellos cuya base son fuentes renovables. Estos incluyen los plásticos que proceden de biomasa como los polisacáridos (almidón, celulosa..) y las proteínas (queratina, colágeno..), y aquellos que proceden de la fermentación por parte de microorganismos de recursos renovables (Remar, 2011; Castellón, 2010; European Bioplastics, 2021). Esto es posible gracias a la bioingeniería y a las bio-refinerías, y a pesar de que estos plásticos han tenido bastante éxito, solo ocupan un 1% de todos los plásticos del mercado. El proceso de obtención de polímeros sostenibles ahorra un 50% del gasto de energía de fuentes no renovables y reduce en un 75% las emisiones de gases de efecto invernadero (Valentín y Bernal, 2018).

Plásticos compostables: son aquellos que son biodegradables en condiciones de humedad, temperatura y medio de compost (Castellón, 2021). Estos se encuentran dentro del grupo anterior. El uso del compost es muy importante frente a la pérdida de suelo, uno de los problemas principales a nivel mundial. Son necesarios de 200 a 1000 años para formar 2,5 cm de suelo, por lo cual la utilización de compost es beneficiosa, ya que al aplicar materia orgánica extra se consigue la proliferación de organismos del suelo como los gusanos de tierra, muy beneficiosos para la formación y estructuración del suelo. Además, los beneficios también incluyen la retención de agua y nutrientes, la reducción de la

necesidad de utilización de fertilizantes y la supresión de enfermedades de las plantas por déficit de nutrientes (Narayan y Balakrishnan, 2009).

Recientemente, la Cooperativa Agrícola de Benicarló, junto a la Agència Valenciana de la Innovació (AVI), han llevado a cabo una iniciativa de desarrollo de plásticos sostenibles para uso agrícola llamada *Agro +*, para mejorar la gestión de estos residuos plásticos, ya que se pretende valorizarlos mediante el compostaje. De esta manera, podrán ser reintroducidos como abono en el cultivo agrícola. El objetivo es mejorar los tiempos de degradación de las películas y así conseguir una mejora de la calidad del compost. Se probará en cultivo de tomate, alcachofa y cítrico (Ediciones plaza, 2021).

Los polímeros más utilizados en acolchado agrícola procedentes de fuentes biodegradables son (Anexo II):

Polímeros derivados del almidón: El almidón puede encontrarse en diferentes raíces, frutos, semillas, tubérculos, bacterias, etc, y su estructura varía según su fuente de procedencia. Cada gránulo está formado por moléculas de amilosa y amilopectina, normalmente en proporción 20%-80% respectivamente, que se forman a su vez por moléculas de glucosa (Meneses, Corrales y Valencia, 2007). Los polímeros de almidón tienen una alta densidad, aunque presentan baja resistencia frente a disolventes y aceites. Puede combinarse con otros biopolímeros creando resinas híbridas de almidón, que aumenta su resistencia (Remar, 2011).

Ácido poliláctico (PLA): se obtiene a partir de ácido láctico mediante polimerización química o síntesis fermentativa. Es un termoplástico rígido, pero puede comportarse como el PE, en cuanto a flexibilidad (Garces y Hernández 2020). Los polímeros de PLA con altos grados amorfos presentan baja resistencia al impacto, pero por lo general, sus propiedades se asemejan al PE. Se degrada rápidamente a temperaturas por encima de 50/60°C y resiste a grasas y aceites, así como a la radiación UV (Remar, 2011).

Polímeros derivados de la celulosa: Están compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina. Se puede encontrar en muchas fibras naturales como en la caña de azúcar, el cáñamo, algodón, lino, etc (Garces y Hernández, 2020). Son más resistentes a la hidrólisis que el almidón, y presentan propiedades similares (Remar, 2011). Las películas de papel son una alternativa no tan utilizada ni conocida frente al acolchado convencional. Proporcionan una

permeabilidad parcial a la lluvia, pero reducen la evaporación del agua en el suelo, aunque en menor medida que el acolchado convencional (Saglam *et al.*, 2017). Esto es una ventaja, ya que al penetrar el agua a través del film puede reducirse el riego en épocas de lluvia. La desventaja que presentan los films agrícolas de papel es que son más susceptibles a ser rasgados y perforados, además de que se degradan más rápidamente, especialmente en zonas en las que se entierran por completo (Briassoulis y Giannoulis, 2018). Existe un proyecto llamado LifeAgroPaper de desarrollo de una película de papel para agricultura llamada AgroPaper®, fabricada con fibra de pinos de bosques en el norte de España, que se gestionan de forma sostenible.

Polihidroxicanoatos (PHAs): Proceden de la fermentación de una fuente de carbono renovable por un microorganismo que almacena estos ácidos hidroxialcanoicos como fuente de reserva, y posteriormente una polimerización química de los ácidos hidroxialcanoicos por acción de enzimas intracelulares (Garces y Hernández, 2020; Remar, 2011). Los PHAs son ricos en enlaces éster, por ello se consideran biopoliésteres (Garces y Hernández, 2020). Sus propiedades se asemejan mucho a las del PE, siendo termoplásticos y elastómeros, insolubles en agua, y con buena resistencia (Remar, 2011). Son una de las mejores alternativas a los films convencionales, ya que sus costes son prácticamente nulos al ser sintetizados por microorganismos a partir de sustratos renovables (Garces y Hernández, 2020).

Por otro lado, existen plásticos biodegradables no procedentes de fuentes renovables, ya que en ocasiones es necesario añadir aditivos de origen sintético que permitan la biodegradación, o incluso que todo el polímero sea sintético pero biodegradable, y reciben el nombre de “polímeros biodegradables sintéticos” (European Bioplastics, 2021; Remar, 2011). La ventaja de los plásticos biodegradables y biobasados frente a los biodegradables sintéticos, es que a pesar de que el petróleo realmente procede de fuentes naturales, existe un gran desequilibrio entre la tasa de renovación de los combustibles fósiles (1-10 años) frente a la tasa de consumición (>1 millón de años) (Narayan y Balakrishnan, 2009).

Dentro de aquellos biodegradables no procedentes de fuentes renovables los más destacados en el acolchado agrícola son:

Polibutileno Succinato (PBS): Se produce mediante la policondensación térmica del ácido succínico con 1,4-butanodiol. Presenta resistencia térmica y química y una procesabilidad muy buena, con bajo coste. No deja pasar los gases a través de la película (Sinha, Okamoto y Okamoto, 2003).

Policaprolactona (PCL): Es un componente miscible con otros compuestos, ya sean plásticos u otros como el almidón. Presenta una alta flexibilidad e hidrofobicidad. Sin embargo, este compuesto es algo costoso para ser utilizado a gran escala (Wu, 2003). Dentro del programa LIFE, que es un instrumento de la UE que financia proyectos medioambientales, existe un proyecto a nivel europeo llamado “Multibiosol”, que pretende crear plásticos biodegradables para el acolchado agrícola (*mulching*) con un impacto medioambiental bajo, que permitan la eliminación de residuos y la mejora del suelo. Los materiales utilizados en este proyecto son los polihidroxicanoatos y la policaprolactona mezclada con almidón de distintas procedencias, como maíz, patata, aceite vegetal y cereales (Redondo, 2017). Este proyecto se lleva a cabo en Zaragoza, y contó con un presupuesto de 2036680 euros, habiendo contribuido la UE con 1222002 euros. Los resultados de los ensayos llevados a cabo con estas películas se recogen en la tabla 2 del Anexo III.

Ácido adípico: Se produce a partir del ciclohexano y se suele utilizar en la fabricación de fibras textiles como el nylon, aunque también se utiliza junto con algunos lubricantes, adsorbentes, resinas sintéticas, etc. Es ligeramente soluble en agua, y totalmente soluble en alcohol. Su fabricación tiene un gran impacto sobre el medio ambiente por generar óxido nitroso, además de ser un proceso de bajo rendimiento. Sin embargo, se están estudiando otros métodos de producción biológicos a partir de sacarosa convertida en ácido adípico por la bacteria *Escherichia coli* (Núñez, 2016).

Poliamidas (PA): están formadas por condensación de ácido adípico y hexametildiamina. Pueden obtenerse a partir del petróleo, que es lo más común (Nylon), pero el proceso de obtención a partir de recursos naturales como la lana o la seda hacen que su coste sea alto, por lo que no es muy utilizado en acolchado biodegradable (Remar, 2011).

4.2.2 Plásticos oxo-biodegradables

Los plásticos oxo-biodegradables están formados por polímeros de plásticos convencionales, a los cuales se les añaden aditivos llamados prodegradantes o pro-oxidativos, formados por sales de cobalto, manganeso y hierro, incorporados a las cadenas en proporción de 1 a 5% (Markowicz y Szymańska-Pulikowska, 2019). Estos no alteran la calidad del polímero, ni son tóxicos para el medio ambiente, y a su vez provocan que la fragmentación de las cadenas se acelere, para así ser más susceptibles a la degradación biótica (Castellón, 2011). Para que se produzca la activación de los aditivos que se encargan de fragmentar las cadenas del polímero, es necesario que haya un “estímulo”, como puede ser la influencia de la luz UV o el calor. Sin embargo, estos aditivos no siempre garantizan que el plástico se descomponga por completo, y es necesaria la acción de los microorganismos junto con otros factores abióticos para completar la degradación (Markowicz y Szymańska- Pulikowska, 2019).

Es importante distinguir estos plásticos de los oxodegradables, prohibidos en 2019 por la UE, a causa de que no se biodegradan por completo, sino que se fragmentan en microplásticos que por su bajo peso molecular no pueden ser mineralizados en biomasa, agua y CO₂, pudiendo quedar en suspensión y ser inhaladas, con efectos negativos para la salud (Abdelmoez *et al.*, 2021).

4.3 Degradación de plásticos biodegradables frente a convencionales

Aún no se comprenden detalladamente algunos de los mecanismos por los que ciertos plásticos se degradan en diferentes ambientes, y son el objeto de numerosos estudios que se han llevado a cabo en las últimas décadas.

Las películas plásticas se fabrican con el método de extrusión de película soplada, a temperaturas de unos 200°C. Tras su fabricación, comienza la degradación durante el tiempo en el que se utiliza, es decir, en el periodo de vida útil del plástico. Es importante distinguir este periodo de la degradación después de la vida útil del plástico, ya que en este momento la degradación va a estar relacionada directamente con las diferentes formas de eliminación empleadas por el ser humano. En este punto distinguimos la degradación ambiental, que se produce de forma natural por los organismos del suelo y los factores abióticos del entorno, de otros tipos de degradación como puede ser por ejemplo la

incineración, que no se considera ambiental, sino un proceso físico (Kyrikou y Briassoulis, 2007).

Las poliolefinas son compuestos duraderos y difíciles de degradar debido a que presentan una gran inercia biológica y química. Esto sucede debido a distintos factores como su elevado peso molecular, la estabilidad de los enlaces covalentes entre carbonos contiguos, muy difíciles de romper, su hidrofobicidad, y que no presenten grupos funcionales que sean susceptibles a ser atacados por los factores abióticos del entorno y la microbiota del suelo. Como la aparición de estos componentes es muy reciente, los microorganismos no han desarrollado aún enzimas eficientes capaces de degradarlos (Chamas *et al.*, 2020; Danso *et al.*, 2019). Por el contrario, los plásticos biodegradables o bioplásticos son aquellos que pueden ser completamente asimilados por los microorganismos, liberando todo el carbono de la estructura del plástico en forma de CO₂ (Castellón, 2010). De hecho, para poder considerar una película plástica como biodegradable, existen unos requisitos recogidos en la norma EN ISO 17556, que son:

- Un mínimo de 90% (en valor absoluto) del carbono orgánico del plástico debe de convertirse en CO₂.
- La duración del ensayo no debe ser superior a 24 meses.

En cuanto a la toxicidad, los requisitos que debe cumplir la película según la norma UNE EN 17033:2018 para que los ensayos sean válidos son:

- La tasa de germinación y biomasa vegetal en el suelo expuesto al material debe ser superior al 90% en comparación al suelo que no ha sido expuesto. Si esta desciende de ese umbral, se considerará que el material puede presentar cierta fitotoxicidad durante su biodegradación.
- De igual manera, la mortalidad de lombrices de tierra debe ser inferior al 10% en comparación con el suelo virgen. De ser superior al 10%, podría tratarse de que existe cierta toxicidad durante la biodegradación.
- Por último, la formación de nitritos debe ser de $\pm 20\%$ en comparación con el suelo virgen. De superar este umbral, se considerará la posible existencia de toxicidad durante la biodegradación.

Sin embargo, para que los acolchados biodegradables sean una alternativa realmente competitiva frente a las películas plásticas convencionales, estos deben ser capaces de ser flexibles y resistentes frente a su instalación en el

suelo, así como ser capaces de proporcionar todas las ventajas que tiene el acolchado convencional a un precio económico, sin tener impactos negativos sobre el medio ambiente.

4.3.1 Degradación abiótica

El proceso de degradación comienza con una degradación física, gracias a los factores abióticos del entorno: luz, calor, agua y viento. El periodo durante el cual se mantienen las propiedades mecánicas de la película (tensión, resistencia al impacto y ruptura) se denomina “periodo de inducción” (Weimer, 2015). La degradación abiótica de un plástico es causada principalmente por la introducción de átomos de oxígeno en la cadena del polímero. Esto solo puede ocurrir si esta ha sufrido algún daño o rotura en algún punto previamente, lo cual sucede gracias a los distintos factores del medio abiótico:

Agua: La degradación por la acción del agua es más complicada en películas convencionales ya que no tienen grupos funcionales susceptibles a ser atacados por las moléculas de agua. Por el contrario, algunas películas biodegradables sí que pueden contener componentes solubles en agua. Por ejemplo, la amilopectina, que es un compuesto común en las películas de almidón y es parcialmente soluble en agua caliente (Torres, Durán y Montero, 2012). Sin embargo, otras como el ácido poliláctico son totalmente insolubles en agua. Además, la erosión superficial que causa el agua sobre los polímeros es muy importante ya que reduce el espesor de la película (Haider *et al.*, 2019).

Temperatura: Si el polímero es sometido a altas temperaturas, los componentes de su cadena principal comienzan a sufrir una escisión molecular, para luego volver a reaccionar entre sí, modificándose así sus propiedades. Esto es claramente visible ya que el plástico sufre cambios de color y textura, así como un aumento de fragilidad y agrietamiento (Agboola, 2017).

Radiación UV: La radiación UV también es causante de la degradación del plástico, ya que es una fuente de energía suficiente para romper las cadenas del polímero y permitir la introducción de los átomos de oxígeno. Esto es conocido como fotooxidación (Agboola, 2017). Al añadir átomos de oxígeno a la cadena del polímero, se forman grupos hidroxilo, carbonilo, y/o carboxilo (AP-WASTE, 2021). Los ensayos llevados a cabo por Esmaeili *et al.* (2013), demostraron que

una película expuesta a radiación UV se degradó un 29,5% frente a una no expuesta, que se degradó un 15,8%.

Aditivos: Otro factor a tener en cuenta es la composición “extra” de la película, es decir, la presencia de aditivos (agentes de deslizamiento, estabilizadores, colorantes, rellenos, plastificantes, agentes nucleantes y clarificantes) que agregados en la estructura del polímero facilitan la instalación mecánica del material, proporcionan características específicas del mantillo, que este tenga una resistencia mayor a los factores abióticos del medio durante el ciclo de cultivo y facilitan la (bio)degradación *in situ*, en el suelo, después del uso de mantillo. Los films no modificados presentarán una resistencia menor y por lo tanto una menor durabilidad (de Pedro, 1987).

Región climática: La zona donde se ubique el plástico es muy importante, ya que la variabilidad de temperatura e incidencia de luz UV, otorgarán una mayor o menor durabilidad al polímero. Por ejemplo, las láminas de polietileno “virgen” presentan una duración mayor en zonas del norte de España que en zonas del sur, debido a que en el norte el índice UV y las temperaturas máximas son más bajos que en el sur peninsular (de Pedro, 1987).

pH: El pH es un factor que influye principalmente en la actividad microbiana. Sin embargo, en algunos polímeros biodegradables como el ácido poliláctico, los grupos OH⁻ y H⁺ son capaces de establecer enlaces intramoleculares, especialmente cuando el peso molecular es bajo, degradando el polímero (Lucas *et al.*, 2008).

4.3.2 Biodegradación

En el proceso de degradación intervienen todos los organismos del suelo, distinguiendo aquellos cuyo tamaño es mayor, como pueden ser coleópteros, hormigas, nemátodos, miriápodos, colémbolos, rotíferos, larvas, lombrices, etc; y los microorganismos, como pueden ser bacterias, hongos, protozoos, ácaros y otros. Los organismos de mayor tamaño llevan a cabo una degradación sobre todo mecánica, mediante la escisión de las cadenas del polímero a través de la ingestión, masticación y excreción de los plásticos (Kyrikou y Briassoulis, 2007). Esto implica que aquellas películas cuyas cadenas poliméricas estén formadas por polisacáridos, como sucede en el almidón y la celulosa, serán fácilmente digeribles por estos organismos del suelo. Adicionalmente ocurre que, en la flora

intestinal de algunos organismos del suelo encontramos microorganismos que también son capaces de degradar los plásticos, como ocurre en el caso del *Tenebrio molitor* (AP-WASTE, 2021).

Los microorganismos del suelo son esenciales a la hora de llevar a cabo la degradación de los plásticos. La gran biodiversidad de microorganismos que existe en suelos frente a otros medios naturales hace que su degradación en estos sea más viable, aunque hay que tener en cuenta que dependiendo del tipo de suelo y su ambiente, habrá una mayor o menor riqueza de microorganismos, lo que es proporcional a la capacidad de degradación del plástico (Adhikari *et al.*, 2016; Emadian, Onay y Demirel, 2017). Los microorganismos colonizan la superficie de la película, y cuanto mayor sea la superficie colonizada, mayor será la tasa de degradación del plástico. Es importante destacar que, la colonización de los diferentes microorganismos del suelo depende en gran parte de los nutrientes que tengan disponibles para su crecimiento. Los hongos pueden presentar dificultades para colonizar las películas plásticas ya que estos organismos necesitan nitrógeno para su crecimiento y desarrollo adecuados, y las películas contienen principalmente carbono, por lo cual sería necesario que adquieran el nitrógeno del suelo adyacente (Hodge *et al.*, 2000). Sin embargo, para el crecimiento de bacterias, el nitrógeno no resulta un nutriente limitante. Por otra parte, existe la hipótesis de que los hongos, mediante sus hifas y las bacterias filamentosas, tienen una capacidad mayor de adherirse a los films plásticos que otras bacterias (Sander, 2019). Lo cierto es que, la aparición de hongos está asociada a un pH ácido del suelo. En este medio, el desarrollo de bacterias suele verse reducido y con ello también se reduce la mineralización del suelo, a consecuencia de la disminución en la tasa de fijación del nitrógeno (Astilleros, 2017).

Una vez que los microorganismos forman un biofilm sobre la película, se produce la despolimerización, gracias a la secreción de despolimerasas que permiten la rotura de los enlaces en otros más sencillos que son hidrolizables por los microorganismos del suelo. Este proceso está condicionado por el número de enlaces del compuesto, siendo más rápida la despolimerización en monómeros que en polímeros. También depende de la estructura de los enlaces, ya que, en fases amorfas, donde los enlaces se encuentran desordenados, la escisión es más sencilla que en fases cristalinas, donde los enlaces son fuertes. Las

películas biodegradables contienen ambas estructuras, aunque la cristalinidad es mayor en las poliamidas y en la celulosa (Kuwabara *et al.*, 2002; Textoscientificos, 2021). Las poliolefinas presentan un alto contenido en estructuras cristalinas, en especial el PE, lo que dificulta aún más su degradación. Además, la despolimerización en películas convencionales solo es viable cuando las cadenas del polímero son más susceptibles para ser atacadas por los microorganismos, lo que sucede cuando estas tienen una longitud menor y grupos funcionales que contienen moléculas de oxígeno (Chamas *et al.*, 2020). Posteriormente, los microorganismos van hidrolizando las cadenas resultantes del film mediante hidrolasas extracelulares, que son las encargadas de catalizar la reacción que rompe los enlaces del polímero, mineralizando las moléculas de carbono que son asimiladas por los microorganismos y utilizadas para sus funciones vitales de crecimiento, reproducción y finalmente respiración, liberando CO₂ y agua (Chinaglia *et al.*, 2018). Las esterasas son las hidrolasas más importantes que llevan a cabo este proceso. Concretamente, las cutinasas son un tipo de esterasa que según distintos estudios han sido vinculadas a la degradación de plásticos, ya que el sustrato natural de esta hidrolasa es la cutina, que presenta similitud con la estructura de muchos polímeros semicristalinos (Sander, 2019). Sin embargo, la eficiencia de esta enzima en biopolímeros es mucho mayor, ya que al contrario que el PE o PP, estos contienen enlaces éster que son susceptibles a la hidrólisis completa por parte de las esterasas (Bandopadhyay, 2018). Al igual que la colonización de la superficie de la película, la producción de esta enzima por los microorganismos del suelo depende de los nutrientes que los microorganismos sean capaces de adquirir, especialmente del carbono y nitrógeno (Sander, 2019). Existen otros tipos de enzimas capaces de degradar plástico menos específicas, como las lipasas (capaces de degradar acilglicéridos de cadena larga), lacasas (degradan hidrocarburos aromáticos policíclicos en los combustibles) y peroxidases (encargadas de degradar compuestos como la lignina) (Falero, 2013).

<p>En condiciones aerobias: Polímero + O₂ → CO₂ + H₂O + Biomasa + Polímero residual</p>

<p>En condiciones anaerobias: Similar, pero se libera además CH₄ y materia húmica.</p>
--

Al final de la degradación en plásticos biodegradables, no debe quedar ningún polímero residual, ni ningún compuesto que sea perjudicial para el medio liberado durante la biodegradación del polímero. De hecho, en muchas ocasiones se espera que tras la mineralización del plástico biodegradable el suelo haya recibido aportes de minerales y otros nutrientes que resulten beneficiosos para el cultivo (Tachibana *et al.*, 2009).

Es importante tener en cuenta la influencia de otros factores como la presión atmosférica, concentraciones de ácidos y metales pesados, la presencia de depredadores y el pH. Estos son factores que pueden inhibir el proceso de biodegradación, por ejemplo, reduciendo la concentración de las enzimas encargadas de la catálisis. Si alguno de estos parámetros es superior o inferior a los requerimientos de los microorganismos, el proceso se ralentizará o se detendrá por completo hasta que las condiciones vuelvan a ser favorables (Kyrikou y Briassoulis, 2007).

La cuantificación de la cantidad de polímero mineralizado es complicada, ya que no puede utilizarse el método de “carbon use efficiency” (CUE), debido a que la producción de biomasa de los microorganismos depende en gran medida de los nutrientes presentes en el suelo, y no solo de los obtenidos a partir de la película de acolchado. Otra alternativa, es el uso de cromatografía de permeación en gel (para medir la distribución del peso molecular del polímero) o espectroscopía de resonancia magnética nuclear (elucidación de estructuras moleculares) sobre la película plástica, pero estos métodos sólo cuantifican la cantidad de polímero que ha sido eliminada de la superficie del film, sin tener en cuenta la cantidad del mismo que termina en el suelo. El mejor método para la cuantificación de la mineralización del polímero es mediante la conversión de las moléculas de carbono del polímero en moléculas de CO₂ por respiración de los microorganismos, medida mediante la cromatografía de gases utilizando el método de espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS Isotope Ratio Mass Spectrometry), que analiza la cantidad de CO₂ en una masa gaseosa mediante un flujo que se hace pasar a través de la máquina; o utilizando la espectroscopía de anillo de cavidad sensible al CO₂ liberado por la actividad bacteriana (Sander, 2019).

4.3.3 Impacto ambiental de las películas convencionales

La dificultad de eliminación de las películas convencionales es uno de los problemas más graves en la actualidad. Al retirarlos, estos plásticos pueden rasgarse y de esta forma quedar fragmentos enterrados en el suelo que no son fácilmente biodegradables, poniendo de relieve el carácter recalcitrante de estos materiales. Se ha comprobado que, la presencia de plásticos y microplásticos residuales en el suelo modifica la estructura de la comunidad biológica y disminuye la fertilidad del mismo (Qian *et al.*, 2018; Sander, 2019). Los fragmentos de polietileno parcialmente degradados reducen la infiltración del agua en el suelo y dificultan la germinación de plantas (Bandopadhyay *et al.*, 2018). Se ha calculado que, en China, especialmente en la Región de Xinjiang, existen acumulaciones de películas residuales de polietileno de entre 120 hasta 500 kg por hectárea (Sander, 2019). Además, los aditivos y microplásticos que liberan los plásticos convencionales, ya sea durante su vida útil o a partir de los fragmentos que pueden quedar en el suelo, han demostrado ser tóxicos para la microfauna (Markowicz y Szymanska, 2019; Steinmetz *et al.*, 2016).

Microplásticos: Todos los tipos de microplásticos independientemente de su procedencia, son liberados al medio, terminando en suelo y agua, lo que afecta especialmente a la fauna, ya que en muchas ocasiones son confundidos con comida e ingeridos por todo tipo de organismos. Cuando son ingeridos, los microplásticos tienden a acumularse en el sistema digestivo (especialmente en el intestino), afectando al desarrollo, crecimiento, comportamiento y sistema inmunológico de los individuos, e incluso provocando la muerte (Cao *et al.*, 2017). Además, estos microplásticos tienden a biomagnificarse a través de la cadena trófica.

Los microplásticos también tienen efectos sobre las plantas, ya que son capaces de incorporarse a las membranas celulares a través de endocitosis. Las plantas que contienen estos microplásticos son potenciales transmisores de los mismos hacia el ser humano a través de su ingestión. Además, uno de los principales riesgos que conlleva la ingesta de microplásticos por cualquier organismo radica en la cantidad de aditivos que contiene dicho plástico, causantes de toxicidad sobre la microbiota del suelo (Kumar *et al.*, 2020).

Existen otro tipo de microplásticos llamados microperlas que han sido diseñados a propósito con un tamaño pequeño para ser utilizados en distintos productos de belleza y salud. Sin embargo, la fabricación de productos que contengan estas microperlas fueron prohibidos por la legislación de los Estados Unidos en el año 2015 (National Ocean Service, 2021) que debido a su tamaño no se retienen en los sistemas de tratamiento de aguas residuales pudiendo acabar en aguas superficiales donde los peces pequeños y otros animales salvajes pueden confundirlas con alimentos. Posteriormente fueron prohibidas en Canadá y Nueva Zelanda, y recientemente países europeos han hecho un llamamiento para prohibir su uso.

Toxicidad: No solo la degradación de los plásticos es un proceso complejo y lento, sino que, durante la sucesión del mismo, se van liberando aditivos tóxicos presentes en los films de los que ya se habló anteriormente. Los principales aditivos utilizados en las películas de acolchado son: los estabilizadores UV, los pigmentos colorantes, el negro de carbón y el grupo más importante, los ftalatos (Steinmetz *et al.*, 2016; Scarascia-Mugnozza, Sica y Russo, 2011).

Los estabilizadores UV son capaces de incrementar la protección frente a la radiación ultravioleta que ofrecen las películas de acolchado sobre los cultivos (Castellano *et al.*, 2008). Los compuestos más utilizados para este fin son las benzofenonas y los benzotriazoles, cuya toxicidad ha sido estudiada especialmente en el medio marino. Estas sustancias son bioacumulativas, y en altas concentraciones resultan letales no sólo para la microfauna, sino también para el ser humano. Además, son potenciales inhibidores del crecimiento de las plantas (Wu *et al.*, 1998; Joon-Woo *et al.*, 2011; Careghini *et al.*, 2015).

Los pigmentos colorantes también son un factor a tener en cuenta, ya que son altamente tóxicos para la microfauna del suelo (Novotný *et al.*, 2006). Si bien existen pigmentos no tóxicos que pueden ser adheridos a las películas de acolchado, existen ciertos microorganismos que son capaces de convertirlos en productos peligrosos para el medio ambiente, como es el caso del colorante AO7, que sometido a procesos redox inducidos por bacterias del género *Escherichia* se reduce en anilina, un componente mutagénico y carcinogénico (Rawat *et al.*, 2018).

El negro de carbón es un compuesto asociado a la contaminación del aire, ya que procede de la combustión incompleta de hidrocarburos. Si bien no se han

encontrado estudios que demuestran que este compuesto es perjudicial para la microbiota del suelo, se asocia con las partículas PM₁₀ y PM_{2,5} liberadas en la contaminación por fuentes de combustión como pueden ser los motores de los coches, siendo estas muy nocivas para el ser humano (World Health Organization, 2012). En agricultura se utiliza para reforzar los polímeros de la película, protegiéndolo de los factores ambientales.

Los ftalatos son uno de los típicos aditivos que suelen añadirse a los polímeros de PE, ya que le aporta flexibilidad y elasticidad al plástico. Los ftalatos se desprenden fácilmente de las cadenas de PE, pasando al suelo, plantas y agua. Existen numerosos estudios que afirman que estos compuestos son altamente cancerígenos, y que incluso pueden actuar como disruptores endocrinos (Steinmetz *et al.*, 2016). Sin embargo, estos componentes pueden proceder de otras fuentes, como los agroquímicos, la contaminación atmosférica y las aguas residuales (Hongjun *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; He *et al.*, 2014), pero existen estudios que demuestran que las concentraciones de ftalatos en suelos con películas de acolchado de China son significativamente mayores que en suelos sin películas de acolchado (Zeng *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2013).

4.3.4 Ensayos de degradación de plásticos biodegradables

Con el objeto de contrastar aún más la ventaja de la utilización de las películas de acolchado biodegradables sobre las convencionales, en el Anexo III (Tabla 1) se han recopilado las marcas más utilizadas de películas biodegradables, y distintos ensayos realizados por diferentes autores (Tabla 2), que prueban la viabilidad y degradabilidad de algunas marcas de plásticos biodegradables, en ocasiones comparando su rendimiento con películas de PE tradicional, ya que suele ser lo más utilizado.

Contrastando los ensayos recopilados, la mayoría llevados a cabo en la región Mediterránea, lo primero que se destaca es que las películas hechas a base de plásticos oxo-biodegradables son las que más tardan en degradarse, ya que en realidad, estos son muy similares al PE. Seguidamente tenemos las películas hechas a base de PLA, cuya degradación también es algo más lenta a lo que cabría esperar, pero muchos autores destacan que este plástico se degrada a mayor velocidad en condiciones de compostaje, lo cual no es negativo ya que el compost resultante puede ser añadido como fertilizante antes de la temporada

de cultivo. El resto de los plásticos biodegradables se degrada a una velocidad aceptable, y no suele superar los 12 meses. Cabe destacar que el grosor de la película también influye en el tiempo de degradación, siendo un proceso más lento cuando la película es más gruesa.

En cuanto a las propiedades físicas, a excepción de los plásticos oxo-biodegradables todos son menos resistentes a la elongación, impacto y rotura en comparación a la película de PE. Sin embargo, esto no influye en su instalación, ya que todos presentan las propiedades mínimas para aguantar dicho proceso. Las películas más susceptibles a la rotura son aquellas fabricadas a base de papel y almidón, a causa de su estructura molecular menos resistente. Esto sin embargo las convierte en aquellas que se degradan más rápidamente, lo que queda reflejado en los ensayos.

Por último, en cuanto a la productividad en los cultivos de los ensayos realizados, todos los autores coinciden en que los rendimientos de las películas biodegradables son equiparables a las películas de PE, e incluso en ocasiones las biodegradables llegan a superar la producción obtenida con PE.

5. Conclusiones

En base a todo lo expuesto anteriormente, el uso de las películas de acolchado a base de poliolefinas no es sostenible y conlleva impactos muy negativos sobre el medio ambiente.

Por ello, las películas biodegradables son una opción mucho más sostenible que, sin duda, los agricultores deberían empezar a utilizar en mayor medida. Si bien es cierto que las películas biodegradables tienen un coste económico superior a las convencionales, su uso supone un ahorro en cuanto a la gestión y eliminación de los residuos que resultan del acolchado convencional, ya que se degradan por completo al finalizar la temporada de cultivo.

Entre las marcas más utilizadas, los ensayos de degradación muestran que la mayoría son buenas opciones para la sustitución del PE, aunque siempre sería mejor optar por aquellos biobasados para evitar el consumo de recursos no renovables, por el impacto que supone su obtención y la baja tasa de renovación de los mismos.

6. Bibliografía

- Abdelmoez, W., Dahab, I., Ragab, E. M., Abdelsalam, O. A., & Mustafa, A. (2021). Bio-and oxo-degradable plastics: Insights on facts and challenges. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(5), 1981-1996.
- Adhikari, D., Mukai, M., Kubota, K., Kai, T., Kaneko, N., Araki, K. S., & Kubo, M. (2016). Degradation of bioplastics in soil and their degradation effects on environmental microorganisms. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 5(01), 23.
- Agboola, O., Sadiku, R., Mokrani, T., Amer, I., & Imoru, O. (2017). Polyolefins and the environment. In *Polyolefin Fibres* (pp. 89-133). Woodhead Publishing.
- Alvarez, V. A., Ruseckaite, R. A., & Vazquez, A. (2006). Degradation of sisal fibre/Mater Bi-Y biocomposites buried in soil. *Polymer Degradation and Stability*, 91(12), 3156-3162.
- Astilleros, N. (2017). Evaluación de la biodegradación en el suelo de películas elaboradas con mezclas de almidón de sorgo. *Instituto Politécnico Nacional*.
- Bello, A. (1997). La retirada del bromuro de metilo como fumigante. *Vida rural*, 4, 70-72.
- Briassoulis, D., & Giannoulis, A. (2018). Evaluation of the functionality of bio-based plastic mulching films. *Polymer Testing*, 67, 99-109.
- Cao, D., Wang, X., Luo, X., Liu, G., & Zheng, H. (2017). Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. In *IOP conference series: earth and environmental science* 61(1), p. 012148. IOP Publishing.
- Careghini, A., Mastorgio, A. F., Saponaro, S., & Sezenna, E. (2015). Bisphenol A, nonylphenols, benzophenones, and benzotriazoles in soils, groundwater, surface water, sediments, and food: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(8), 5711-5741.
- Castellano, S., Mugnozza, G. S., Russo, G., Briassoulis, D., Mistrionis, 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.

- Castellón, H. (2010). Plásticos oxo-biodegradables vs. Plásticos biodegradables: ¿cuál es el camino?. *Servicios Técnicos Corporación Americana de Resinas, CORAMER, CA.*
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H. & Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494-3511.
- Chinaglia, S., Tosin, M., & Degli-Innocenti, F. (2018). Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level. *Polymer Degradation and Stability*, 147, 237-244.
- cicloplast, (2017). SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE PLÁSTICOS AGRÍCOLAS EN ESPAÑA Y EN EUROPA | MITECO
- Cirujeda Ranzenberger, A., Aibar Lete, J., Zaragoza Larios, C., Anzalone, A., Gutiérrez López, M., Fernández Cavada Labat, S. & Macua, J. I. (2008). Evaluación de acolchados para el control de la flora arvense en un cultivo de tomate: dos años de resultados. SEAE-Sociedad Española de Agricultura Ecológica.
- 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.
- Cozzolino, E., Giordano, M., Fiorentino, N., El-Nakhel, C., Pannico, A., Mola, I & Roupheal, Y. (2020). Appraisal of biodegradable mulching films and vegetal-derived biostimulant application as eco-sustainable practices for enhancing lettuce crop performance and nutritive value. *Agronomy*, 10(3), 427.
- Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and environmental microbiology*, 85(19), e01095-19.
- de Pedro, F. R. (1987). *Láminas de polietileno y copolímero EVA para usos en agricultura*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Emadian, S. M., Onay, T. T., & Demirel, B. (2017). Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste management*, 59, 526-536.
- Esmaeili, A., Pourbabaee, A. A., Alikhani, H. A., Shabani, F., & Esmaeili, E. (2013). Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mixed culture

- of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in soil. *Plos one*, 8(9), e71720.
- Espi, E., Salmeron, A., Fontecha, A., García, Y., & Real, A. I. (2006). Plastic films for agricultural applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 22(2), 85-102.
- Falero Bilbao, E. (2013). Identificación y caracterización de enzimas bacterianas de origen antártico, con potencial aplicación biotecnológica. (Tesis de grado) *Departamento de Bioquímica y Genómica Microbianas. Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable*.
- Garces Vargas, A. J., & Hernández Alba, Y. T. (2020). Evaluación de películas poliméricas basadas en almidón de maíz, ácido poliláctico y polivinil alcohol como alternativa para la sustitución de polímeros convencionales a nivel laboratorio (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Gilreath, J. P., Jones, J. P., Motis, T. N., Santos, B. M., Noling, J. W., & Roskopf, E. N. (2003). Evaluation of various chemical treatments for potential as methyl bromide replacements for disinfestation of soilborne pests in polyethylene-mulched tomato. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* (Vol. 116, pp. 151-158).
- Godfray, HCJ, Crute, IR, Haddad, L., Lawrence, D., Muir, JF, Nisbett, N. & Whiteley, R. (2010). The future of the global food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 365, 2769-2777.
- González, J. I. M., García, I. L., Yanguas, J. M. B., Ibero, J. Z., & Ruiz, S. C. (2009). Utilización de cubiertas: en el tomate de industria en Navarra. *Navarra agraria*, (172), 29-38.
- Hodge, A., Robinson, D., & Fitter, A. (2000). Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen?. *Trends in plant science*, 5(7), 304-308.
- Hongjun, Y., Wenjun, X., Qing, L., Jingtao, L., Hongwen, Y. & Zhaohua, L., (2013). Distribution of phthalate esters in topsoil: a case study in the Yellow River Delta. China. *Environ. Monit. Assess.*, 185, 8489–8500.
- Kim, J. W., Chang, K. H., Isobe, T., & Tanabe, S. (2011). Acute toxicity of benzotriazole ultraviolet stabilizers on freshwater crustacean (*Daphnia pulex*). *The Journal of toxicological sciences*, 36(2), 247-251.

- Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D. C., Gupta, J., Khan, E., & Bolan, N. S. (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*, 114980.
- Kyrikou, I., & Briassoulis, D. (2007). Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(2), 125
- Lamont, W. J. (1999). Vegetable production using plasticulture. Food and Fertilizer Technology Center.-150.
- Lassaletta, L., & Rovira, J. V. (2005). Agricultura industrial y cambio global. *El ecologista*, 45, 52-55.
- Markowicz, F., & Szymańska-Pulikowska, A. (2019). Analysis of the possibility of environmental pollution by composted biodegradable and oxo-biodegradable plastics. *Geosciences*, 9(11), 460.
- Martin-Closas, L., Pelacho, A. M., Picuno, P., & Rodríguez, D. (2007). Properties of new biodegradable plastics for mulching, and characterization of their degradation in the laboratory and in the field. In International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007 801 (pp. 275-282).
- McKenzie, C. L., Lapointe, S. L., & Duncan, L. W. (2001). Landscape fabric as a physical barrier to neonate *Diaprepes abbreviatus* (Coleoptera: Curculionidae). *Florida Entomologist*, 721-721.
- Meneses, J., Corrales, C. M., & Valencia, M. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Revista EIA*, (8), 57-67.
- Merino, D., Mansilla, A. Y., Casalongué, C. A., & Alvarez, V. A. (2019). Performance of bio-based polymeric agricultural mulch films. In *Polymers for Agri-food applications* (pp. 215-240). Springer, Cham.
- Morra, L., Bilotto, M., Cerrato, D., Coppola, R., Leone, V., Mignoli, E., & Cozzolino, E. (2016). The Mater-Bi® biodegradable film for strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) mulching: effects on fruit yield and quality. *Italian Journal of Agronomy*, 11(3), 203-206.
- Narayan, R., & Balakrishnan, S. (2009). Drivers for biodegradable/compostable plastics & role of composting in waste management & sustainable agriculture. *United States Educational Foundation in India. Fulbright*, 24-29.

- Novotný, Č., Dias, N., Kapanen, A., Malachová, K., Vándrovcová, M., Itävaara, M., & Lima, N. (2006). Comparative use of bacterial, algal and protozoan tests to study toxicity of azo-and anthraquinone dyes. *Chemosphere*, 63(9), 1436-1442.
- Núñez, Á. P. (2016). ESTUDIO TECNO-ECONÓMICO DEL BIOPROCESO DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO ADÍPICO. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM)*.
- Qian, H.; Zhang, M.; Liu, G.; Lu, T.; Qu, Q.; Du, B.; Pan, X. (2018). Effects of Soil Residual Plastic Film on Soil Microbial Community Structure and Fertility. *Water, Air, Soil Pollut.*, 229 (8), 261.
- R. Panico, W.H. Powell & Jean-Claude Richer (1993). *IUPAC Nomenclature of Organic Compounds (Blue Book)*.
- Rawat, D., Sharma, R. S., Karmakar, S., Arora, L. S., & Mishra, V. (2018). Ecotoxic potential of a presumably non-toxic azo dye. *Ecotoxicology and environmental safety*, 148, 528-537.
- REMAR - Red Energía y Medio Ambiente (2011). Bioplásticos
- Redondo Taberner, D. (2017). Plástico biobasado, biodegradable y aditivado para una agricultura sostenible. *Innovative fully biodegradable mulching films & fruit protection bags for sustainable agricultural practices - CSIC*.
- Robertson, G. L. (2006). "Food Packaging, Principles and Practice", Boca Raton: CRC Press.
- 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.
- Sander, M. (2019). Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: concepts, knowledge gaps, and future research directions. *Environmental science & technology*, 53(5), 2304-2315.
- Weimer, N. M. (2015). Estudio de factibilidad de degradación fotoquímica en films plásticos a base de poliolefinas (Doctoral dissertation, Universidad de Belgrano-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales-Licenciatura en Ciencias Químicas).

- Sinha Ray, S., Okamoto, K., & Okamoto, M. (2003). Structure– property relationship in biodegradable poly (butylene succinate)/layered silicate nanocomposites. *Macromolecules*, 36(7), 2355-2367.
- Sintim, H. Y., Bary, A. I., Hayes, D. G., Wadsworth, L. C., Anunciado, M. B., English, M. E., & Flury, M. (2020). *In situ* degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 727, 138668.
- Sintim, H. Y., & Flury, M. (2017). Is biodegradable plastic mulch the solution to agriculture’s plastic problem?. *Environmental Science & Technology* 51, 3, 1068–1069.
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation?. *Science of the total environment*, 550, 690-705.
- Tarara, J. M. (2000). Microclimate modification with plastic mulch. *HortScience*, 35(2), 169-180.
- Tachibana, Y., Maeda, T., Ito, O., Maeda, Y., & Kunioka, M. (2009). Utilization of a biodegradable mulch sheet produced from poly (lactic acid)/Ecoflex®/modified starch in mandarin orange groves. *International journal of molecular sciences*, 10(8), 3599-3615.
- Torres, A., Durán, M., & Montero, P. (2012). Evaluación de las propiedades funcionales del almidón obtenido a partir de malanga (*Colocasia esculenta*). *Ciencias e Ingeniería al Día*, 2013, 8(2), 29-38 ISSN: 1900-768X.
- Valentín, J. L., Bernal-Ortega, P., Bernal, P. P., Torres, A. F., Herrero, R., Muscas, F. & Tecnológica, D. O. (2018). Diseño y desarrollo sostenible de materiales poliméricos. *Revista de plásticos modernos*, 115(730).
- Wang, Z., Wang, J., Richter, H., Howard, J.B., Carlson, J. & Levendis, Y.A., (2003). Comparative study on polycyclic aromatic hydrocarbons, light hydrocarbons, carbon monoxide, and particulate emissions from the combustion of polyethylene, polystyrene, and poly(vinyl chloride). *Energy Fuel* 17, 999–1013.
- Wittwer, S. H. (1993). World-wide use of plastics in horticultural production. *HortTechnology*, 3(1), 6-19.
- World Health Organization. (2012). *Health effects of black carbon*. WHO.

- Wu, X., Chou, N., Lupher, D., & Davis, L. C. (1998). Benzotriazoles: toxicity and degradation. In *Conference on Hazardous Waste Research, Kansas City, MO* (pp. 2015-2017).
- Zaragoza C, (2003). Weed management in vegetables. En: Weed management for Developing Countries. Addendum 1. FAO Plant Production and Protection paper. Edited by Labrada, R. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italia. pp. 145-157.
- Zeng, F., Cui, K., Xie, Z., Wu, L., Liu, M., Sun, G., Lin, Y., Luo, D. & Zeng, Z., (2008). Phthalate esters (PAEs): emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China. *Environ. Pollut.*, 156, 425–434
- Zribi, W., Faci González, J. M., & Aragüés Lafarga, R. (2011). Mulching effects on moisture, temperature, structure and salinity of agricultural soils. *INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA*, 107 N.º 2, 148-162.

- **Enlaces web:**

- AP-WASTE, (2021). AP-WASTE - Productividad y sostenibilidad a través de la Biodegradación. Available at: <<https://ap-waste.es/>> [Accessed 9 February 2021].
- EDICIONES PLAZA, SL., (2021). Benihort y la AVI desarrollan plásticos compostables para uso agrícola. Castellonplaza. Available at: <<https://castellonplaza.com>> [Accessed 9 March 2021].
- European Bioplastics, (2021). Home. European Bioplastics e.V. Available at: <<https://www.european-bioplastics.org/>> [Accessed 9 April 2021].
- FICAPLAST, (2021). Federación Centroamericana de Plásticos. Ficaplast.com. Available at: <<http://www.ficaplast.com/>> [Accessed 11 June 2021].
- Intergro, (2021). Intergro | Agriculture Mulch Film – Fertilizers – Stakes – Plastic Mulch Film: Hemp Weed Control. Intergro.com. Available at: <<http://www.intergro.com/>> [Accessed 18 January 2021].
- International Society of Arboriculture, (2009). Técnicas apropiadas para aplicar el mulch. [online] <www.isahispana.com> [Accessed 03 February 2021]
- IU-verdes Lorca, (2021). LORCA / IU-Verdes exige el cumplimiento del acuerdo de Pleno sobre elaboración de una ordenanza de gestión de plásticos

- agrícolas - Murcia.com. Available at: <<https://www.murcia.com>> [Accessed 19 March 2021].
- LifeAgroPaper, (2021). Available at: <<https://www.lifeagropaper.eu/>> [Accessed 10 June 2021].
- Nations, U., (2021). Naciones Unidas | Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano. [online] United Nations. Available at: <<https://www.un.org/es/>> [Accessed 7 June 2021].
- Ocean Service, 2021. What are microplastics?. Oceanservice.noaa.gov. Available at: <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>> [Accessed 9 May 2021].
- Plasticoscj.com. (2021). PVC | Plásticos CJ. Available at: <<https://plasticoscj.com/pvc/>> [Accessed 10 January 2021].
- PLASTISAX, (2021). PLASTISAX S.L. | 3dclick.com. Available at: <<https://www.3dclick.com/ecosystem/plastisax-s-l--1>> [Accessed 19 March 2021].
- Repsol, (2021). Polietileno: usos y propiedades - Alta y baja densidad | Repsol. [online] REPSOL. Available at: <<https://www.repsol.com>> [Accessed 9 March 2021].
- Textoscientificos.com, (2021). Polímeros cristalinos y amorfos | Textoscientificos.com. Available at: <<https://www.textoscientificos.com>> [Accessed 16 June 2021].

ANEXO I: Mar de plástico en zonas de España



Figura 1: Mar de plástico en la costa de Almería (Fuente: elaboración propia).

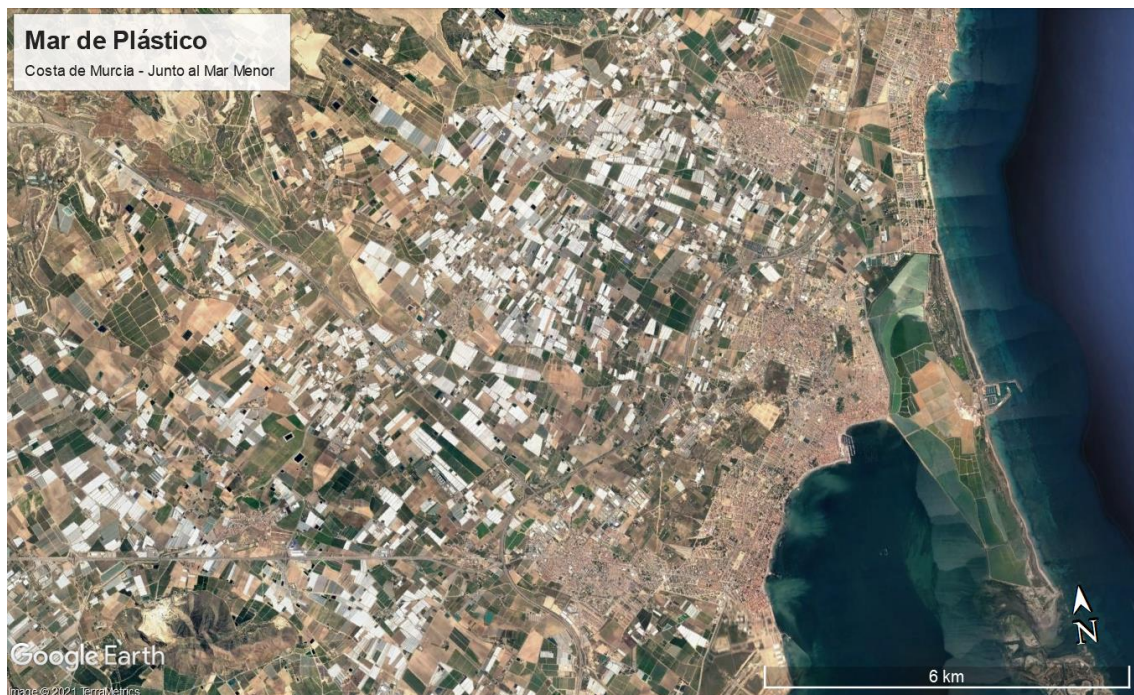
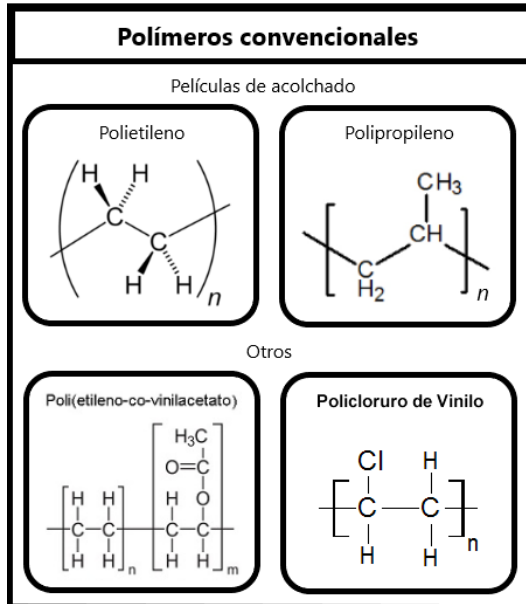


Figura 2: Mar de plástico en la costa de Murcia (Fuente: elaboración propia).

ANEXO II: Estructura molecular de polímeros biodegradables y no biodegradables utilizados en acolchado plástico agrícola

a)



b)

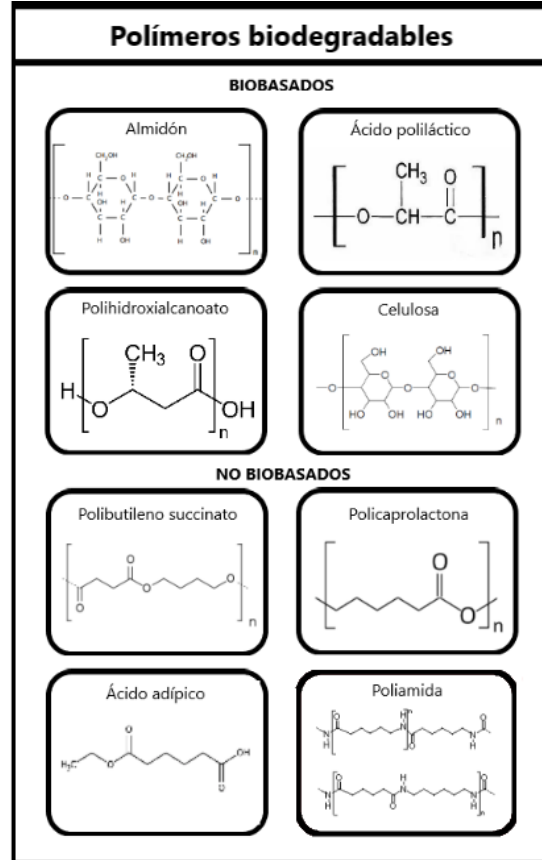


Figura 3: Estructura molecular de los polímeros utilizados en el acolchado convencional y otros que ya están en desuso (a); y polímeros biodegradables biobasados y no biobasados (b) (Fuente: elaboración propia).

ANEXO III: Marcas de acolchado biodegradable y ensayos

Tabla 1: Marcas de acolchado biodegradable más utilizadas (Fuente: elaboración propia).

Marca	Composición	Producción	Importación	Fuente
MULTIBIOSOL	Policaprolactona-almidón	CSIC	Zaragoza, España	Renovable/ No renovable
	Polihidroxialcaonatos			
BioAgri® Ag-Film	Almidón de maíz y biopolímeros no especificados	BIOgroupUSA	Palm Harbor, Florida	Renovable/ No renovable
Crown 1	Polihidroxialcanoato negro	Crown Films	Burlington, Vermont	Renovable
SB-PLA-11	Tejido no-tejido de ácido poliláctico	Saxony Textiles	Chemnitz, Alemania	Renovable
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	NOVAMONT	Novara, Italia	Renovable
Ecovio®	Ecoflex® (ácido adípico), ácido poliláctico y otros aditivos	BASF	Ludwigshafen, Alemania	Renovable/ No renovable
Biofilm®	Almidón de harina de cereal	Barbier	Sainte Sigolène, Francia	Renovable
Sphere®	Almidón de fécula de patata y polietileno	Sphere Group Spain	Zaragoza, España	Renovable/ No renovable
Bioflex®	Ácido poliláctico y copoliéster con aditivos	Fkur	Willich, Alemania	Renovable/ No renovable
Enviroplast®	Plástico oxo-biodegradable	Gemplast	Santa Fe, Argentina	No renovable
Organix®	Polibutileno succinato y ácido poliláctico	Organix Solutions	Edina, USA	Renovable/ No renovable
Naturecycle®	Polibutileno succinato y almidón	plastiweber	Feliz, Brasil	Renovable/ No renovable
Mimgreen®	Papel de celulosa	Mimcord	Barcelona, España	Renovable
Saikraft®	Papel de celulosa	Saica	Zaragoza, España	Renovable
AgroPaper®	Papel de celulosa	Smurfit Kappa	Dublín, Irlanda	Renovable

Tabla 2: Ensayos realizados con marcas más utilizadas de acolchado biodegradable (Fuente: elaboración propia).

Marca	Material	Región climática	Cultivo	Observaciones	Autor
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	Laboratorio (interior)	-	Vida útil limitada en entorno biótico	Álvarez <i>et al.</i> , 2006
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	Mediterránea	Fresas	Se comparó la degradación con el LDPE tradicional y el rendimiento fue similar, pero con una degradación mucho más rápida (de 6 a 12 meses)	Morra <i>et al.</i> , 2016
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	Mediterránea	Lechuga mantecosa	Se compararon 2 films de 15 µm y 50 µm de Mater-Bi, obteniendo en el primero rendimientos de cultivo similares al PE tradicional, y la mayor productividad con el segundo.	Cozzolino <i>et al.</i> , 2020
Multibiosol	Policaprolactona-almidón	Mediterránea	Tomate, pimiento y pepino	Velocidad de biodegradabilidad óptima	Redondo Taberner, 2017
	polihidroxi alcaonatos			Degradación demasiado rápida	
	Polibutileno succinato				
BioAgri® Ag-Film	Almidón de maíz y biopolímeros no especificados	Oceánica templada	Brócoli	Velocidad de biodegradabilidad óptima	Cowan <i>et al.</i> , 2013
Crown 1	Polihidroxi alcanoato negro			Degradación demasiado lenta	
SB-PLA-11	Tejido no-tejido de ácido poliláctico				
Ecovio®	Ecoflex® (ácido adípico), ácido poliláctico y otros aditivos	Laboratorio (interior)	-	La transmisión de vapor de agua a través de los films biobasados fue significativamente mayor que en PE, mientras que la resistencia al impacto y a la penetración es menor en estos.	Briassoulis y Giannoulis, 2018
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros				

Ecovio®	Ecoflex® (ácido adípico), ácido poliláctico y otros aditivos	Subtropical húmeda	Mandarina	Se comparó un film Ecovio modificado con almidón de maíz con otro sin modificar. La degradación del film Ecovio no fue muy significativa después de varios meses, mientras que la de almidón se degradó rápidamente y proporcionó a las mandarinas nutrientes extra que aumentaron su calidad.	Tachibana <i>et al.</i> , 2009
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	Mediterránea	Tomate y pimiento	El rendimiento frente al control de malas hierbas y la producción de tomate y pimiento de los plásticos biodegradables cumplen una función comparable al PE. La degradación en las partes enterradas comenzó entre 15 y 30 días después de ser colocados en los biodegradables, en los papeles fue demasiado rápido. La parte exterior se degrada más lentamente. Los papeles impiden el crecimiento de la mala hierba, pero si se rompen estas emergen rápidamente.	Cirujeda <i>et al.</i> , 2015
Biofilm®	Almidón de harina de cereal				
Enviroplast®	Plástico oxo-biodegradable				
Sphere®	Almidón de fécula de patata y polietileno				
Ecovio®	Ecoflex® (ácido adípico), ácido poliláctico y otros aditivos				
Bioflex®	Ácido poliláctico y copoliéster con aditivos				
Mimcord®	Papel de celulosa				
Saikraft®	Papel de celulosa				
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	Mediterránea	Tomate	Los materiales biodegradables presentan mayor permeabilidad con respecto al vapor de agua y por lo tanto, una	Martín-Closas <i>et al.</i> , 2008

Biofilm®	Almidón de harina de cereal			capacidad de ahorro de agua reducida. Sin embargo, esto puede ser beneficioso para prevenir enfermedades en climas húmedos. Biofilm y Mater-Bi se degradaron antes que Bioflex, pero todos presentaron buena resistencia a la hora de ser instalados.	
Bioflex®	Ácido poliláctico y copoliéster con aditivos				
Mater-Bi®	Almidón de maíz y otros biopolímeros	Mediterránea	Tomate	Mayor producción obtenida con Enviroplast, Mater-Bi y Mimcord. Mater-Bi y Enviroplast son los que más se acercan a las producciones con láminas de PE. Degradación al final del ciclo del cultivo buena en todos excepto en Enviroplast, que al igual que el PE no se degradó significativamente.	González <i>et al.</i> , 2009
Biofilm®	Almidón de harina de cereal				
Enviroplast®	Plástico oxo-biodegradable				
Mimcord®	Papel de celulosa				
Saikraft®	Papel de celulosa				
BioAgri® Ag-Film	Almidón de maíz y biopolímeros no especificados	Subtropical húmeda, mediterránea y compost	Pimiento verde y calabaza	Mayor tasa de degradación en verano y en general, los films se degradan antes en la región mediterránea. En la región subtropical húmeda, los suelos se volvieron anóxicos por el exceso de humedad. El film experimental PHA/PA se degradó antes en compost, pero más lentamente en suelos en comparación al resto.	Sintim <i>et al.</i> , 2020
Naturecycle®	Polibutileno succinato y almidón				
Organix®	Polibutileno succinato y ácido poliláctico				
Experimental	Ácido poliláctico y polihidroxi alcanos				
Papel experimental	Celulosa				