



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Comparación de la huella de carbono de plásticos
reciclables y bioplásticos con aplicaciones en plasticultura

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y PROCESOS
SOSTENIBLES

Autor: Mari Carmen Cánovas Ortega

Director: Doval Miñarro, Marta

Codirector/a: Pamies Porrás, Ramón Francisco

Monzó Sánchez, Fuensanta



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, Marzo 2021

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. TECNOLOGÍA DE PLÁSTICOS	4
1.1.1. HISTORIA DEL PLÁSTICO.....	5
1.1.2. GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS.....	7
1.1.2.1. CLASE DE POLÍMEROS.....	8
1.1.2.2. RELACIÓN ESTRUCTURA-CRISTALINIDAD.....	10
1.1.2.3. RELACIÓN ESTRUCTURA-TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA O TEMPERATURA DE FUSIÓN.....	12
1.1.3. ECONOMIA CIRCULAR	14
1.1.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL. HERRAMIENTAS DE GESTIÓN AMBIENTAL.	15
1.1.5. HUELLA DE CARBONO.....	16
1.1.5.1. NORMATIVA	17
1.2. ACOLCHADOS EN PLASTICULTURA	19
1.3. BIOPLÁSTICOS Y PLÁSTICOS BIODEGRADABLES: PLÁSTICOS VERDES.	21
1.3.1. PLÁSTICO BIOBASADO.	23
1.3.2. PLÁSTICO BIODEGRADABLE.....	25
1.3.3. PLÁSTICO COMPOSTABLE.....	27
1.3.4. ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO	28
1.3.4.1. GELATINIZACIÓN	32
1.4. RECILAJE DE ENVASES LIGEROS	35
2. OBJETIVOS	43
3. MATERIALES Y MÉTODOS	45
3.1. MATERIALES	45
3.1.1. ALMIDÓN DE MAIZ	45
3.1.2. POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	47
3.1.3. NEGRO DE CARBÓN	47
3.1.4. GLICERINA	48
3.2. MÉTODOS	49
3.2.1. CES EDUPACK	49
3.2.2. ESTUDIO DE LA LOCALIZACIÓN DEL ACOLCHADO.....	50

3.2.3. CRONOGRAMA DE DISEÑO ACOLCHADO BIOPOLÍMERO	51
3.2.3.1 DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL ACOLCHADO BIODEGRADABLE.	53
3.2.3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES	55
3.2.3.3. FORMULACIÓN DE COMPOSICIÓN Y FABRICACIÓN.....	57
3.2.3.4. ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD	58
3.2.3.5. CARCATERIZACIÓN MECÁNICA Y ÓPTICA DEL ACOLCHADO	59
3.2.4 CRONOGRAMA DE DISEÑO ACOLCHADO POLIETILENO	60
3.2.4.1. SELECCIÓN DE MATERIALES Y FORMULACIÓN.	60
3.2.4.2. SÍNTESIS Y CARCATERIZACIÓN.	61
4. RESULTADOS	64
4.1. ESTUDIO ECONÓMICO DEL COSTE DE LA MATERIA PRIMA.....	64
4.2. ECO-AUDITORÍA	66
4.2.1. CASO A	70
4.2.2. CASO B.....	73
4.2.3. CASO C	74
4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	778
4.3.1. ESCENARIO REAL.....	778
4.3.1.1. OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA Y PROCESO DE FABRICACIÓN.....	79
4.3.1.2. TRANSPORTE	81
4.3.1.3. ETAPA FINAL	84
4.3.2. ESCENARIO HIPOTÉTICO	87
4.3.3. HUELLA DE CARBONO TOTAL PARA CADA UNO DE LOS CASOS ESTUDIADOS EN EL ANÁLISIS.....	92
5. CONCLUSIÓN Y RESUMEN	94
6. BIBLIOGRAFÍA.....	99
7. ÍNDICE DE IMÁGENES, TABLAS Y GRÁFICAS.....	104
8. ANEXOS.....	105
8.1. FICHA TÉCNICA DEL ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO (TPS)	105
8.2. FICHA TÉCNICA DEL TERMOPLÁSTICO DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)	107
8.3. FICHA TÉCNICA DEL NEGRO DE CABRÓN	109

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo fin de Máster se centra en los beneficios y desventajas de los plásticos convencionales frente a un polímero biodegradable como acolchados destinados a la agricultura, en especial en el estudio de su huella de carbono. Por otro lado, identifica oportunidades para cambiar la composición, las prácticas de uso y etapas finales de vida de ambos valiosos polímeros. Todo ello con el propósito de conseguir un consumo futuro sostenible, creando así un entorno limpio, un buen estado de recursos naturales y gran bienestar social.

1.1. TECNOLOGÍA DE PLÁSTICOS

El abundante suministro de materiales proporcionados por la naturaleza es uno de factores clave que ha contribuido al desarrollo de la civilización. A lo largo de la historia se ha reconocido que para sobrevivir y prosperar, estos materiales deben convertirse en objetos útiles. Con el paso del tiempo, materiales como los minerales se convertían en metales, y estos pasaban por etapas secundarias de tratamiento y moldeo, dando origen a materiales útiles. Más tarde, la familiarización con las estructuras básicas de los materiales desembocó en la creación de éstos pero de origen sintéticos y, como resultado, toda una nueva gama de métodos de fabricación evolucionó, obteniendo productos que hoy en día están presentes a lo largo de numerosas actividades involucradas en nuestra rutina cotidiana, como es el caso de los plásticos [1].

El plástico presenta numerosas ventajas frente a otros materiales como su bajo coste, su ligereza, solidez del color, flexibilidad, resistencia química, aislamiento eléctrico, costes de fabricación bajos y empleo de equipos sencillos, entre otros. Esto significa que los costos de fabricación son bajos, lo cual es un requisito clave en cualquier negocio, así como, la capacidad de obtener numerosos materiales con aplicaciones específicas distintas, capaces de manufacturar y manipular fácilmente [1].

1.1.1. HISTORIA DEL PLÁSTICO

El conocimiento de unas reservas limitadas de materiales naturales desembocó en la necesidad de obtener nuevos materiales con los que fabricar objetos de uso cotidiano. Esta necesidad llevó a cabo numerosos experimentos e investigaciones con las que se obtuvieron materiales sintéticos capaces de satisfacer las mismas funciones que los materiales tradicionales como el marfil [1-3].

A causa del descenso de las reservas de marfil y la precisión de un nuevo material con el que fabricar bolas de billar, el investigador británico, Alexander Parkes, descubrió que la celulosa, las fibras vegetales de la madera y el algodón mezcladas con ácido nítrico y un agente solvente daban origen a un material fuerte, flexible y moldeable, parecido al marfil, que llamó parkesina. La fabricación de la parkesina a gran escala se complicó por el elevado coste del solvente empleado en mezclar la celulosa y el ácido nítrico. El relevo de Parkes fue tomado por John Wesley Hyatt. John Wesley Hyatt vio el potencial de este material llamado parkesina y observó que el alcanfor era un buen solvente para el proceso de fabricación de este material, el cual se podía moldear con el fin de obtener infinitos productos. Hyatt fundó las bases en las que se asentaría la industria del plástico, para ello y, valiéndose de sus extensos conocimientos en mecánica, diseñó y elaboró algunos equipos necesarios para la manufactura y moldeo de este material, que hoy en día son empleados en las industrias plásticas [1-3].

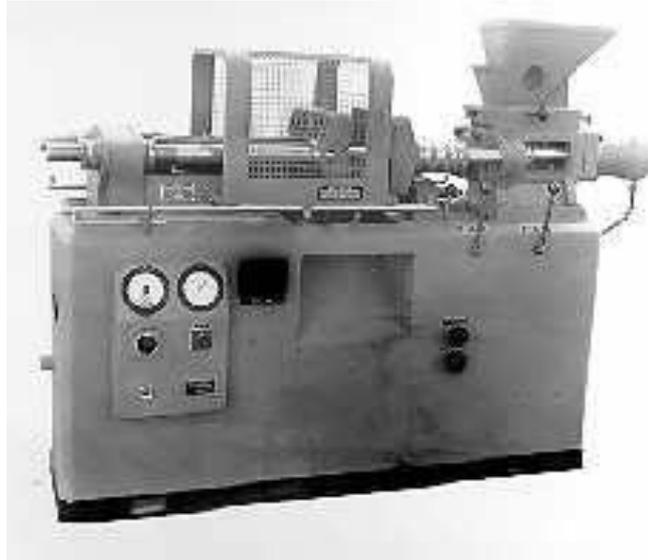


Imagen 1. Máquina que producía piezas de plástico a partir de un molde de forma rudimentaria.

Hyatt le dio el nombre de celuloide al material que obtuvo y con el que se consiguieron numerosos objetos, como son, dentaduras postizas, puños y cuellos de camisa impermeables, elementos decorativos, así como bolas de billar hasta llegar a la industria cinematográfica. A pesar de las altas oportunidades que ofrecía el nuevo material, su carácter altamente inflamable causó graves explosiones e incendios [1].

En 1872, Adolf von Baeyer, químico alemán, mezcló fenol y formaldehído dando lugar a una masa de aspecto gelatinosa. En 1906 Leo Hendrik Baekeland desarrolló la baquelita a partir de la reacción fenol-formaldehído. La baquelita fue la primera resina termoestable totalmente sintética y con el que se obtuvo numerosos objetos ignífugos y tradicionales como teléfonos, cámaras, joyas, ...etc. Posteriormente, en 1920, se descubrió que los materiales poliméricos están compuestos por grandes moléculas, cadenas largas de pequeñas unidades anexadas por enlaces covalentes, a las que el químico alemán Hermann Staudinger, científico que las halló, llamó macromoléculas [1].

Años más tarde y tras un estudio continuo se obtuvieron numerosos materiales poliméricos sintéticos como el nylon y el caucho. El descubrimiento de la polimerización del gas etileno con el calor dio origen al polietileno (PE), así como posteriormente con ciertas modificaciones de los procesos de síntesis se obtuvieron el PVC (cloruro de vinilo) y poliestireno (PS) entre otros [1].

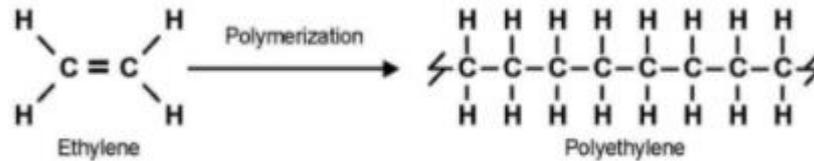


Imagen 2. Polimerización del Polietileno (PE).

1.1.2. GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros son materiales en los que las pequeñas unidades moleculares (monómeros) se unen en un proceso químico para crear moléculas de cadena larga (macromoléculas). Tales materiales están disponibles en la naturaleza, como el caucho o la celulosa, o son sintetizados, como es el caso del polietileno. La palabra polímero define a ambos materiales, de origen natural o sintético, en cambio, la palabra plástico, generalmente, hace referencia a polímeros sintéticos [2].

Las macromoléculas están formadas por numerosos monómeros. Según el tamaño de las macromoléculas, es decir, el número de unidades de monómeros que formen la macromolécula, el estado de agregación varía a temperatura ambiente (25°C), pasando del estado gaseoso, al líquido y oleoso, hasta convertirse en resina cuando el peso molecular supera los 12000 g/mol, aproximadamente. Cuando las unidades monoméricas son iguales en toda la cadena, esta se define como homopolímero, cuando sucede lo contrario, es un heteropolímero [3].

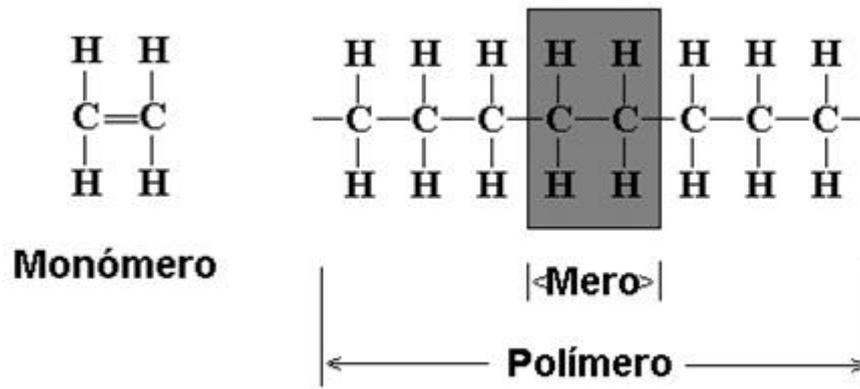


Imagen 3. Macromolécula del Polietileno (PE).

Las moléculas poliméricas son orgánicas, es decir, la mayoría de su composición química la forma el carbono e hidrógeno, y en porcentajes más bajos puede contener nitrógeno, azufre, fósforo, etc. Las propiedades, reacciones y preparación de este tipo de moléculas están bajo la influencia de la disciplina orgánica. Por lo general, los enlaces covalentes son los que forman la mayoría de las cadenas y anillos orgánicos. El carbono presente en las cadenas poliméricas (macromoléculas) ofrecen una gran estabilidad estructural, además de aportar bajos puntos de fusión, sublimación y ebullición, por debajo de los 300°C [2].

1.1.2.1. CLASE DE POLÍMEROS.

Dependiendo de las características que presente un polímero se pueden clasificar:

- **Según su naturaleza.** Como ya se ha comentado en párrafos anteriores un polímero puede ser natural o sintético. Al contrario que los polímeros naturales, originados por organismos vivos, los polímeros sintéticos han sido creados por la industria tras numerosas investigaciones, con el objetivo de conseguir nuevos materiales capaces de competir con los tradicionales, con reservas limitadas y, por lo general, más costosos o difícilmente manipulables [2].
- **Según su estructura molecular.** La diversidad de monómeros genera estructuras moleculares distintas, las cuales pueden ser [2]:
 - Estructura lineal. La secuencia de monómeros se une mediante enlaces covalentes periódicamente.

- Estructura lineal ramificada. Cadenas poliméricas unidas a la cadena principal conectadas lateralmente.
- Estructura entrecruzada. Se enlazan cadenas poliméricas adyacentes
- Estructura reticular. La unión de las cadenas poliméricas en las tres direcciones forma una red tridimensional.

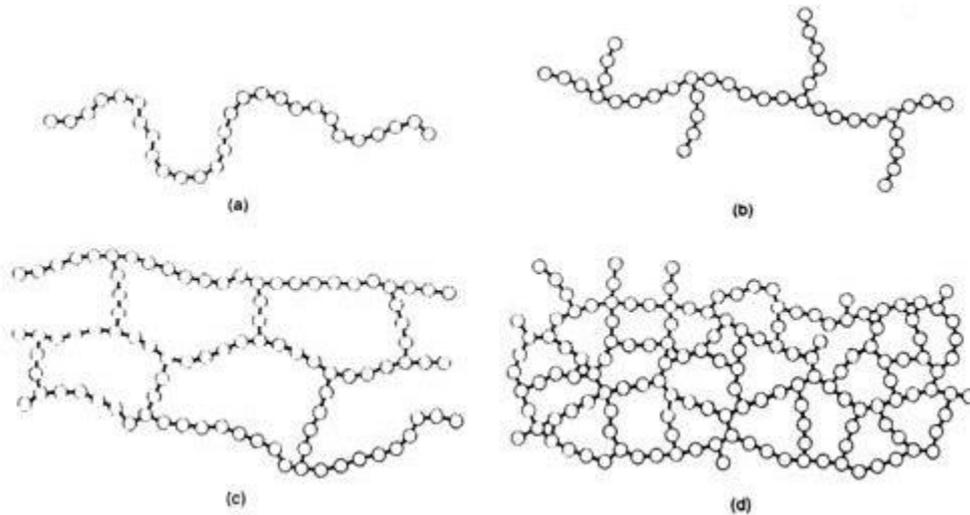


Imagen 4. Estructura a) Lineal, b) Lineal ramificado, c) Entrecruzada, d) Reticular.

- **Según la respuesta mecánica.** El efecto que causa la temperatura o ciertas fuerzas de deformación en las cadenas moleculares, varía en función de esta, dando lugar a su clasificación en plásticos flexibles, plásticos rígidos, elastómeros y fibras [2].
 - Termoplásticos o plásticos flexibles. Los plásticos tienen la capacidad de deformarse plásticamente, deformación tras la cual el material no es capaz de recuperar su forma inicial a la aplicación de la fuerza. Los materiales termoplásticos se funden a elevadas temperaturas debido a las vibraciones moleculares y la posterior separación de estas, lo que facilita su moldeo, solidificándose cuando el material es enfriado. Estos polímeros tienen estructuras lineales, ramificadas o sin ramificar.
 - Termoestables o plásticos rígidos. Las cadenas poliméricas con enlaces intermoleculares fuertes impiden el estiramiento de estas, dando al material alta rigidez e impidiendo su fundición. Asimismo, el material, a su

vez, puede someterse a deformaciones plásticas. Hablamos entonces de plásticos rígidos o termoestables. Estos polímeros tienen estructuras entrecruzadas o reticulares.

- Elastómero. Las cadenas poliméricas de los elastómeros tienen una mayor capacidad de retornar a su forma original tras la aplicación de una fuerza. Aun así, parte de la deformación experimentada es plástica, pero en menor proporción que el resto de materiales poliméricos. Un ejemplo de estos materiales son los cauchos, sintéticos o naturales.
- Fibra. Las fibras son materiales capaces de tolerar un alto esfuerzo tensil, es decir, se puede estirar longitudinalmente con alta efectividad. Las cadenas de las fibras se disponen de manera longitudinal en un mismo eje.

1.1.2.2. RELACIÓN ESTRUCTURA-CRISTALINIDAD.

La estructura polimérica se puede clasificar, de manera general, como amorfa, cristalina o semicristalina, donde se encuentran ambas regiones alternadas. Se dice que un polímero es cristalino cuando su estructura está ordenada y eso quiere decir que, las ramas del polímero se pliegan formando hileras acopladas entre sí dando lugar a laminas poliméricas que aportan al material rigidez, resistencia mecánica, baja solubilidad y permeabilidad de gases, pero con una alta propiedad de dispersión lumínica, por este motivo los polímeros altamente cristalinos tienden a ser opacos. Por otra parte, la estructura amorfa es todo lo contrario, cadenas poliméricas desordenadas que aportan al material flexibilidad y tenacidad [4-6].

Lo más habitual es encontrarse regiones amorfas y cristalinas conformando a la vez la estructura polimérica, recibiendo el nombre de estructura. Existen varios modelos que describen este tipo de estructuras, modelo de cadena plegada y modelo de micela de fleco. El modelo de cadena plegada distingue tres regiones; región amorfa, región interfacial y región cristalina. En las regiones cristalinas las cadenas se conforman de forma secuenciada, adyacente unas de otras, ordenadas y plegadas, formando capas poliméricas cristalinas, conectadas unas con otras por medio de las regiones amorfas, ya que una misma cadena polimérica puede formar parte de las regiones amorfas y cristalinas a la vez. Cuando parte de algunas cadenas reentra en la lámina polimérica

para plegarse y formar parte de la hilera o lámina que configura la estructura cristalina, como se muestra en la imagen 5, lo puede hacer de manera adyacente o no, y en este momento la cadena tiene cierto contacto con la región amorfa, denominándose zona interfacial [4].



Imagen 5. a) Reencuentro adyacente, b) Reencuentro no adyacente.

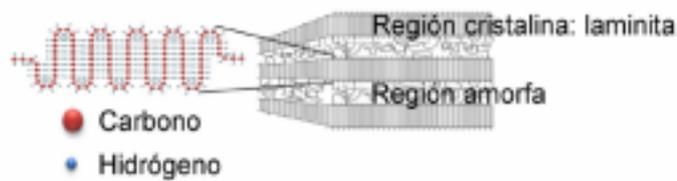


Imagen 6. Modelo cadena plegada.

El modelo de micela de fleco considera que las cadenas forman cristalitas o lamelas, hileras formadas por cadenas ordenadas (estructura cristalina), y se distribuyen en una matriz amorfa, como se muestra en la imagen 6. Las lamelas forman una estructura esferoidal, la cual crece desde un núcleo radialmente [4,6].

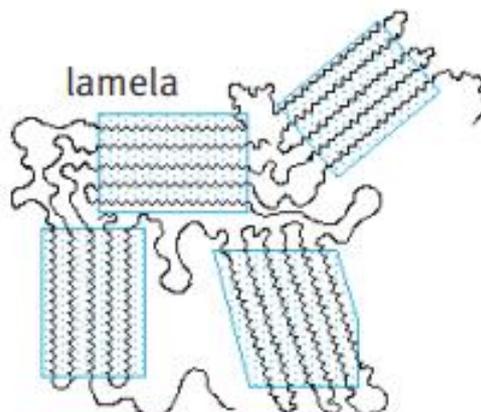


Imagen 7. Estructura de micela de fleco.

Las cadenas con altas interacciones y prioridad molecular favorecen la compactación de las macromoléculas y por tanto la cristalinidad. Por el contrario, si los monómeros que forman las cadenas no siguen ningún orden esto se traduce en una dificultad para que la cadena forme estructuras cristalinas. Este es el caso de copolímeros, polímeros atácticos o muy ramificados y grupos voluminosos, que obstaculizarían la compactación o acomodado de las cadenas. Un ejemplo sería el polietileno de alta y baja densidad, mientras que el LDPE (polietileno de baja densidad) es flexible y se emplea en la obtención de bolsas o films de uso agrícola, el HDPE (polietileno de alta densidad) tiene una mayor rigidez y se emplea como materia prima en la obtención de contenedores, embalajes o tuberías, entre otros. Esto es debido a que el LDPE presenta ramificaciones y la densidad disminuye proporcionalmente a la presencia de ramificaciones, puesto que estas mantienen las cadenas más separadas e impiden su compactación y con ello la formación de estructuras cristalinas [4].

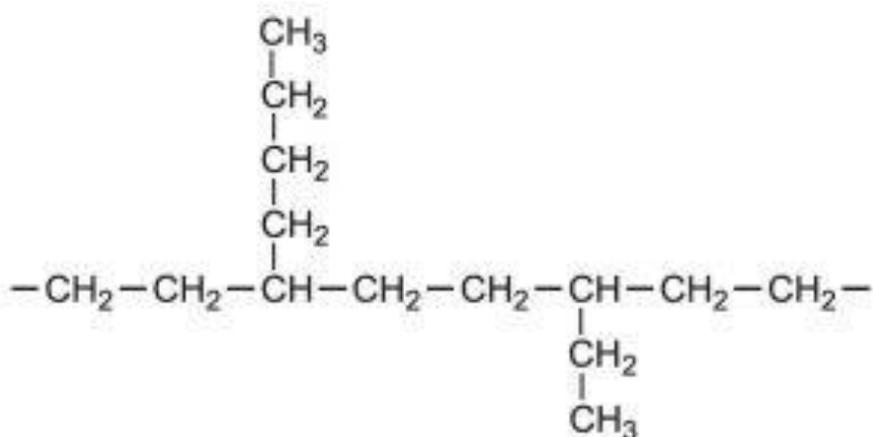


Imagen 8. Polietileno de baja densidad

1.1.2.3. **RELACIÓN ESTRUCTURA-TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA O TEMPERATURA DE FUSIÓN.**

El suministro de calor a un material plástico, dependiendo de su estructura molecular, se experimenta de forma distinta. En el caso de los polímeros amorfos, la temperatura no llega a fundir el material, sino que este se comporta como un material elastomérico. El material experimenta un reblandecimiento, la temperatura a la que alcanza dicho

estado se denomina temperatura de transición vítrea o T_g . El estado elastomérico experimentado por el material, es origen de las vibraciones y, posterior separación, que experimentan las cadenas moleculares del polímero. En las regiones cristalinas este efecto no se observa, puesto que las interacciones moleculares son tan fuertes que impiden dichas vibraciones. Por este mismo motivo, la T_g es específica para cada estructura molecular semicristalina, es decir, un material cristalino no experimenta una temperatura de transición vítrea, solamente temperatura de fusión [4].

La temperatura de fusión o T_f es experimentada por polímeros cristalinos y semicristalinos. Esta temperatura afecta a las regiones cristalinas de las estructuras poliméricas. La temperatura de fusión es el punto donde una región o estructura cristalina funde, racionalmente hablamos de temperaturas mayores a la de transición vítrea, puesto que la energía que se debe suministrar para alterar las interacciones moleculares de una estructura cristalina es mayor. Los materiales semicristalinos experimentaran ambos efectos en función del porcentaje de regiones amorfas o cristalinas, teniendo en cuenta que el estado de reblandecimiento aparecerá a temperaturas más bajas (T_g) que el estado fundido del material, el cual tendrá lugar a temperaturas más elevadas (T_f) [4].

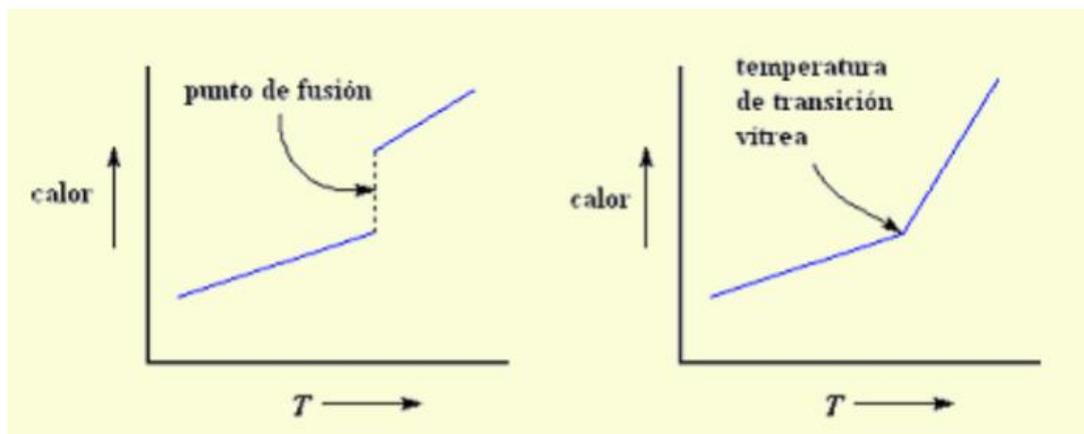


Imagen 9. Representación gráfica del punto de fusión y de transición vítrea

Tanto la temperatura de transición vítrea como la de fusión se verán alteradas por grupos voluminosos o el entrecruzamiento de las cadenas, dificultando el movimiento de estas y siendo necesaria una mayor aportación de energía, para separarlas y facilitar su movilidad. Asimismo, aun necesitando elevar las temperatura (mayor aporte

de energía), la T_f será siempre mayor que la T_g , las regiones cristalinas siempre estarán unidas por fuerzas moleculares más elevadas que las regiones amorfas [4].

1.1.3. ECONOMIA CIRCULAR

La economía circular es un modelo económico. Actualmente, el modelo económico que presenta la gran mayoría de industrias en este país y en muchos otros, es lineal. Esta linealidad se basa en el lema de «tomar, hacer, tirar», o lo que es lo mismo, obtener una materia prima, procesarla y manipularla de tal forma que facilite y satisfaga las necesidades del demandante, finalizando con la retirada del producto como un residuo inaprovechable. El principal objetivo de establecer una economía circular es reutilizar los residuos inservibles para un fin pero servibles para otros, traduciéndose esto en una mejor gestión de materiales, descenso de contaminación y mayor aprovechamiento de nuestros recursos. Un gran ejemplo y precursor de economía circular es Dinamarca, con el modelo de simbiosis industrial de Kalundborg, donde participan numerosas empresas (farmacéuticas, refinería, central térmica, empresas biotecnológicas, etc.). La finalidad es distribuir los residuos de unas industrias a otras que los empleen como materias primas. El agua caliente obtenida de los procesos de la central térmica es dirigida a una piscifactoría, así como ella recibe gas y agua de refrigeración de la refinería [7–9].

La economía circular es una alternativa bastante viable que en muchas industrias ya ha empezado a aplicarse. Incluso industrias o cooperativas han surgido como intermediarias para proporcionar productos que para otros individuos o industrias son residuos, así como para tratar los residuos de ciertas industrias para convertirlos en nuevos productos. En resumen, la economía circular se basa en el principio «cerrar el ciclo de vida», generar bienes y servicios mientras se disminuye el índice de consumo y contaminación [7–9].

Para conseguir implantar el modelo económico de una economía circular se necesita estudiar y rediseñar las distintas etapas que engloban el ciclo de vida de un producto, consiguiendo una menor emisión de contaminantes, generación de residuos y una mejor gestión de recursos en la totalidad del ciclo de vida del producto. Para conseguir todo esto, existen multitud de herramientas de gestión medioambiental [7–9].

1.1.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL. HERRAMIENTAS DE GESTIÓN AMBIENTAL.

El entorno puede ser alterado por problemas naturales o antropogénicos. Los problemas naturales hacen referencia, por ejemplo, a terremotos, erupciones volcánicas o tormentas. Perturbaciones naturales que han acompañado a la Tierra a lo largo de su existencia y que, en ocasiones, generan problemas ambientales visibles e inmediatos. Los problemas antropogénicos, por lo general, no son tan inmediatos. Nos referimos a estos cuando hablamos de secuelas ambientales producidas por la actividad humana y que incrementan a altos niveles la contaminación del ecosistema. Hablamos de actividades cotidianas, como utilizar aerosoles, hasta el aumento de la población, que deriva en la colonización de áreas vírgenes, provocan daños, la mayoría irreversibles, en la Tierra.

A su vez, el desarrollo tecnológico y científico, o lo que es lo mismo, la revolución industrial, marcó un antes y un después en la problemática ambiental y, actualmente, las industrias constituyen, en su mayoría, uno de los mayores problemas de generación de residuos. La cantidad y el coste que supone gestionar estos residuos desemboca al desecho de muchos de ellos al entorno que nos rodea, a eso le añadimos ciertas sustancias, más frecuentemente en estado gaseoso, que son difíciles de almacenar y/o gestionar [8].

Uno de los problemas ambientales presentes más destacados derivado de la actividad humana es el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Algunos gases de efecto invernadero son el Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxidos de nitrógeno, Clorofluorocarburos (CFCs) y ozono (O_3), de los cuales el Dióxido de Carbono es el más abundante. Estos gases absorben radiación de onda larga (infrarroja) procedente del sol o reflejada por la tierra. Esta absorción de radiación ha hecho posible la vida en nuestro planeta debido a las condiciones climáticas que se generan, pero la concentración en porcentajes elevados de estos gases en la atmósfera terrestre provoca un calentamiento excesivo a niveles bajos, cerca de la superficie terrestre. El CO_2 es un componente gaseoso común de la atmósfera, siendo un 0.03% de su composición total. Su origen es natural pero también antropogénico, el

cual es el causante del exceso de CO₂ presente actualmente en la troposfera. El CO₂ antropogénico aparece principalmente por procesos de combustión, principalmente de materia fósil. Una alteración de la composición fundamental de gases presentes en la atmósfera provoca efectos anormales, como dicho calentamiento terrestre. Este incremento de temperatura se conoce como efecto invernadero [10,11].

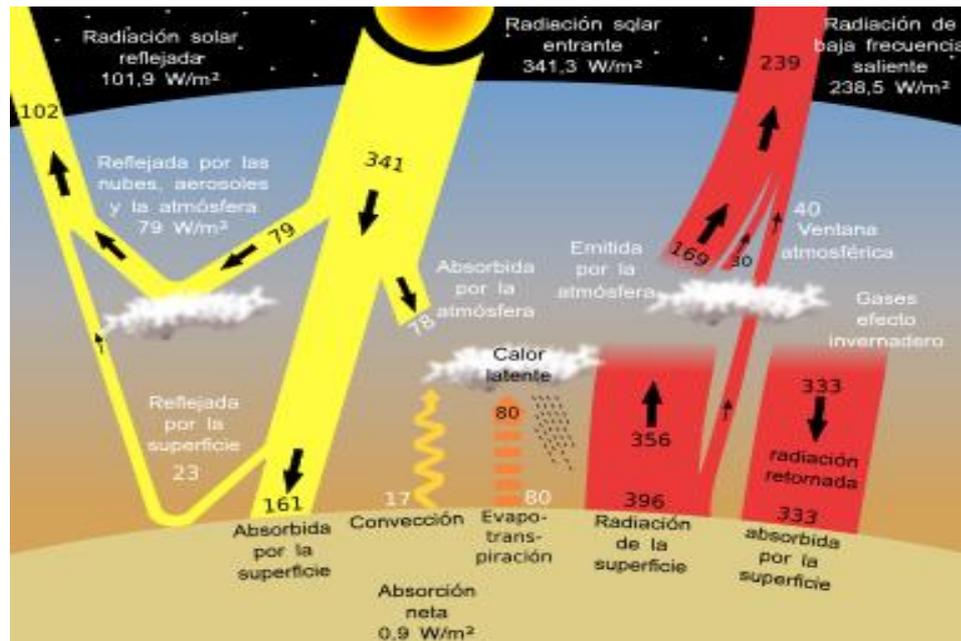


Imagen 10. Balance energético de la tierra.

La emisión antropogénica de CO₂ es una de las muchas consecuencias de las actividades humanas que perjudican el ecosistema. Para regular y gestionar estas actividades para hacerlas lo menos perjudiciales posibles, existen herramientas de gestión ambiental, como es el análisis de ciclo de vida, la huella de carbono, la evaluación de impacto ambiental, etc. Estas técnicas ayudan a hacer los productos, procesos y servicios más sostenibles, así como a concienciarnos del sacrificio ambiental que supone nuestro estilo de vida [8].

1.1.5. HUELLA DE CARBONO.

La huella de carbono es un indicador de la sostenibilidad de procesos unitarios, individuos, entidades o productos, mediante inventarios de emisiones de dióxido de

carbono equivalente. En el análisis de la huella de carbono se tienen en cuenta todos los gases que agravan el problema del calentamiento global, para luego convertir los resultados obtenidos de cada gas de efecto invernadero (GEI) a equivalentes de CO₂, de ahí que los resultados obtenidos se definan como CO₂ equivalente [10,12].

El estudio de la Huella de carbono (HC) es semejante al Análisis de ciclo de vida (ACV o LCA por sus siglas en inglés), y en estos se analizan los impactos ambientales para cada proceso por el que tenga que pasar un producto o actividad para llevarse a cabo, desde la obtención de la materia prima hasta su fin de vida útil. La diferencia radica en los impactos ambientales que abarca cada una de estas herramientas. Mientras que la huella de carbono (HC) analiza los gases de efecto invernadero, los cuales afectan al calentamiento global, el análisis de ciclo de vida abarca varios impactos ambientales, como la reducción de la capa de ozono, materia prima consumida y acidificación, entre muchos otros, en los cuales se incluye el potencial de calentamiento global (PCG), o lo que es lo mismo, el análisis de la huella de carbono (HC). El análisis de la huella de carbono (HC) es una versión simplificada del análisis de ciclo de vida donde el estudio se centra en los gases que influyen en el calentamiento global [10,12].

Por otro lado, es importante considerar que para garantizar la sostenibilidad de un proceso es necesario profundizar en varios impactos ambientales. De esta forma, contemplando los máximos problemas ambientales se puede llegar a asegurar que un proceso o actividad son sostenibles, puesto que lo que no se considere un problema en un impacto, lo puede ser en otro [9].

Para poder garantizar los resultados obtenidos se han establecido bases de datos (BBDD) que mediante plataformas o software han permitido el cálculo de la huella de carbono (HC) de cualquier proceso o actividad de forma sencilla, eficiente y equivalente [9].

1.1.5.1. NORMATIVA

El objetivo de establecer normativas es crear un lenguaje claro, simplificar ciertos aspectos del estudio y armonizar conceptos a nivel nacional e internacional de manera que distintos países tengan pautas o guías comunes. Para la huella de carbono (HC)

se han establecido y definido unos objetivos mediante un sistema de gestión internacional, de aplicación voluntaria, mediante las llamadas normas ISO [10,12].

Las normas que pueden ser aplicadas al estudio de un análisis de huella de carbono son las comprendidas entre la ISO 14064 e ISO 14069, las cuales están apoyadas por la ISO 14040 e ISO 14044, estas últimas prestadas como guías para la estandarización de un ACV. Las normas comprendidas entre la ISO 14064 e ISO 14069 no están relacionadas mediante ningún procedimiento esquemático en el que la aplicación de una exija la de otra, pero se recomienda para garantizar la obtención y verificación de los resultados [10,12]. A continuación se profundiza sobre cada una de ellas [9]:

- **ISO 14064.** “Verifica y contabiliza los gases de efecto invernadero”, no solo de CO₂ sino todo gas que contribuya al calentamiento global, asegurándose que la unidad de medida sea idéntica independientemente de donde se emita, es decir, que una tonelada de CO₂ sea la misma emitida desde una industria petroquímica que acumulada en una ciudad, causada por la congestión de vehículos. Esta norma ISO se divide en tres partes.
 - * Parte 1. Requisitos para llevar a cabo el inventario de gases de efecto invernadero (GEI).
 - * Parte 2. Guías para llevar a cabo informes de mejora para mitigar o eliminar las emisiones de GEI y, su correspondiente seguimiento.
 - * Parte 3. Directrices para verificar la información obtenida.

- **ISO 14065.** “Greenhouse gases -- Requirements for greenhouse gas validation and verification bodies for use in accreditation or other forms of recognition”. Esta norma ayuda a verificar los informes obtenidos de la producción de gases de efecto invernadero (GEI). La suelen aplicar organizaciones o compañías de verificación, junto a la ISO 14064-parte3.

- **ISO 14066.** “Competence requirements for conducting greenhouse gas validation and verification engagements with guidance for evaluation”. La ISO 14066 contempla las competencias de verificación que no hace la ISO 14065.

- **ISO 14.067.** “Carbon footprint of products”. Similar a la ISO 14064 pero específica para productos, no organizaciones.

- **ISO 14.069:** “Quantification and reporting of GHG emissions for organizations (Carbon footprint of organization) -- Guidance for the application of ISO 14064-1”. Recoge las instrucciones o guías básicas de la ISO 14064-parte 1, orientando su aplicación.

1.2. ACOLCHADOS EN PLASTICULTURA

En los años 50 se inició el empleo de polímeros termoplásticos en la agricultura. Las numerables ventajas que presentan estos materiales termoplásticos como el bajo coste, fácil manipulación, alta producción y gran versatilidad, entre muchas otras, hacen de este un material ideal para comercializar y adaptar a diferentes sectores laborales. En este caso hablamos del empleo del plástico en el sector agrario y hortícola, o lo que es lo mismo, plasticultura. La plasticultura es una rama de la agricultura encargada de investigar, estudiar y observar el empleo de estos materiales en sectores rurales, ya sea como tuberías, cubiertas de invernaderos, acolchados, túneles, ensilados, depósitos de agua, sistemas de riego u otros [10].

El objetivo de emplear plástico en este sector es, principalmente, obtener un producto en la mayor cantidad posible, en poco tiempo y con una calidad notable. Todo ello se ve perjudicado por las numerosas variables ambientales (radiación solar, humedad, viento, lluvia...etc.) que impiden un buen desarrollo del cultivo, reflejándose en la producción, ya sea esta baja o con un producto no apto para el mercado [10].

Los acolchados plásticos son finas láminas de material termoplástico que se extienden a lo largo del terreno del cultivo. Esta lámina o film termoplástica influye notablemente en el desarrollo del cultivo: manteniendo la humedad del suelo, los polímeros son impermeables al vapor de agua y de esta forma las raíces consiguen hidratarse a una menor profundidad; aumentando la temperatura del suelo, se crea un efecto invernadero, dejando salir el exceso de radiación durante el día y manteniendo una temperatura cálida por la noche; evitando el crecimiento de malas hierbas, las altas temperaturas alcanzadas bajo el acolchado terminan por sofocar las malas hierbas que aparecen y, por último, aumentando la fertilidad del suelo, ya que el aumento de humedad y temperatura favorecen la nitrificación (nutrientes vegetales) [10].



Imagen 11. Cultivo con acolchado opaco.

Según el tipo de cultivo, suelo y clima de la zona, las características requeridas del acolchado varían, y por ello mismo existen varias alternativas de film para acolchado. A continuación se presentan algunas [10-12]:

- **COLOR.** El color del acolchado influye notablemente en la recepción de la radiación solar, afectando al microclima creado entre el plástico y el suelo, así como a la cantidad de luz reflejada por el acolchado en la parte externa. Los acolchados pueden ser transparentes, negros, rojos y mixtos entre otros.
- **MATERIAL BASE.** El material de partida marcará las propiedades ópticas y mecánicas del acolchado. La mayoría de acolchados están hechos con polietileno de baja densidad (LDPE) o lineales de baja densidad (LLDPE), por su peso ligero, resistencia química y mecánica y por su bajo coste. Por otro lado, también se pueden encontrar de polietileno de alta densidad (HDPE), excelente material para situaciones en las que se requiera una buena resistencia a la corrosión; de etileno-acetato de vinilo (EVA), baja resistencia química, y alta permeabilidad de gases, pero buena resistencia mecánica y se requiere menos temperatura para moldearlo, y por último, el acolchado de policloruro de vinilo

(PVC), el más inestable pero permite someterlo a varios procesos para su transformación.

- **DIMENSIONES.** El grosor del acolchado influye en las propiedades ópticas y mecánicas del material. También influye en el coste de este. Dependiendo del tipo de cultivo (tomates, lechugas, pimientos...etc.) el espesor requerido será distinto.

1.3. BIOPLÁSTICOS Y PLÁSTICOS BIODEGRADABLES: PLÁSTICOS VERDES.

La necesidad de una solución innovadora para reducir la contaminación y el daño social que producen los residuos plásticos es inevitable. Un mayor reciclaje de los residuos plásticos por sí solo no es una solución integral. Además, la disminución del uso de plásticos de origen fósil es un aspecto importante de la sostenibilidad. Como alternativa a los plásticos fósiles en el mercado, los bio-plásticos, los plásticos biobasados y los plásticos biodegradables están ganando en popularidad. Según algunos estudios, los productos obtenidos a partir de polímeros biodegradables poseen rendimientos similares a los materiales plásticos comunes procedentes del petróleo y todo ello a partir de materias primas biológicas, más económicas y sostenibles [13].

En particular, la producción bio-plástica (BPL) a partir de biomasa es una nueva oportunidad que debe explorarse y mejorarse aún más, no solo a nivel de optimizar el recurso fósil o reducción de la contaminación ambiental, sino que la simple producción y el mismo desarrollo del proceso de reciclado de materiales plásticos producen dióxido de carbono, sin olvidar que la producción de olefinas en los hornos de pirólisis es uno de los procesos en la industria química que más cantidad de CO₂ genera. De esta forma, podría ser un nuevo recurso sostenible, a nivel de optimización de recursos, moderación de contaminación ambiental y como disminución de la huella de carbono. El objetivo de este estudio es evaluar la huella de carbono como consecuencia de la fabricación, transporte y reutilización o degradación de los acolchados de ambos materiales poliméricos, ya que la liberación de CO₂ asociada a estos productos contribuye al cambio climático [13].

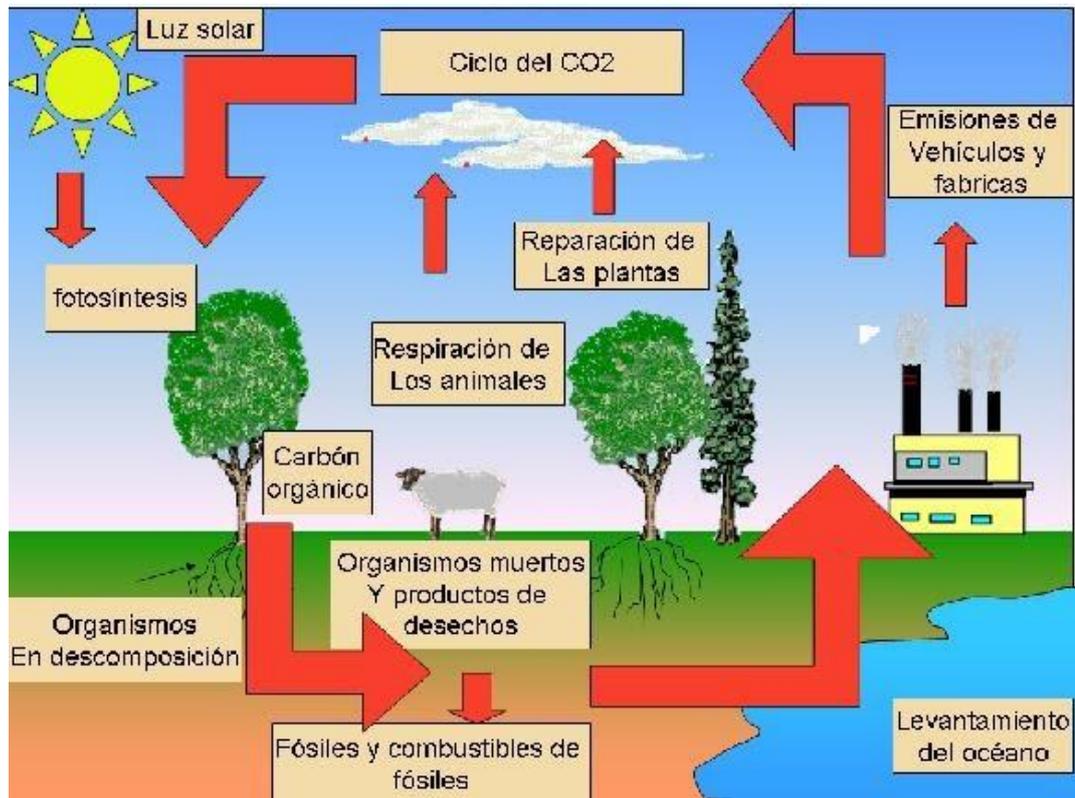


Imagen 12. Ciclo del dióxido de carbono (CO₂). Se consume CO₂ durante el crecimiento de las cosechas.

Los plásticos verdes son una gran familia de materiales diferentes, no son un solo material, sino muchos con diferentes propiedades y aplicaciones. En general, se alude a estos materiales como término general que engloba tanto plásticos biobasados y plásticos biodegradables. Es importante señalar que un plástico biodegradable no conlleva que su composición se base en materia biológica, ni que un biobasado, o lo que es lo mismo, un plástico fabricado a base de biomateria, sea degradable, así como que un biodegradable puede ser biobasado y un biodegradable puede ser sintetizado a partir de materia biológica. En resumen, la palabra bioplástico, generalmente, hace referencia a un polímero de origen vegetal pero, dependiendo del contexto en el que se emplee, en ocasiones se quiere hacer referencia a un plástico que, además de tener base biológica es capaz de biodegradarse, remarcando que no todo bioplástico es biodegradable [13].

Otro concepto importante es la compostabilidad, utilizado, en ocasiones, indistintamente con el término biodegradabilidad. Un plástico con la propiedad de biodegradarse no tiene por qué cumplir con las condiciones necesarias para definirse

como compostable, a la vez que un material plástico certificado como compostable sí es biodegradable [14].

A continuación se definirá con mayor profundidad cada uno de los términos citados anteriormente.

1.3.1. PLÁSTICO BIOBASADO.

Cuando a un plástico se describe con el término biobasado se hace referencia a un material, compuesto principalmente o en su totalidad de materia orgánica. Esta biomasa puede ser desde un microorganismo o componentes de un alga hasta una caña de azúcar o el almidón extraído del maíz [15].

La composición orgánica de un material biobasado no está ligada al 100% con la biodegradabilidad de este, como ya se ha comentado con anterioridad, podemos tener un material plástico biobasado, como es el caso del Bio-PE, y que no biodegrade. El Bio-polietileno presenta las mismas propiedades que el polietileno convencional con la única diferencia de que la materia prima con la que se obtiene generalmente es azúcar de maíz. La fermentación de los azúcares produce etanol, la deshidratación de este genera etileno, el cual, tras un proceso de polimerización da origen a lo que se conoce como Bio-PE, un material bioplástico, con idénticas propiedades que el polietileno convencional y con la capacidad de moldearlo con la misma tecnología y facilidad [15].

La identificación entre un Bio-PE y el PE convencional se puede llevar a cabo mediante análisis de laboratorio. El carbono, componente químico principal de toda materia orgánica, se presenta atómicamente de varias formas distintas. Dependiendo del número de neutrones existentes en su núcleo encontramos distintos isótopos. Entre estos isótopos está el carbono-12, con 6 neutrones en su núcleo y el más abundante; el carbono-13, con 7 neutrones; y el carbono-14, inestable, con 8 neutrones en su núcleo. La respiración en los vegetales es constante y equivalente en proporción de C12 y C14, pero cuando un ser vivo muere se comienza a transformar dicho isótopo C14, inestable, en C12. Teniendo en cuenta que el material plástico procedente del petróleo es materia fósil, la proporción de carbono-12 es mucho más elevada en comparación al carbono-14 que podemos encontrar en la biomasa de un biobasado cosechada en torno a unos 5-8 años [15].

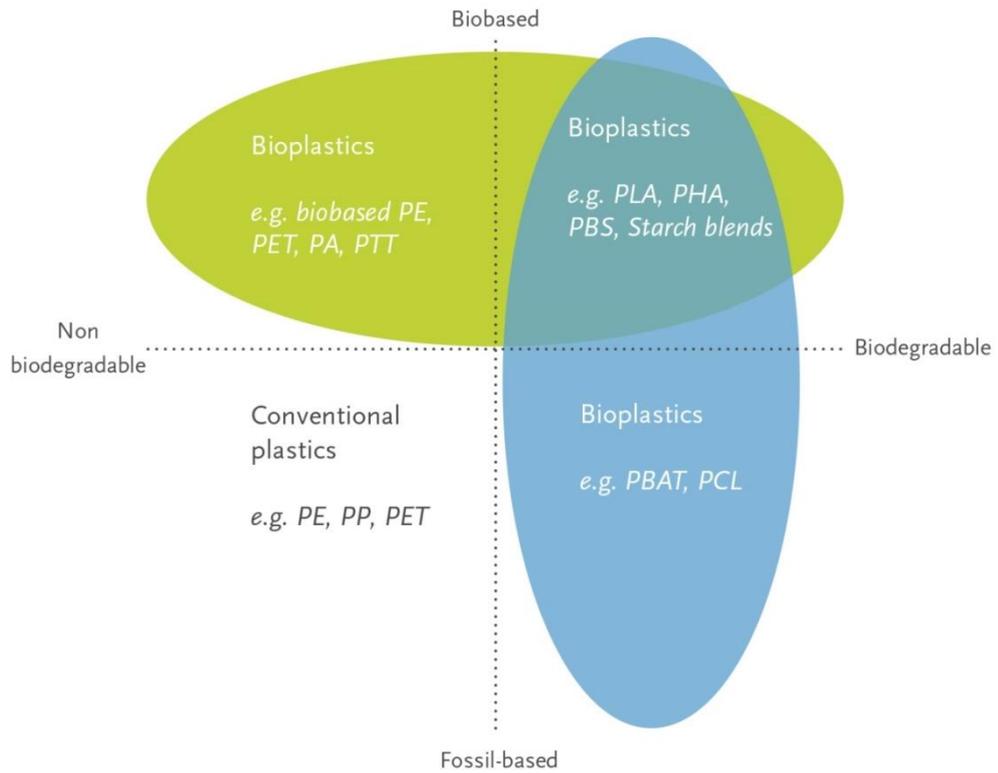


Imagen 13. Relación entre polímeros convencionales, bioplásticos y plásticos biodegradables.

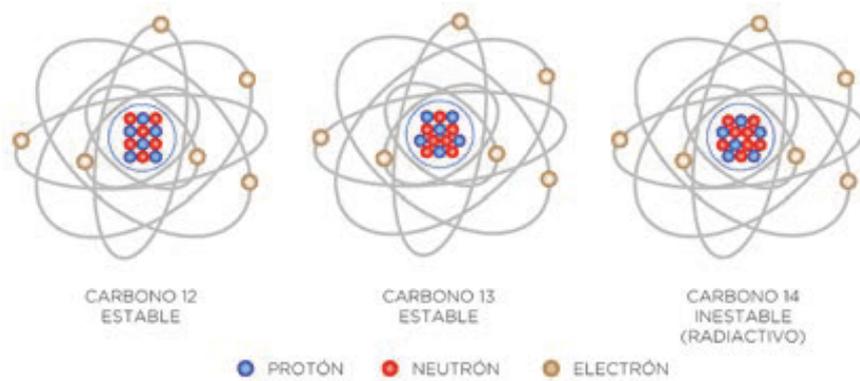


Imagen 14. Isótopos del carbono.

El método ASTM 6866-12, métodos de ensayo normalizados para determinar el contenido biológico de muestras sólidas, líquidas y gaseosas mediante análisis radiocarbónico o datación por radiocarbono, permite conocer la proporción de materia

C14 de un polímero, así como la edad de cierto material que lo compone, es decir, la proporción de material procedente de un recurso renovable [15].

Con la finalidad de conseguir un elevado índice de certeza a la hora de identificar un material biobasado, asociaciones como ASTM internacional e ISO han ideado guías y ensayos para plásticos biobasados y biodegradables como la citada anteriormente, la UNE-EN ISO 14855, UNE-EN ISO 17556, UNE-EN ISO 14852, UNE-EN ISO 14853. UNE-EN ISO 15985 y UNE-EN ISO 20200, de las cuales se hablará más adelante. El empleo de estas normas como guía de ensayos supone algunas limitaciones, puesto que son análisis llevados a cabo en laboratorio con unas condiciones predeterminadas y controladas, pero nos ofrecen la oportunidad de obtener un comportamiento de referencia del material examinado. Por otro lado, para identificar un material no es suficiente con afirmar que la muestra analizada contiene materia de origen renovable sino que también hay que indicar en qué proporción [15].

1.3.2. PLÁSTICO BIODEGRADABLE.

La biodegradación es un proceso químico, físico o biológico durante el cual los efectos de la radiación solar, cambios de temperatura o presencia en el ambiente de humedad o microorganismos convierten o degradan los materiales plásticos en sustancias naturales como agua, dióxido de carbono y biomasa. Por lo general, la biodegradabilidad se entiende como una propiedad adicional de ciertos tipos de biobasados, pero no solo ciertos plásticos de origen vegetal o animal son capaces de biodegradarse sino también algunos materiales que provienen de materia fósil. Un ejemplo sería la Policaprolactona o PCL ($C_6H_{10}O_2$), un polialcohol de origen fósil y biodegradable, empleado a menudo como aditivo para otros polímeros, mejorando así sus propiedades (como en el caso del poliuretano) [15].



Imagen 15. Proceso de degradación de un plástico biodegradable.

En este contexto cuando empleamos la palabra bioplástico el prefijo bio hace referencia tanto al origen como a la biodegradabilidad del material, y puesto que la composición de un material biodegradable puede tener origen tanto en materia fósil, vegetal o animal, la mejor forma de calificar y/o englobar a estos materiales sería como plásticos biodegradables únicamente. De esta forma podemos distinguir dos tipos de bioplásticos o biobasado, los no biodegradables y los biodegradables y a su vez dos tipos de plásticos biodegradables, los biobasados o bioplásticos y los resultantes del petróleo [13-15].

Los materiales biodegradables han existido siempre pero desde hace unos años son los protagonistas de numerosas investigaciones y en particular a lo referido a los materiales plásticos, ya que suponen una contribución a mejorar el estrechamiento de los niveles de contaminación, residuos plásticos en nuestro ecosistema y de CO₂. El proceso de biodegradación depende de las condiciones ambientales circundantes (ubicación o temperatura), del material y de la aplicación. Por este motivo surge la necesidad de normas que verifiquen y/o determinen dicha biodegradabilidad. La norma ISO 14855 establece unas condiciones de compostaje en las cuales se analiza la biodegradabilidad aeróbica del material plástico midiendo el CO₂ producido en dicha biodegradación en comparación con un material biodegradable bien definido. Esta norma manifiesta que para atestiguar que un material plástico es biodegradable este tiene que alcanzar un 90% de biodegradación en unas condiciones de temperatura, humedad y aire establecidas por dicha norma (58 °C, 55% de humedad y 100 ml/min).

De esta forma, si el material llega o sobrepasa el 90% de CO₂ emitido se demostrará que dicho material es un plástico biodegradable [13-15].

Por otro lado, en este trabajo se quiere evaluar la huella de carbono para un plástico biodegradable en suelo y para ello se trabajará con la norma UNE-EN 17033, esta norma también evalúa la biodegradabilidad pero en este caso para un plástico empleado en la agricultura y horticultura. Como ya se ha mencionado antes, las condiciones del entorno, incluso de la misma materia que compone el material plástico son determinantes para su degradación, por lo tanto, para un material en el cual su fin de vida útil se completará en suelo, la norma UNE-EN 17033 será la más adecuada para demostrar si nuestro material se puede considerar biodegradable, puesto que en ella también se hace referencia a lo especificado en la UNE-EN ISO 17556, específica para biodegradación de plásticos en suelos. Aunque ya se hablará de esta norma más adelante es interesante remarcar que para cada función asignada a un material plástico, bien sea como envase o destinado a plasticultura, una vez moldeado, existe una norma que regula la evaluación de dicha biodegradabilidad [13-15].

1.3.3. PLÁSTICO COMPOSTABLE.

El término compostabilidad se suele confundir con biodegradabilidad. Si bien es cierto que un plástico compostable es biodegradable, no todo plástico biodegradable es compostable. Esta característica de compostabilidad está regulada por normas como la UNE-EN 14995 y UNE-EN 13432. La norma UNE-EN 14995 especifica unas variables y condiciones de ensayo que verifican la compostabilidad de un material en un periodo de tiempo controlado, mientras que la UNE-EN 13432 es específica para envases y embalajes de plástico [14-15].

En definitiva, el término compostable hace referencia a la biodegradabilidad superior al 90% de un material plástico, respetando unos límites de concentración en metales pesados, carbono orgánico total (COT), sólidos secos totales (SST) y sólidos volátiles, entre otras especificaciones de la norma. Es decir, el material considerado compostable debe ser biodegradable y tener una cierta calidad de compost para considerarse como tal. Se considera compost a la biomasa obtenida como consecuencia de una

biodegradación controlada de materia orgánica, denominado proceso de compostaje. El compost es empleado posteriormente como abono o fertilizante [15].



Imagen 16. Planta de compostaje.

1.3.4. ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO

El acolchado de polietileno (PE) proporciona importantes beneficios a los productores de frutas y hortalizas porque tiene el potencial de mejorar la calidad de los cultivos y aumentar el rendimiento [17]. Sin embargo, el uso de acolchaos de polietileno genera contaminación plástica y merma un recurso valioso y no renovable, lo que plantea desafíos para la sostenibilidad de la producción de frutas y verduras. Los acolchados plásticos biodegradables (BDM) son una alternativa sostenible al acolchado de PE porque están diseñados para descomponerse en agua, dióxido de carbono y biomasa [12,16].

Los BDM plásticos proporcionan beneficios similares al acolchado de polietileno (PE), pero se consideran más sostenibles. Al final de su vida útil el acolchado no necesita ser retirado del suelo y sometido a procesos de tratamiento, sino que pueden ser biodegradados en el mismo medio de cultivo, puesto que están diseñados para ello, incluso tratados para obtener compost. El uso de BDM tiene el potencial no sólo de

reducir los impactos ambientales negativos asociados con el uso del plástico común, sino también de reducir la mano de obra asociada con las actividades de eliminación del mismo, el CO₂ producido en la síntesis de estos y el ahorro de un recurso no renovable y valioso, como es el petróleo [10,12].

Microorganismos, el ácido láctico, la caña de azúcar, la celulosa y el almidón son algunos materiales empleados como materia prima en la producción de bioplásticos que, por lo general, son polímeros biobasados y biodegradables, como es el caso del Ácido Poliláctico (PLA), Polihidroxialcanoato (PHA), y el Almidón Termoplástico (TPS), que además son termoplásticos. Éste último, TPS, uno de los protagonistas en este trabajo fin de máster [12,16].

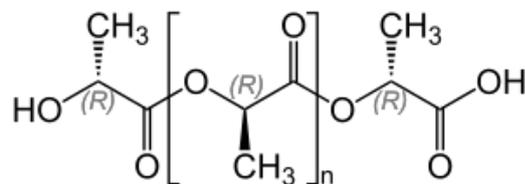


Imagen 17. Estructura Ácido Poliláctico (PLA).

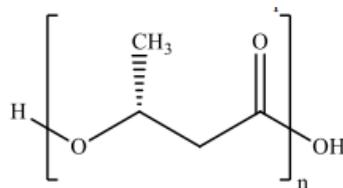


Imagen 18. Estructura Polihidroxialcanoato (PHA).

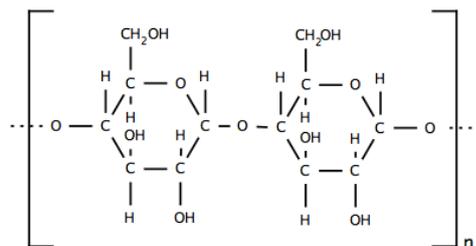


Imagen 19. Estructura Almidón Termoplástico (TPA).

El TPS, conocido como almidón termoplástico, es un bioplástico basado en almidón. El almidón, en este caso de maíz, tiene una alta disponibilidad en el mercado y a bajo coste garantizando así su disponibilidad en el mercado. Este material es realmente prometedor, no solo por sus beneficios como material base en una industria dedicada a la producción de almidón termoplástico, sino que presenta varias ventajas para minimizar la amenaza que supone el residuo plástico de origen fósil. El almidón es un

material no tóxico, fácilmente compostable en el suelo y seguro para el consumo humano [18,19].

El almidón es un homopolisacárido presente en las células vegetales, donde su principal función es la reserva de energía. Éste complejo polisacárido está formado por monómeros de glucosa, los cuales mediante enlaces O-glucosídicos forman la amilosa y amilopectina, dos polímeros naturales que componen el almidón. La amilosa constituye un 20-30% de la molécula de almidón, formando una estructura lineal helicoidal con 6 moléculas de glucosa por cada 2π radianes. Las glucosas se unen mediante enlaces α (1 \rightarrow 4), como se muestra en la imagen 20. En cambio, la amilopectina, a diferencia de la amilosa, presenta ramificaciones cada 12-30 glucosas unidas por enlaces α (1 \rightarrow 6) y, constituye entre un 80-70% del almidón [18,19].

La estructura helicoidal presente en la amilosa se debe a las interacciones entre moléculas próximas formando puentes de hidrógeno, de esta forma los átomos de hidrogeno quedan en el interior de la hélice y los grupos hidroxilo quedan en la parte exterior de ésta. La estructura de la amilopectina tiene una mayor complejidad. Ésta, al disponer de ciertas ramificaciones, no deja que llegue a formarse una estructura en forma de hélice tan destacada y/o precisa como en el caso de la amilosa [18,19].

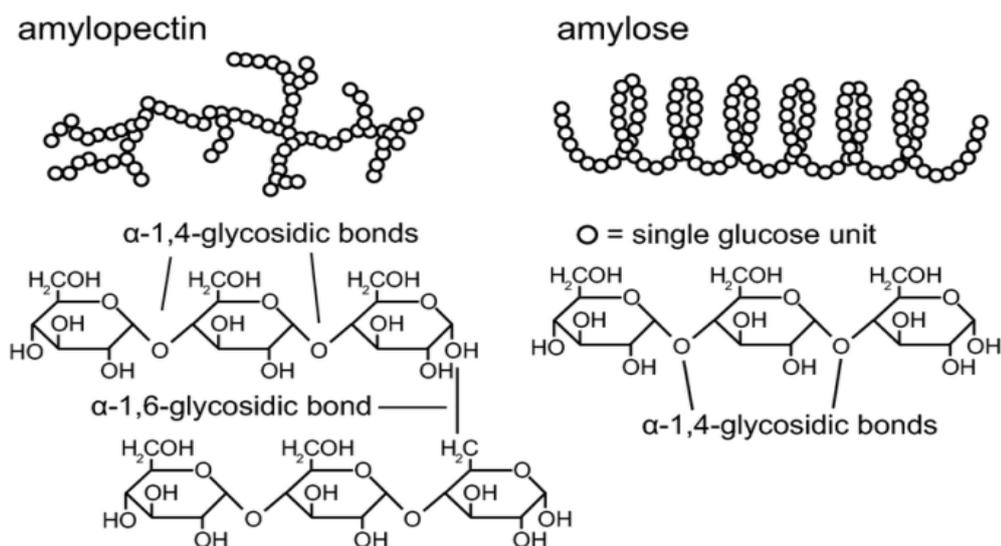


Imagen 20. Estructura de los subpolisacáridos del almidón.

La estructura del almidón dispone de regiones cristalinas y semicristalinas que permutan entre sí. La conformación en forma de hélice de la amilasa junto a los centros o puntos de ramificación de la amilopectina forma estructuras amorfas, secciones desordenadas, mientras que la estructura tridimensional ordenada en forma helicoidal de las ramificaciones de la amilopectina forma estructuras cristalinas. Es decir, la amilopectina posee una estructura semicristalina a diferencia de la amilasa, que es amorfa.

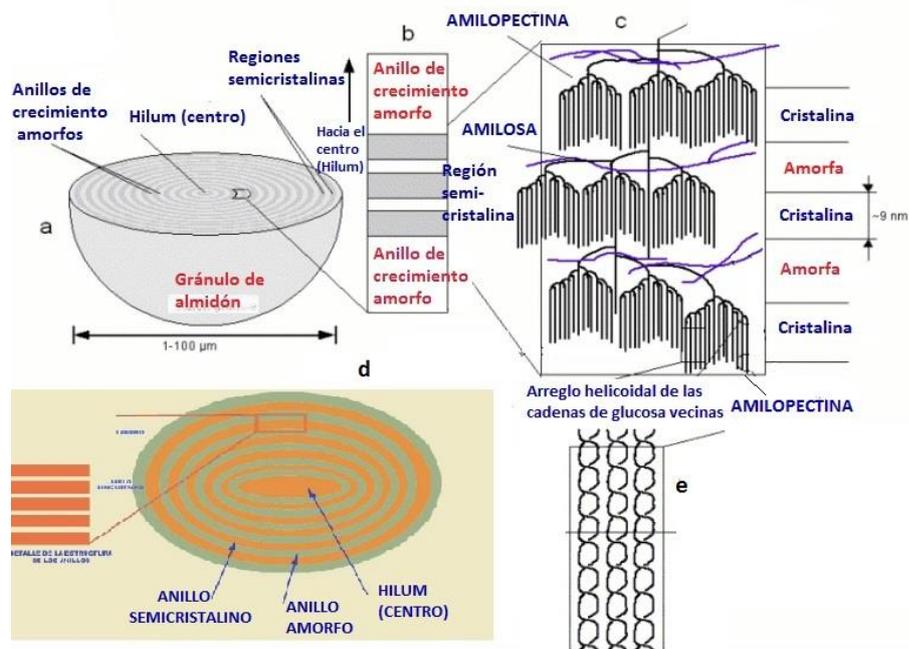


Imagen 21. Disposición estructuras semicristalinas y amorfas dentro del gránulo de almidón.

La combinación de ambas moléculas da forma de gránulo a las partículas del almidón, generando regiones semicristalinas y amorfas alternadas entre sí como se muestra en la imagen 17. Esta estructura estabiliza los gránulos de almidón.

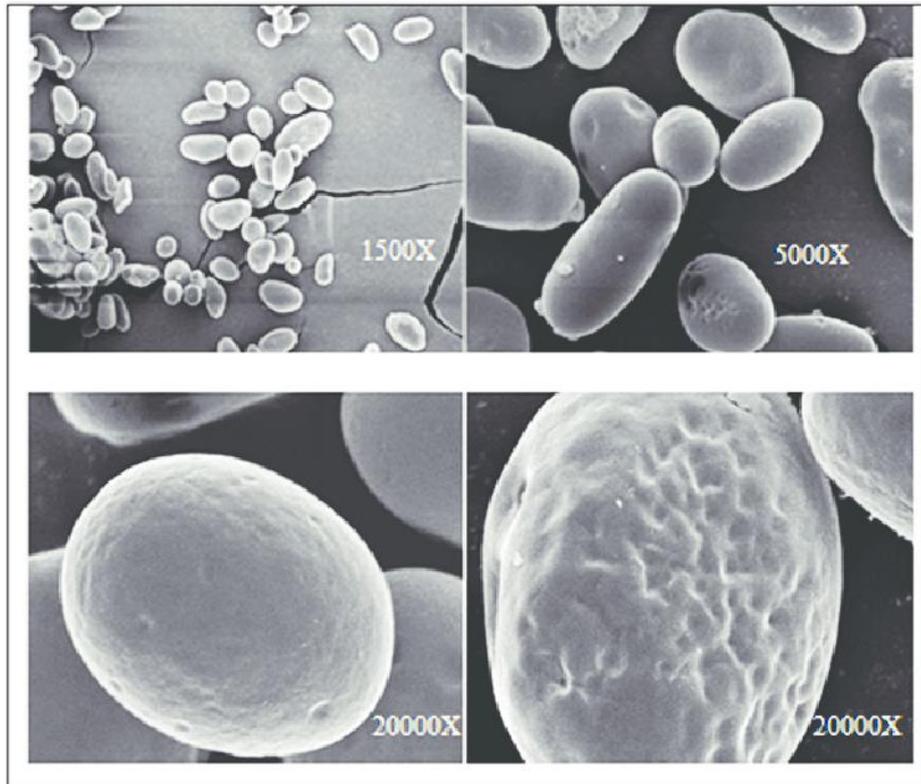


Imagen 22. Micrografía electrónica de granos de almidón

1.3.4.1. **GELATINIZACIÓN**

La gelatinización promueve la plasticidad del almidón, aumenta la tendencia de una estructura amorfa que le aporta al material elasticidad, flexibilidad, fluidez y una mayor resistencia al impacto, éste como beneficio secundario [19-21].

Las interacciones entre los polisacáridos que forman el almidón son relativamente fuertes lo que las hace que este sea insoluble en agua fría y dificulte la penetración de las moléculas de agua, en cambio, aplicando la energía suficiente por medio de calor las regiones amorfas y con interacciones más débiles consiguen absorber cierta cantidad de agua. El agua actúa como plastificante principal, en una proporción baja, generalmente por debajo del 20% en peso de almidón, se introduce en las regiones amorfas de los gránulos de almidón con ayuda de calor, hinchándolos y perdiendo las propiedades que le confiere su estructura cristalina [19-22].

El aumento de temperatura provoca vibraciones en los enlaces que unen a las moléculas de amilosa y amilopectina, lo que lleva al desplazamiento de las cadenas poliméricas. La disminución del empaquetamiento de las mismas permite el paso de moléculas de agua, dando lugar al hinchamiento del gránulo. El hinchamiento del gránulo es proporcional a las moléculas de agua retenidas. Las moléculas de amilosa son las primeras que interaccionan con el agua por tener enlaces más débiles. En cambio, las moléculas de amilopectina al presentar una estructura cristalina y, por tanto, más compacta y ordenada, sus enlaces necesitan un aporte de energía mayor para disminuir el empaquetamiento de sus cadenas o rotura de enlaces.

Con la liberación de las primeras cadenas polisacáridas (amilosa) en el medio acuoso, se comienza a observar cierta viscosidad. Esta viscosidad es debida a la formación de micelas. Al hincharse y romperse el gránulo las cadenas que se liberan se rodean de agua forman micelas. Esto se debe a que los grupos hidroxilo de las cadenas son hidrófilas, mientras que los átomos de hidrógeno son lipófilos. Estas micelas generan una pasta de almidón como se muestra en la imagen 24. En este momento el complejo comienza a tener un comportamiento no newtoniano.



Imagen 24. Inicio del proceso de gelatinización.

La temperatura óptima de gelatinización para el almidón de trigo, por ejemplo, se encuentra entre los 75-80°C. Esta temperatura varía en función del tipo de almidón. A esta temperatura la gelatinización se encuentra más avanzada, ya que las cadenas de la amilopectina han conseguido separarse o fragmentarse debido a las vibraciones generadas por el aporte de energía. Estas cadenas difunden a través de la matriz acuosa obteniendo un mayor número de micelas. De esta forma se comienza a unificar la mezcla y a obtener este aspecto de gel, finalizando así el proceso de gelatinización [19-22]. En la imagen 25 se muestra el proceso de gelatinización por etapas.

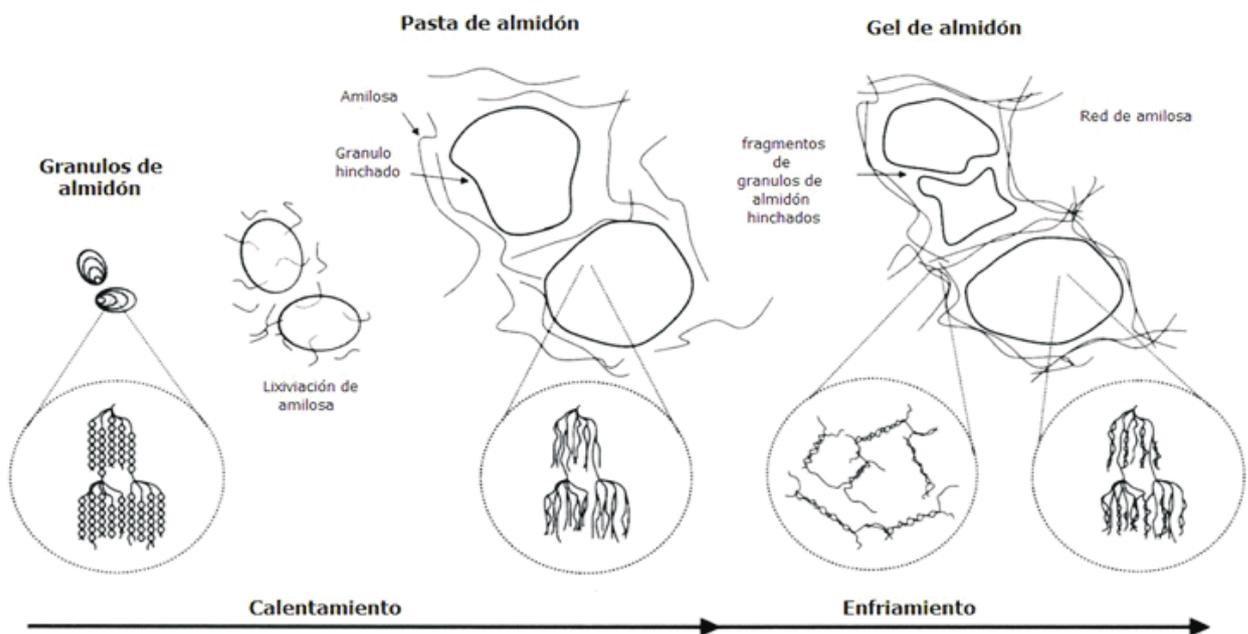


Imagen 25. Proceso de gelatinización del almidón.

Por último, estos procesos son mejorados mediante plastificantes. Uno de los más comunes es el glicerol. Estos compuestos actúan como emulsionantes, ayudando a que la mezcla se unifique y a obtener enlaces más fuertes en las micelas generadas. De esta forma, se obtendrá un gel de almidón más estable.

1.4. RECILAJE DE ENVASES LIGEROS

Los plásticos siguen beneficiando a la sociedad de innumerables maneras, a pesar de que recientemente su enfoque público se ha centrado principalmente en las preocupaciones ambientales, considerando la contaminación a largo plazo que representan. Los beneficios de los plásticos son particularmente evidentes. Son versátiles, rentables, requieren menos energía en su etapa de producción que los materiales alternativos como el metal o el vidrio, y pueden fabricarse para tener muchas propiedades diferentes. Debido a estas características, los polímeros se utilizan en diversas aplicaciones, desde estar presentes en objetos cotidianos como una bolsa, un bolígrafo o un teléfono móvil hasta servir como reemplazo de articulaciones en el sector sanitario. Otra característica, o más bien beneficio, es la alternativa de ser reciclados, puesto que su exposición y acumulación en el ecosistema no es prudente ni sostenible, sin olvidar que provienen de una fuente no renovable, el petróleo, actualmente un recurso en continuo agotamiento como resultado de la creciente producción masiva de artículos de consumo plástico y aunque los beneficios sociales del plástico son de gran alcance y validez, esta valiosa mercancía ha sido objeto de una creciente preocupación medioambiental [21].

Mientras que algunos residuos plásticos se reciclan, la mayoría terminan en ríos, lagos, en el mar o en un vertedero, donde pueden llegar a pasar siglos para que dicho material se degrade. Una botella de plástico tardaría unos 500 años en descomponerse [21]. En 2017, se produjeron 64.4 millones de toneladas de plástico en Europa, donde España participó con un 7.7%. Con los años la producción de material plástico aumenta y aunque su reciclaje también, no llega a ser suficiente. En Europa se recicla alrededor de un 30-40% del plástico producido y el 15-20% se emplea en recuperación de energía, el resto se dirige a vertederos (40-45%) y, la gran mayoría, son emitidos a nuestro ecosistema ocasionando problemas en la salud humana, pública y marina [24,25]. La persistencia y acumulación de estos materiales en los océanos produce graves problemas ambientales como: lesiones y muertes de aves marinas, mamíferos, peces y reptiles resultantes del enredo y la ingestión de plástico, el transporte de especies marinas no nativas a nuevos hábitats sobre restos plásticos flotantes, y la asfixia del fondo marino, impidiendo el intercambio de gas y creando terrenos duros artificiales, resultantes del hundimiento de residuos plásticos. Alrededor del 10% de

plásticos que acaban depositados en el mar se mantienen en la superficie, el resto permanece en las profundidades donde el oxígeno y la luz escasean agravando la lenta degradación de estos materiales [21].

Con el tiempo estos materiales se fragmentan dificultando su eliminación del medio y su integración a nuestro sistema respiratorio o a la cadena alimentaria. Estos problemas derivados por la acumulación de residuos plásticos indican que es urgente hacer uso de nuestros sistemas integrados de residuos (SIG) y fabricar un reemplazo sostenible para impedir su acumulación masiva, derivando problemas de gestión [23,26].



Imagen 26. Microplásticos.

Los plásticos destinados a la plasticultura representan un 3.4% de la producción anual europea, lo que generaría 2.2 millones de toneladas anuales. La mayoría de estos desechos se fabrican con un solo tipo de plástico, aditivado o no, y son adecuados para el reciclaje, normalmente de policloruro de vinilo (PVC) y polietileno de baja densidad (LDPE), ambos posicionados entre los cuatro materiales plásticos más empleados. El PVC con un 10.2%, empleado en la producción de marcos de ventanas, perfiles, aislamiento de cables, revestimientos de suelos y paredes, tuberías, mangueras de jardín y piscinas inflables, entre muchos otros; y con un 17,5% de empleabilidad le supera el LDPE, consumido como materia prima para la fabricación de bolsas, bandejas reutilizables y películas agrícolas, por ejemplo [24,25].

En todo momento se habla de polímeros termoplásticos, que como ya se comentó en el apartado de generalidades de polímeros, los termoplásticos presentan una estructura

amorfa o semicristalina, generalmente, el porcentaje de estructura amorfa es notablemente mayor que la estructura cristalina. Por este motivo, a temperaturas no muy altas (temperatura de transición vítrea) se consigue fundir el material y, de esta forma, se facilita la incorporación de aditivos, su moldeo, manipulación, así como permite al material ser reciclado. El proceso de reciclaje, aunque ya se desglosará más adelante, consiste en la separación por tipos de polímeros, su posterior limpieza o eliminación de cualquier residuo que perjudique el producto final y, por último, su fundición, obteniendo pellets, nueva materia prima, cerrando el ciclo correspondiente a un modelo de economía circular. Un polímero termoestable, por el contrario, no puede fundirse porque perdería su estructura molecular inicial, las cadenas se romperían para conseguir un estado fundido, ya que estas se encuentran ordenadas y fuertemente unidas (estructura cristalina) [3-6].

El reciclaje de estos materiales termoplásticos se ha convertido en un método racional y elemental. En el año 2019 se reciclaron 616.736 toneladas de plástico en España, un 8% más que el año anterior [24,25]. Aun así, el proceso de reciclaje de materiales plásticos no es tan eficiente como otros, por ejemplo el del vidrio, donde el 100% de los envases depositados se reciclan manteniendo las propiedades del material original. En cambio, el plástico una vez reciclado pierde ciertas propiedades. En el caso del reciclaje de acolchados el porcentaje de reciclado es aún más pequeño, puesto que se fractura y se pierden fragmentos en el proceso de recogida, además llevan restos de fertilizantes, arena, piedras...etc., que dificultan el reciclado y modifican la calidad del producto final. Para evitar la pérdida de propiedades ópticas y mecánicas del material, los polímeros son sometidos a varias etapas de tratamiento. Por este motivo existe una alta competencia entre su reciclaje o recuperación en forma de energía. Por otro lado, teniendo en cuenta las numerosas hectáreas de cultivo, las cantidades y dimensiones de plástico empleadas en plasticultura son excesivas y esto también dificulta su reciclado, puesto que las organizaciones encargadas del tratamiento de plásticos no están preparadas para reciclar estos materiales sino envases y embalajes de nuestra vida cotidiana con un tamaño estandarizado [22,23].

Actualmente la Ley que rige el correcto uso de este tipo de residuos es muy general. La Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, especifica que los residuos deben tratarse a cargo del productor de estos o encargárselo a una entidad de gestión. Todo

ello acreditado documentalmente. Además, en el caso de entregarlo a una entidad de gestión, deben documentar qué tipo de residuo les entrega [22,23].

Actualmente no hay ningún sistema de gestión de residuos destinado a reciclar específicamente residuos procedentes de la plasticultura, puesto que como ya se ha comentado anteriormente los materiales presentan ciertos derivados de su empleo agrícola como restos de fertilizantes o arena que pueden perjudicar la calidad final de otros residuos limpios como puede ser una botella. MAPLA, Medio Ambiente Agricultura y Plásticos, es un nuevo Sistema Integrado de Gestión, surgido en 2020, que tiene como objetivo tratar residuos plásticos derivados del sector agrícola. Alguno de sus precursores son Ape Europe y Cicloplas, esta última entidad que emprende Cicloagro, un Sistema Integrado de gestión para residuos agrícolas que cesó su actividad en Abril de 2019. Se estima que MAPLA se pondrá en marcha para 2021 [22,23].

Hoy en día existen dos posibles tipos de procesos de reciclaje del plástico [22,23]:

- **RECICLAJE MECÁNICO.** Por lo general es el más empleado por su simplicidad respecto al reciclaje químico. Se obtiene una nueva materia apta para aplicaciones con productos reciclados, dentro del esquema de economía circular. El reciclaje mecánico está integrado por varias etapas.

1) Etapa de pretratamiento. Como ya se ha mencionado anteriormente, los plásticos derivados del sector agrario contienen polvo, arena y algunos sólidos que deben ser retirados previamente. Para eliminarlos se remueve el material mediante una criba-tambor rotatorio. Posteriormente, se procede a clasificar los plásticos, por ejemplo, LDPE, PP, HDPE y PVC, que son los más utilizados en aplicaciones agrícolas.

Dependiendo de si el material procede de un Sistema Integrado de Gestión de Plásticos Agrícolas (GIRPA) exclusivamente de la plasticultura o de una Planta de Selección, donde el material viene clasificado, esta etapa será necesaria o no.

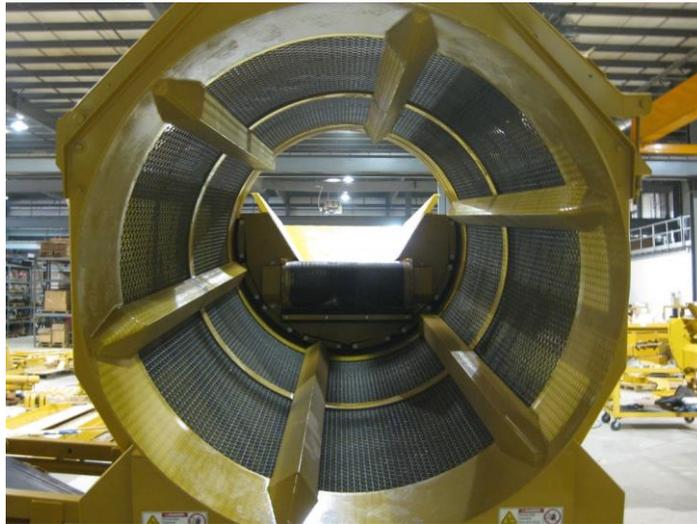


Imagen 27. Criba-tambor

2) **Etapas de molienda en húmedo.** Esta etapa tiene como objetivo facilitar el manejo de los materiales a tratar reduciendo su tamaño al máximo posible dentro de las capacidades del equipo empleado, generalmente llamado molino de martillo. La reducción de tamaño se realiza con el material húmedo, puesto que un calentamiento de las cuchillas podría fundir el material y aglomerarlo con ciertos contaminantes.



Imagen 28. Molino de martillo

3) Etapa de lavado y secado. Los contaminantes presentes en el plástico se retiran mediante el lavado del material normalmente, dependiendo del contaminante. Si este no es muy común, el plástico se retira y se trata independientemente. En el caso de que el material plástico pase por la unidad de lavado, esta dispone de unas aspas que lo hacen avanzar a través del tanque de lavado. Dependiendo del material plástico se extraerá de tanque por la zona superior o inferior, influenciado por la densidad de cada material.

Tras el lavado se introduce el material limpio de contaminantes a una centrifugadora y posteriormente a una secadora, donde se secará hasta eliminar la máxima humedad posible, puesto que ésta interfiere en las propiedades del nuevo material cuando se procede a su extrusión. La humedad crea burbujas en el material conformado, lo cual perjudica las propiedades del producto final.



Imagen 29. Unidad de lavado.

4) Extrusión. El proceso de tratamiento culmina con la extrusión del material, mediante una extrusora, y la obtención del reciclado en forma de granza. Esta granza es empleada para moldear nuevos materiales.

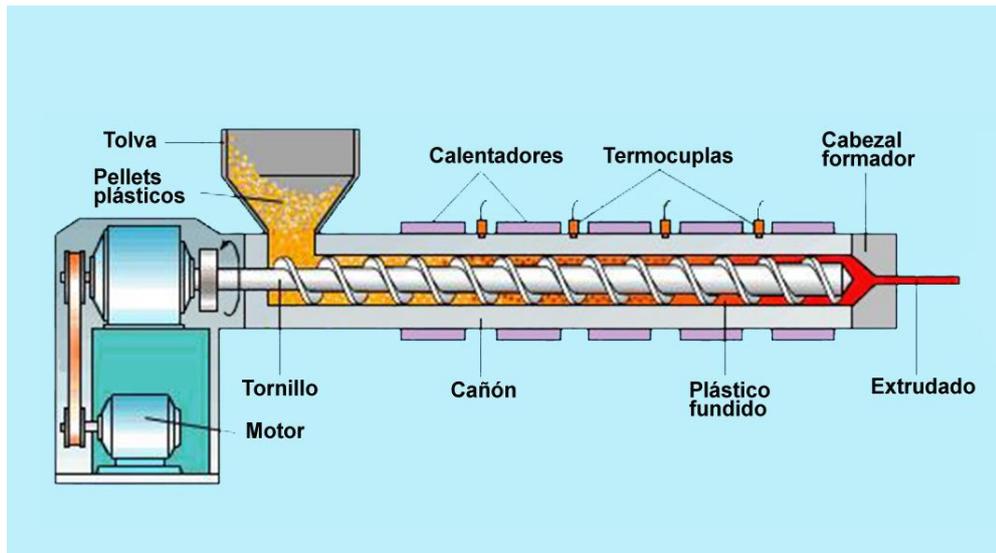


Imagen 30. Extrusora de husillo sencillo

Normalmente el material reciclado suele tener una calidad inferior a los plásticos vírgenes, de esta forma puede ser modificado con resinas y aditivos que permitan mejorar las propiedades del producto final. En el caso de los plásticos agrícolas, la exposición solar y los contaminantes que no se logran eliminar por completo generan un cierto grado de degradación en el material, por los que la calidad esperada del reciclado, en ocasiones, no cumple con los requisitos demandados.

- **RECICLAJE QUÍMICO.** El objetivo de esta vía de reciclaje es recuperar los constituyentes químicos básicos de los plásticos, los monómeros. Esta técnica es útil como recurso en plásticos muy degradados o mezclados con ciertas sustancias que por vía mecánica no podrían eliminarse y contaminarían el producto final. El proceso culminaría con un re-polimerización.

Dentro de los procesos químicos empleados encontramos el craqueo y las reacciones de despolimerización.

- **Craqueo.** En el proceso de craqueo las moléculas quiebran convirtiéndose en moléculas más simples. Hay dos métodos de craqueo, el craqueo mediante empleo de calor y presión y el craqueo catalítico, donde se emplea un catalizador y se trabaja a temperaturas más bajas.

- **Reacciones de despolimerización (*chemolysis*).** Reacciones que ayudan a obtener monómeros a partir de macromoléculas. Dos ejemplos son:
- **Glicólisis.** Despolimerización parcial por acción del etilenglicol.
 - **Hidrólisis.** Despolimerización total por medio del agua en presencia de ácidos o álcalis. En la reacción se obtiene ácido tereftálico como subproducto, lo cual dificulta el proceso, ya que es necesaria una separación de dicho ácido del producto final (monómeros).

En el caso de los plásticos biodegradables, aun una minoría, se tratarían mediante procesos biológicos, obteniendo compost y reutilizándolo como fertilizante o abono. Otra alternativa sería dejarlo biodegradar en el medio puesto que no causaría ningún problema de contaminación en este.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

1. Diseñar un acolchado de polietileno de baja densidad y otro de plástico basado en almidón.

Para llevar a cabo el resto de objetivos de este trabajo fin de máster es necesario plantearse este primer objetivo, identificando los materiales en los que se basará el estudio, su componente base, así como los aditivos empleados, puesto que el estudio examina aquellas actividades que se involucran en su ciclo de vida, desde la obtención de la materia prima hasta la actividad final que marcará el fin de su vida útil. Así mismo, conociendo de forma exhaustiva los materiales que formarán los acolchados habrá menos índice de fallo.

Por otro lado, aunque el plástico biobasado se emplea en diversos objetos de uso cotidiano, como bolsas o cubiertos de plástico, sigue siendo objeto de investigación y, precisamente, en el sector agrario no es muy frecuente su uso. Por ello mismo, la composición de un acolchado biodegradable no está estandarizada tal cual lo está el acolchado tradicional sintetizado a partir de polietileno de baja densidad. De ahí surge el diseño de tal acolchado biobasado, un acolchado que cumpla con las necesidades demandadas de un acolchado convencional y, a su vez, sea capaz de biodegradar en el mismo entorno reduciendo la contaminación por residuos plásticos y proporcionando al suelo nutrientes que, posteriormente, serán de utilidad para la próxima temporada de cultivo.

2. Evaluar el impacto medioambiental de la colocación de acolchados de termoplásticos basados en almidón y polietileno de baja densidad.

Con el fin de evaluar de forma eficaz el impacto ambiental que supone integrar ambos acolchados al entorno, se empleará un software llamado CES EduPack. El software contiene una base de datos normalizada que permite estimar los gases de efecto invernadero emitidos por cada actividad que forme parte del ciclo de vida de un acolchado convencional, sintetizado a partir de polietileno de baja densidad y, un

acolchado biobasado. Estos gases de efecto invernadero serán proporcionados en forma de CO₂ equivalente, realizando así una ECO-auditoría de dichos termoplásticos.

El software presenta una alta versatilidad que permitirá confrontar numerosos ciclos de vida para un mismo termoplástico de forma fácil, rápida y eficaz.

3. Comparación de los casos anteriores teniendo en cuenta las diferentes opciones de fin de ciclo de vida.

Discutiendo y confrontando los datos obtenidos mediante el software CES EduPack de los acolchados, de forma que se examinen y se valoren todas las alternativas, se podrá llegar a la conclusión definitiva, donde se determinará si el uso de un bioplástico es más sostenible con relación a lograr una disminución de los gases de efecto invernadero emitidos durante su vida útil.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales, métodos o herramientas que han sido necesarios para llevar a cabo y facilitar este trabajo fin de master han sido los siguientes:

3.1. MATERIALES

Físicamente no se ha empleado ningún material, puesto que este trabajo fin de master se enfoca en la investigación del análisis de la huella de carbono y el diseño de dos acolchados, un acolchado biodegradable y orto tradicional. Respecto a este último aspecto desarrollado en el trabajo, se ha hablado de ciertos componentes que formarán parte de los acolchados y son necesarios para su diseño. A continuación se especifican cuáles son y sus características.

3.1.1. ALMIDÓN DE MAIZ

El almidón o fécula (CAS 9005-25-8) presenta una estructura formada por dos macropolímeros vegetales formados por glucosa, $C_6H_{12}O_6$, la amilosa $(C_6H_{10}O_5)_n$, en menor proporción, y amilopectina $(C_6H_{10}O_5)_n$, en mayor proporción. La estructura de la amilosa se forma por uniones de moléculas de glucosa de forma lineal y mediante enlaces glucosídicos α -1,4. En el caso de la amilopectina la cadena principal formada por unidades de glucosa se presenta ramificadas con enlaces glucosídicos α -1,6 cada 12 o 30 unidades de glucosa, aproximadamente. Estas dos macromoléculas se disponen en forma helicoidal dentro de las partículas de almidón. Estas partículas presentan forma circular y la disposición de las macromoléculas en forma de anillas, alternándose una y otra.

viscosidad media y alta capacidad de gelatinizar. La presencia de amilosa es de un 27% y 73% para la amilopectina, con 5-25 micras de tamaño de partícula.

3.1.2. POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

El polietileno (CAS 9002-88-4) es un polímero termoplástico. La repetición del monómero $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ forma su estructura principal, que, a su vez, puede formar ramificaciones con el mismo monómero o no. Dependiendo de la existencia y número de estas ramificaciones la densidad del polímero termoplástico varía, de esta variación surgen varios tipos de polietileno. En este caso hablamos del polietileno de baja densidad (LDPE), un polímero ramificado. Estas ramificaciones impiden la fuerte unión entre las cadenas y una estructura, por tanto, poco compacta, lo que disminuye la densidad. Si estas ramificaciones fueran elevadas en número hablaríamos de polietileno de muy baja densidad.

El LDPE tiene una densidad de $0,95 \text{ g/cm}^3$. Es un material flexible, con buenas propiedades químicas y mecánicas, fácilmente procesables, aislantes y económicas.

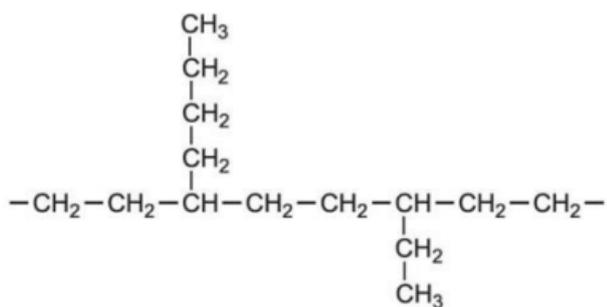


Imagen 34. Estructura LDPE

3.1.3. NEGRO DE CARBÓN

La descomposición térmica incompleta de hidrocarburos genera este material al que llamamos negro de carbón, carbón *black* o negro de humo, entre otros (CAS 1333-86-4). Su composición es simple, formada únicamente por carbón elemental. Los carbonos

se disponen formando una estructura no cristalina, por lo que es llamado de forma informal, carbón amorfo.



Imagen 35. Aspecto del negro de carbón.

Las partículas de este material son de tamaño nanométrico, aproximadamente entre 10 y 500 nanómetros, lo que le aporta un aspecto de polvo negro. Por lo general, a mayor tamaño menos costo y calidad de función. Su incorporación a materiales termoplásticos aporta estabilización de rayos UV y aspecto opaco.

La nomenclatura de este material suele ser una letra acompañada de tres dígitos. La letra, N o S, indica la calidad del material, siendo N un curado alto. El primer dígito hace referencia al tamaño de las partículas en nanómetros y, por último, los dos dígitos finales son asignados por ASTM D24 a medida que nuevos productos son incorporados al mercado. La nomenclatura quedaría como N110 (15 nm), por ejemplo.

3.1.4. GLICERINA

La glicerina o glicerol (CAS 56-81-5) es una sustancia orgánica compuesta por tres átomos de carbono, ocho de hidrógeno y tres de oxígeno, formulada como $C_3H_8O_3$ y $HOCH_2-CHOH-CH_2OH$ de forma semidesarrollada. Sus átomos están unidos mediante enlaces covalentes y simples. Se define como un alcohol por sus tres grupos hidroxilo.

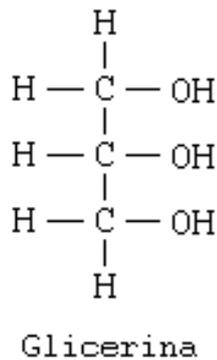


Imagen 36. Molécula de Glicerina

La glicerina se presenta como un líquido viscoso (alto coeficiente de viscosidad), incoloro e inodoro. Otro aspecto importante es su carácter higroscópico, que permite absorber la humedad presente en el medio que lo rodee. Se obtiene de grasas, generalmente vegetales pero también animales, mediante procesos como hidrólisis, saponificación o transesterificación.

3.2. MÉTODOS

Para poder llevar a cabo el análisis de la huella de carbono ha sido necesario el uso de una herramienta o software, la cual facilitara y aportara al estudio los datos necesarios para concluir qué acolchado es el más sostenible. Por otro lado, se mostrarán los diseños de ambos acolchados.

3.2.1. CES EDUPACK

CES EduPack es un software que ofrece distintas herramientas, entre ellas Eco Audit. Eco Audit permite estimar la energía y gases de efecto invernadero que el ciclo de vida de un cierto material genera a lo largo de ella. En teoría, facilita y ayuda a encontrar los conceptos clave para recalcular o diseñar un material más sostenible.

Eco Audit permite estudiar 5 fases o etapas de un producto: obtención de materia prima, proceso de fabricación, transporte, uso y final de vida. De esta forma se

identifica la fase dominante, rediseñando y reduciendo la huella de carbono del material o producto. Todo esto es gracias a la gran base de datos que registra el software, fundamentalmente de materiales y procesos.

A continuación se muestran imágenes que reflejan la herramienta Eco Audit del software.

The screenshot shows two sections of the Eco Audit software interface. The first section, titled '1. Material, manufacture and end of life', contains a table with columns for Qty., Component name, Material, Recycle content, Primary process, Mass (kg), and End of life. The second section, titled '2. Transport', contains a table with columns for Stage name, Transport type, and Distance (km).

Imagen 37. Eco Audit. Fases de obtención de materia, fabricación, final de vida y transporte

The screenshot shows two sections of the Eco Audit software interface. The first section, titled '3. Use', contains input fields for Product life (1 years), Country electricity mix (World), and options for Static mode and Mobile mode. The second section, titled '4. Report', contains a Notes field, an Image field with Browse... and Clear buttons, and a View Report button.

Imagen 38. Eco Audit. Fase de uso e informe.

3.2.2. ESTUDIO DE LA LOCALIZACIÓN DEL ACOLCHADO

Se tomará como referencia la zona del Valle de Guadalentín. El Valle de Guadalentín, situado en la Región de Murcia, constituye una gran depresión prelitoral murciana por la cual discurre el río Guadalentín y el Segura. Este valle transcurre del sureste de la comunidad autónoma de Murcia hasta el sur. El Valle del Guadalentín es una zona de alto interés agrícola por las propiedades de sus suelos. Son suelos denominados fluvisoles, característicos por su contenido en nutrientes y nivel de humedad favorable,

por lo que son suelos fértiles. Exactamente el acolchado se colocará en territorio de la ciudad de Totana, situada en el Bajo Guadalentín.

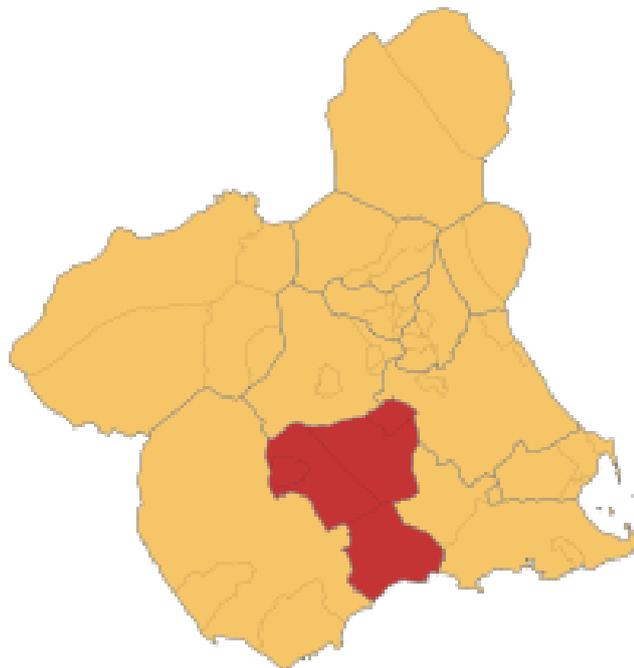


Imagen 39. Bajo Guadalentín. Región en rojo

Por otro lado, se debe preparar el suelo donde se colocará el acolchado. El terreno debe estar libre de objetos puntiagudos o piedras prominentes que puedan rasgar el plástico. Hay que tener en cuenta el uso anterior que se le ha dado a dicho terreno puesto que si el suelo ha pasado por una fertilización orgánica las condiciones generadas en este podrían acelerar el proceso de biodegradación del polímero biobasado gracias a la actividad microbiana asociada al uso de dichos fertilizantes.

3.2.3. CRONOGRAMA DE DISEÑO ACOLCHADO BIOPOLÍMERO

El bioplástico de referencia empleado en el estudio de la huella de carbono es el bioplástico en base a almidón, TPS. El motivo principal por el que se ha seleccionado un material derivado de dicha biomasa es la propiedad de biodegradación que le aporta al producto final, obteniendo así un polímero capaz de biodegradar en los campos de cultivo sin causar impactos en el ecosistema sin tener que emplear mano de obra y

tiempo en retirarlo del terreno. En segundo lugar, hablamos de materia prima económica y fácil de conseguir.

A continuación se presenta el cronograma del diseño del bioplástico, así como el desarrollo de dichas actividades.

Tabla 1. Cronograma de diseño del acolchado biodegradable.

Actividades/Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Definición de propiedades del acolchado												
2. Selección de materiales												
3. Formulación de composición												
4. Síntesis de acolchado												
5. Ensayos de biodegradabilidad												24 meses
6. Caracterización mecánica y óptica del acolchado												

El proyecto se divide en varias actividades, en primer lugar se han definido las propiedades que son necesarias para destinar el uso del bioplástico como acolchado en cultivos agrícolas. Todo esto teniendo en cuenta dónde se ubicará dicho cultivo, puesto que no solo las características o propiedades del acolchado influyen en su biodegradación, sino que también el clima y suelo son factores determinantes de dicho proceso.

Una vez establecidas las propiedades se discute qué biomasa y aditivos formarán parte del nuevo material. En este caso hablamos de un bioplástico donde la mayor parte de su composición lo formará el almidón. Ya se han mencionado anteriormente sus propiedades en apartados anteriores, pero destacar su característica de

biodegradabilidad, bajo coste y fácil adquisición. Por otro lado, es necesario añadir ciertos componentes que ayuden al almidón a plastificar, por ejemplo, la glicerina.

Por último, quedaría comprobar si dichas hipótesis asociadas a la composición del material son ciertas, así como certificar que el proceso de síntesis se ha llevado a cabo de forma correcta. Es decir, debemos comprobar que el material obtenido es biodegradable según estipula la norma UNE-EN 17033, así como su caracterización óptima y mecánica. La duración de los ensayos de biodegradabilidad tiene un periodo máximo de 24 meses.

El diseño está planteado a escala piloto. Con esta experiencia se podrá obtener material suficiente para realizar los ensayos de caracterización, tanto a escala de laboratorio como en campo.

3.2.3.1 DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL ACOLCHADO BIODEGRADABLE.

El objetivo es obtener un bioplástico basado en almidón, el cual, a su vez, es un polímero biodegradable. La biodegradabilidad del polímero depende de las condiciones ambientales circundantes que lo rodeen, así como del tipo de suelo en el que se proceda a biodegradar. Teniendo en cuenta las características de los suelos en el que se le dará uso al polímero se debe comprobar su biodegradabilidad según dictan las normas establecidas para ello. A su vez, el bioplástico debe tener óptimas propiedades mecánicas y ópticas. Se quiere un bioplástico capaz de biodegradar, pero no un bioplástico que biodegrade o se dañe en un tiempo muy limitado. Es decir, la composición formulada deberá dar al bioplástico propiedades similares al plástico convencional que se emplea comúnmente en la agricultura, incorporándole a estas la capacidad de biodegradarse. Las propiedades esperadas en el acolchado son las siguientes:

- **Resistencia a la fotodegradación.** La radiación ultravioleta e infrarroja, procedente de la luz solar, altera la composición del acolchado y sus propiedades, ocasionando cierta rigidez en el polímero y disminuyendo el tiempo de vida útil del acolchado. El objetivo es obtener un acolchado donde su durabilidad coincida con la vida útil estimada. Para conseguir dicho propósito se suele incorporar negro de carbón, sustancia que aporta al acolchado aspecto opaco. Las partículas del negro de carbón absorben la radiación ultravioleta impidiendo que ésta interfiera en los

enlaces poliméricos y los destruya. De esta forma, el material conserva sus propiedades mecánicas y resiste a los cambios climáticos con mayor eficacia. Por otro lado, la gran cantidad de energía que absorbe el acolchado se transmite en forma de calor al cultivo, creando un clima cálido y óptimo para este. Los materiales capaces de conseguir esta propiedad se definen como estabilizantes o rellenos.

- **Resistencia a la tracción.** El acolchado debe ser manipulado constantemente, desde su puesta en el mercado, de manera que pueda ser transportado y acomodado para facilitar su distribución en el campo de cultivo, pasando por el proceso de colocación del acolchado, donde se perforará, hasta el final de su vida útil, donde deberá ser retirado de manera sencilla sin retrasar la actividad agrícola más de lo habitual. Todas estas actividades se desempeñarán con las mismas técnicas y maquinaria que se emplean para un acolchado tradicional, por lo tanto, el material deberá poseer una resistencia a la tracción idónea para superar dichas actividades con éxito. Hay que tener en cuenta que la tensión aplicada con dicho equipo o maquinaria debe reducirse en comparación con la manipulación de acolchados tradicionales, así como la perforación se realizará por el fabricante del acolchado, generalmente con troqueles calientes.
- **Resistencia al impacto y al rasgado.** Se requiere un biopolímero que no se fracture con facilidad ante el impacto de una carga, así como que dicha fractura no se propague. Para conseguir reforzar estas propiedades mecánicas, así como también la de tracción, se incorporan fibras al polietileno (fibras de coco, fibras de vidrio, y de grafeno, entre otras).
- **Transmisión al vapor de agua.** Una de las principales funciones de un acolchado es mantener la tierra donde se desempeñarán las actividades agrícolas rica en nutrientes y agua. Los bioplásticos se caracterizan por ser permeables al vapor de agua.
- **Transmisión de CO₂.** El acolchado plástico puede interferir en este caso al intercambio de CO₂ entre el suelo y el aire. El intercambio de CO₂ aumenta con la composición orgánica del material plástico, puesto que, el componente orgánico se descompone liberando CO₂, incrementando la tasa de crecimiento de los vegetales del cultivo.

- **Confortabilidad.** El material debe presentar baja temperatura de transición vítrea, mejorando y facilitando así el proceso de moldeo. Para conseguir esta propiedad debe elegirse un buen plastificante con el que conseguir propiedades y características de confortabilidad idóneas.



Imagen 40. Distribución de un acolchado agrícola en un medio de cultivo

3.2.3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES

El almidón está formado por dos grandes polisacáridos, amilosa y amilopectina. La amilopectina es poco soluble en agua mientras que la amilosa si lo es. La disposición de ambas en forma gránulo, su gran empaquetamiento y la capacidad de solubilizarían de ambos polisacáridos dificultan la difusión de las moléculas de agua dentro del gránulo. Cuando a esta mezcla de agua y almidón se le adiciona energía en forma de calor las cadenas poliméricas comienzan a vibrar y a separarse unas de otras

facilitando la entrada de moléculas de agua al gránulo. Esto provoca una hinchazón de gránulo hasta que es fracturado y las cadenas poliméricas de la amilosa, con una estructura menos cristalina que la de la amilopectina, salgan del gránulo difundiéndose por las moléculas del disolvente, en este caso agua. Poco a poco, con el incremento de temperatura, las cadenas de amilopectina serán rodeadas de moléculas de agua. Este proceso llamado gelatinización se verá reforzado con la incorporación de un ácido prótico, como es el ácido clorhídrico (HCl).

El HCl o ácido clorhídrico junto al agua inicia un proceso llamado hidrólisis ácida. El ácido clorhídrico tiende a disociarse en contacto con agua, cediendo un protón, el cual reacciona con los enlaces O-glucosídicos y produce la fragmentación de las cadenas de glucosa. De esta forma el ácido clorhídrico ayudará a facilitar la dispersión de las cadenas polisacáridas entre las moléculas de agua. Con esta composición de agua y ácido clorhídrico se comenzará a espesar la mezcla aumentando su viscosidad.

El proceso de gelatinización se verá apoyado con la incorporación de un plastificante, en este caso hablamos de la glicerina o glicerol. El glicerol actuará como emulsionante entre la matriz acuosa y la matriz de polisacárido. El glicerol contiene a un lado grupos hidroxilo y, al otro, átomos de hidrógenos, los grupos hidroxilos son hidrofílicos mientras que los átomos de hidrógenos son lipofílicos, de esta manera se forman una especie de micelas entre las cadenas polisacáridos y las moléculas de agua, dando origen al aspecto gelatinoso que se ha comentado en apartados anteriores y proporcionaran al material flexibilidad, elasticidad y fluidez.

Por otro lado, es interesante incorporar hidróxido de sodio o sosa caustica (NaOH), para obtener una viscosidad óptima. La viscosidad de un polímero se ve afectada por el peso molecular de las moléculas que lo componen y por los grupos iónicos que pueda haber. En ambos casos, ya sea por el aumento de la densidad o por las repulsiones moleculares, el empaquetamiento de las moléculas se ve afectado y con ello su viscosidad. A mayor empaquetamiento o resistencia al movimiento mayor viscosidad. En este caso el HCl fragmenta las cadenas de ambos polisacáridos lo que facilita que se forme un mayor número de micelas y junto al plastificante se forman micelas macizas que le aportan una gran viscosidad al material. El NaOH neutraliza la acción del HCl, obteniendo NaCl (sal neutra) y H₂O.

Para proteger la superficie plástica se añadirá negro de carbón. Al añadir este aditivo se conseguirá un manto opaco y estabilizador de rayos UV, evitando así su cercana degradación. Este material, en forma de polvo, se introducirá como masterbatch al material base cuando se sintetice a escala industrial, que en este caso se incorporará directamente a la mezcla.

3.2.3.3. FORMULACIÓN DE COMPOSICIÓN Y FABRICACIÓN.

Las composiciones para obtener acolchado suficiente para realizar la caracterización del mismo son las siguientes:

- Almidón de maíz: 4 g
- Agua destilada: 40 ml
- HCl (0.1 mol/L): 3 ml
- NaOH (0.1 mol/l): Hasta conseguir un pH=10
- Glicerol: 3 ml
- Negro de cabrón: 0,2 g

Los pasos a seguir se indican a continuación:

1. Para sintetizar este compuesto se deberá calentar el agua destilada a unos 50°C, a la cual se le incorporará el almidón, el ácido clorhídrico y la glicerina con agitación mecánica continua. Se le elevará la temperatura hasta los 80°C posteriormente de incorporar los componentes hasta observar la mezcla homogénea y con un aspecto gelatinoso. Aproximadamente 10 minutos tras haber alcanzado los 75°C.
2. Una vez alcanzada la temperatura y el estado gelatinoso se añadirá el NaOH hasta alcanzar un pH 10 (básico).
3. Tras agregar el NaOH se cesará el suministro de energía y se extenderá la mezcla sobre bandejas de telgopor de tamaño estándar y se dejará enfriar a temperatura ambiente en un lugar seco y aislado o en una estufa a 25-30°C.
4. Tras obtener la mezcla libre de humedad y seca, se incorporará en una extrusora con cabezal circular. El material se enfriará en un tanque de agua a la salida de la extrusora y se introducirá en una granuladora que le dará forma de pellet.

5. El pellet se someterá a extrusión por soplado dándole la forma y espesor deseado.

3.2.3.4. ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD

El estudio de la biodegradabilidad en suelo del acolchado basado en materia vegetal deberá hacerse según especifica la norma UNE-EN 17033. En esta norma se establecen unas condiciones de ensayo y requisitos finales para valorizar un producto agrícola capaz de biodegradar sin crear un impacto negativo sobre el medioambiente. Esta norma establece los siguientes criterios:

- En primer lugar el material base o el material de la película del acolchado estudiado no debe sobrepasar los límites especificados de ciertos metales, regulados por normas, y sustancias altamente preocupantes (menos de 0.1% en peso). Además debe contener un mínimo de sólidos volátiles (60%). Todo esto debe ser correctamente determinado y registrado. En el caso de cumplir con estas características de composición esta norma será válida para estudiar la biodegradabilidad del material.
- Los ensayos de biodegradabilidad deben hacerse según se especifica en la norma ISO 17556, donde, el ensayo será superado cuando el 90% de carbono orgánico se transforma en CO₂, en un periodo de ensayo no mayor a 24 meses. El material en estos ensayos no debe ser sometido previamente a situaciones o actividades que mediante calor o exposición a cierta radiación pueda generar algún tipo de degradación, viéndose alterada la biodegradabilidad del material.
- La ecotoxicidad del material es importante cuando hablamos de biodegradabilidad, puesto que, los componentes surgidos de la biodegradación, pueden tener efectos negativos en el suelo, donde se finalizará su vida útil previa. Para ello la norma recoge un programa de ensayos regulados por distintas normativas, como es el caso del ensayo de toxicidad crónica con lombrices de tierra cuyo ensayo debe realizarse según la norma ISO 15685.
- Por último, la película de acolchado biodegradable debe cumplir una serie de especificaciones: Características dimensionales, propiedades mecánicas y propiedades ópticas. Todas ellas reguladas por diferentes tipos de ensayos y normativas, tal y como se explica en la norma europea UNE-EN 17033.

3.2.3.5. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y ÓPTICA DEL ACOLCHADO

Para asegurar la calidad del acolchado se debe someter a caracterización óptica y mecánica asegurando que cumple con las propiedades exigidas para este producto.

El acolchado será sometido a distintos ensayos que permitan evaluar las propiedades mecánicas y ópticas. La norma UNE-EN 17033 especifica los ensayos a emplear para la caracterización de acolchados agrícolas biodegradables, así como la normativa a consultar para conocer el procedimiento del ensayo.

Los ensayos a los que se someterá el material serán, esfuerzo de tracción, de rotura y resistencia al impacto, para caracterización mecánica y transmisión de luz relativa para la caracterización óptica.

Tabla 2. Propiedades del acolchado biodegradable

ESPECIFICACIONES	VALORES
Módulo de flexión	$2,4 \cdot 10^8 - 1,73 \cdot 10^9$ Pa
Módulo de rotura	$2,2 \cdot 10^7 - 3,2 \cdot 10^7$ Pa
Módulo de Young	$2,4 \cdot 10^8 - 1,5 \cdot 10^9$ Pa
Resistencia a la tracción	$1,6 \cdot 10^7 - 2,2 \cdot 10^7$ Pa
Absorción de agua	5-10%

- **Ensayo de tracción.** Se obtendrán 5 probetas de acuerdo a las Normas EN ISO 527-1 y EN ISO 527-3 y éstas serán sometidas a esfuerzos de tracción a una velocidad dada. Se obtendrá el valor medio aritmético a partir de los valores obtenidos de las distintas probetas.
- **Ensayo de resistencia al impacto.** Este ensayo se llevará a tal y como especifica la Norma EN ISO 7765 (“Películas y láminas de plástico. Determinación de la resistencia al impacto por el método de caída de dardo”).
- **Transmisión de luz relativa.** Este ensayo tiene por objetivo obtener la relación entre la luz incidente en la película (I_0) y la luz relativa transmitida (I_R). La Norma UNE-EN 17033 determina las condiciones en las que debe ser realizado el ensayo, en el cual se obtendrá el valor de la luz transmitida (I) para 5 probetas

distintas. Los valores de las 5 probetas sirvieran para realizar media aritmética y con ésta obtener en valor final de I_R mediante la expresión $I_R = (I/I_0) * 100$.

3.2.4 CRONOGRAMA DE DISEÑO ACOLCHADO POLIETILENO

A continuación, se expone el cronograma con las actividades necesarias en el diseño de un acolchado de polietileno de baja densidad, así como las actividades para llegar a la síntesis de este.

Tabla 3. Cronograma de diseño acolchado polietileno baja densidad.

Actividades/Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Definición de propiedades del acolchado												
2. Selección de materiales												
3. Formulación de composición												
4. Síntesis de acolchado												
6. Caracterización mecánica y óptica del acolchado												

En este caso se sintetizará un acolchado negro en base de polietileno de baja densidad, un material liviano, económico y que permite lograr un acolchado con las propiedades mencionadas en el apartado 4.2.1.

3.2.4.1. SELECCIÓN DE MATERIALES Y FORMULACIÓN.

Los materiales y composiciones empleados serán los siguientes:

- Polietileno de baja densidad: 300 g de pellet

- Masterbatch: 30 g (18 g negro de carbón + 12g LDPE)

El negro de carbón es un material con partículas nanométricas presentado en forma de polvo. Para añadir un aditivo al material plástico en forma de polvo debe hacer como un masterbatch. Como se ha aclarado anteriormente podría ocasionar problemas de higiene. Por otro lado la cantidad mínima y necesaria para poder someter el LDPE a extrusión es de unos 200-300 g de polietileno.

El masterbatch se añadirá al material base al 10% en masa respecto a este. Estará compuesto por negro de carbón y polietileno de baja densidad al 60-40%, respectivamente para obtener un acolchado de espesor medio (25 micras).

3.2.4.2. SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN.

La síntesis del acolchado se llevará a cabo mediante 2 procesos de extrusión:

1. En primer lugar se obtendrá el masterbatch incorporando a la extrusora los 30 g de éste, 18 g negro de carbón y 12 g de pellet de LDPE. A la salida de la extrusora, con cabezal circular, el material estará conectado a una granuladora, donde previamente habrá pasado por una cubeta de aguas a temperatura ambiente. La granuladora cortará el masterbatch en forma de pellet.
2. La granza del LDPE transparente se mezclará junto al masterbatch y posteriormente se introducirán en una extrusora por soplado, donde se le dará forma de film.

Tras obtener el producto final debe determinarse la calidad de este, para ello se consultará la norma UNE-EN 13655, donde se especifican los distintos ensayos a los que debe someterse un acolchado agrícola termoplástico que será retirado del suelo al finalizar su vida útil. Los ensayos serán los siguientes: Ensayos de tracción y resistencia al impacto para caracterización mecánica y, radiación solar en las regiones PAR y NIR, reflectancia solar, transmisión de luz y resistencia al envejecimiento artificial para caracterización óptica. Otro aspecto importante es especificar la clase de durabilidad del acolchado. La duración mínima para un acolchado termoplástico agrícola recuperable después del uso es de 100 o 280 horas, dependiendo de la fuente

lumínica, para los ensayos de envejecimiento artificial, dotando al material de una clasificación por clase según la durabilidad de éste en dicho ensayo. La durabilidad debe ser indicada por el fabricante.

Tabla 4. Propiedades del acolchado LDPE

ESPECIFICACIONES	VALORES
Módulo de flexión	$2,41 \cdot 10^8 - 3,30 \cdot 10^9$ Pa
Módulo de rotura	$1,86 \cdot 10^7 - 3,7 \cdot 10^7$ Pa
Módulo de Young	$1,72 \cdot 10^8 - 2,83 \cdot 10^9$ Pa
Resistencia a la tracción	$1,33 \cdot 10^7 - 2,64 \cdot 10^7$ Pa
Absorción de agua	5-10%

- **Ensayo de durabilidad.** Para realizar este ensayo se debe someter una muestra del acolchado a exposición lumínica. La fuente lumínica puede ser una lámpara de vapor de mercurio, lámpara fluorescente UV o una lámpara de arco de xenón, siempre y cuando se consiga una relación entre la durabilidad del material, en el ensayo, y la durabilidad de este en la vida real. Para un ensayo realizado a exposición de una lámpara de arco de xenón con una durabilidad de 280 h, y con radiación solar de hasta $4,2 \text{ GJ/m}^2/\text{año}$ (depende de la zona climática), la correlación es de 3 meses en la vida real, por ejemplo.

El ensayo consiste en comparar 5 probetas de muestras, expuestas a una fuente lumínica, con 5 que no lo han estado. Tras la exposición lumínica las probetas se someterán a ensayos de tracción (EN ISO 527-1 y EN ISO 527-3) y se comparará con los valores de las probetas no expuestas. El ensayo será satisfactorio cuando los valores de las muestras expuestas superen o igualen al 50% los valores de las no expuestas. El tipo de fuente lumínica determinará la norma que indica cómo debe realizarse el proceso de exposición.

- **Ensayo de tracción y resistencia al impacto.** Estos ensayos se realizarán de igual modo que se han expuesto para el acolchado biodegradable.
- **Transmisión lumínica total.** Para obtener la transmisión lumínica total debe realizarse el ensayo tal y como se especifica en la Norma ASTM D 1003-13.

- **Radiación solar en las regiones PAR y NIR.** Mediante un espectrofotómetro UV-VIS-NIR se medirá y registrará de forma continua la transmitancia entre las longitudes de onda de la radiación UV-A (300-400), visible (400-780) e infrarroja cercana (780-1200nm). Se realizará el ensayo a 5 probetas de las cuales se obtendrán los valores para realizar la media aritmética.
- **Reflectancia solar.** Para obtener esta caracterización se trabaja con un espectrofotómetro UV-VIS-NIR según especifica la Norma ISO 9845-1.

4. RESULTADOS

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos del análisis de la huella de carbono, efectuado con el software CES EduPack, todo ello teniendo en cuenta los correspondientes aspectos que influyen en este y las distintas alternativas que se han ido presentando. Además, se expone un pequeño estudio económico de la inversión anual asociada a la materia prima requerida.

4.1. ESTUDIO ECONÓMICO DEL COSTE DE LA MATERIA PRIMA

Existen diferencias económicas en la venta del material base a procesar. La industria, el tipo de material y su composición son algunos de los aspectos que influyen en el presupuesto de suministro de estos materiales. Los precios oscilan entre 1.13 - 1.25 €/kg de granza para el polietileno de baja densidad y, 3.76 - 4.48 €/kg de granza para el material biodegradable.

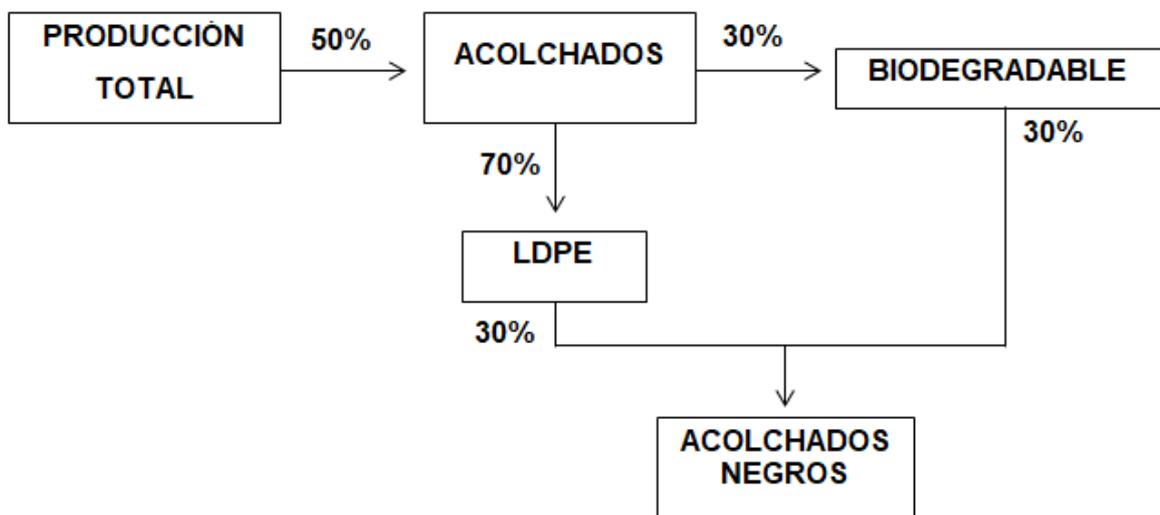


Imagen 41. Estimación de la producción anual de una industria dedicada a la síntesis de termoplásticos agrícolas.

Una industria dedicada a la síntesis de materiales plásticos agrícolas genera alrededor de 18 toneladas de plástico al año. Si para obtener 18 toneladas se requiere la misma cantidad de granza, aproximadamente, se estima lo siguiente teniendo en cuenta que la producción de acolchado LDPE será de un 70% y la del acolchado biodegradable de un 30%:

Tabla 5. Precio medio por año de material base.

Acolchado	Precio medio por tonelada (€)	Masa anual termoplástica (ton)	Precio medio para 18.000 ton (€)
Biodegradable	4.120	2.700	$11.124 \cdot 10^3$
LDPE	1.190	6.300	$7.497 \cdot 10^3$

El coste para cada termoplástico se ha obtenido del siguiente cálculo:

$$\text{€}_{\text{Termoplástico}} = \text{€/Ton}_{\text{Termoplástico}} \cdot \text{Ton/año}_{\text{Termoplástico}}$$

$$\text{Ton/año}_{\text{Termoplástico}} = \text{Ton/año}_{\text{Producción total}} \cdot \%_{\text{Termoplástico}} \cdot 50\%$$

Se estima un gasto anual de 20.229.225 € para el suministro de material base durante un año. Así mismo, además de grana de material polimérico, el negro de carbón es otra materia prima que se debe suministrar. Su precio oscila los 8,3-12,6 €/kg, con un valor medio de 10,45 €/Kg.

Según la composición estimada para el diseño de ambos acolchados la proporción de negro de carbón es de, 4-6% para el acolchado biodegradable y 4-8% para el acolchado tradicional. De esta forma, se encarece el coste de materia prima entre un 4-6% y 4-8% para el acolchado biodegradable y el LDPE, respectivamente.

Por otro lado, no todos los acolchados sintetizados son negros, se podría estimar que el 60% de los acolchados serán negros y el 40% naturales o transparentes. Además, este tipo de industrias no sintetiza solamente acolchados, sino también films para invernaderos (50% de producción entre films destinados a invernaderos y films de acolchados). La producción se establece aproximadamente en 20% de acolchados naturales y 30% negros. El 30% de acolchados negros incrementa el coste de la materia prima, tal y como se especifica en la tabla 6.

Tabla 6. Incremento de los costes finales para el suministro de materia prima de acolchados biodegradables.

Acolchado	Porcentaje medio de negro de carbón (%)	Precio de negro de carbón (€/kg)	Masa necesarios (kg/año)	Coste (€)
Biodegradable	5%	10,45	40,5	423.225
LDPE	6%	10,45	113,4	1.185·10 ³

El coste del negro de carbón se ha obtenido del siguiente cálculo:

$$\text{€}_{\text{Negro de carbón}} = \text{€/kg}_{\text{ Negro de carbón}} \cdot \text{kg/año}_{\text{ Negro de carbón}}$$

$$\text{kg/año}_{\text{ Negro de carbón}} = \text{kg/años}_{\text{ Termoplástico}} \cdot \%_{\text{ Negro de carbón}} \cdot \%_{\text{ Acolchados negros}}$$

En resumen, el coste total de materia prima a invertir para un año de producción sería de unos 40.458.510 €/año.

4.2. ECO-AUDITORÍA

Se va a comparar un acolchado tradicional de polietileno de baja densidad con un acolchado basado en un termoplástico de almidón. Para ello se han determinado ciertas hipótesis para organizar el estudio con el mayor detalle posible. Las hipótesis razonadas con anterioridad al estudio se citan a continuación.

- a) **TRANSPORTE DE LA MATERIA PRIMA.** Novamont, industria italiana, promueve la economía circular mediante el diseño y producción de plásticos biobasados y biodegradables. Para hacer un uso sostenible del plástico, patentó Master-bi[®], un bioplástico compostable basado en almidón que tiene como finalidad obtener numerosos objetos de embalaje, así como plásticos de uso agrícola. La planta de producción de Master-bi[®] se encuentra en Patrica, en la provincia de Frosinone, Italia. De igual forma, la industria internacional Basf, industria dedicada a producir materia prima derivada del petróleo, y que

posteriormente se emplea tanto en construcción, automoción, tecnología médica, como en la obtención de material agrícola, registró Ecovio[®] M2351. Ecovio[®] M2351 es un polímero compostable y, por tanto, biodegradable. Además, el origen de este material es vegetal, por lo que hablamos de un plástico biobasado. Este material es sintetizado en la industria química situada en la sede central de Basf, en Ludwigshafen, Alemania.

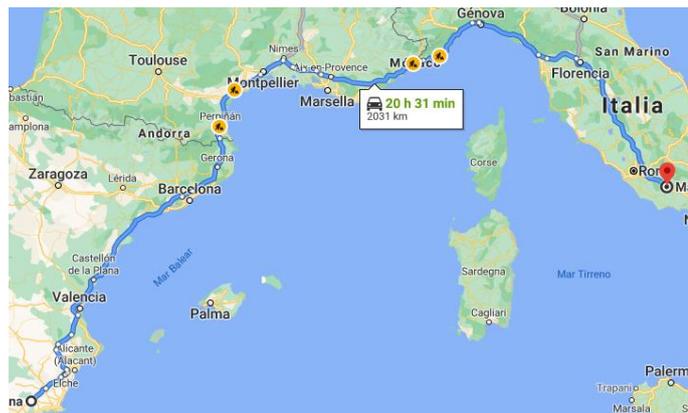


Imagen 42. Ruta Patrica(Italia)-Totana(España).

El polietileno es un material experimentado y común, lo cual facilita su obtención dentro de la península. Por ejemplo, Repsol, multinacional energética, fabrica (mediante la transformación del crudo) y comercializa un gran número de productos, entre ellos el polietileno de baja densidad. Algunas de sus industrias químicas se sitúan en Puertollano, Ciudad Real y Tarragona.

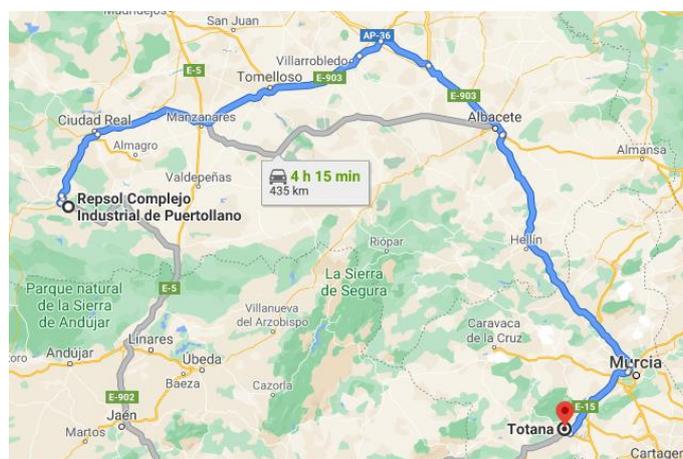


Imagen 43. Ruta Puertollano-Totana

Recordamos que, una de las actividades a estudiar dentro de la vida del producto es el transporte de la materia prima, el cual influye enormemente en el análisis de huella de carbono si el material tiene que recorrer una gran distancia hasta su destino final. Por este motivo, la mayor y cercana disponibilidad del polietileno de baja densidad frente al material biodegradable, puede suponer un inconveniente en relación con el CO₂ equivalente total de este último. Así mismo, también influye el tipo de vehículo que transporte esa materia.

La primera impresión es que el transporte del material biodegradable podría favorecer el aumento del CO₂ equivalente, anulando así, la ventaja en la obtención de materia prima y proceso de fabricación que presenta el acolchado biodegradable frente al tradicional. Por otro lado, y como se ha mencionado, hay que tener en cuenta otras actividades que también interfieren en emisión de GEI.

b) COMPOSICIÓN DEL PRODUCTO. Otro aspecto importante a tener en cuenta es la composición de ambos acolchados finales. Los acolchados se presentan naturales o con un cierto porcentaje de negro de carbón, que ofrece al acolchado un aspecto opaco y, por tanto, una mayor resistencia a la degradación lumínica por radiación UV.

El negro de carbón se obtiene mediante diferentes procesos de fabricación, así como la obtención de su materia prima y el transporte de esta al lugar de producción. La proporción de este material en el producto final podría interferir, aumentando la cantidad de GEI emitidos frente a los acolchados tradicionales, puesto que se trata de carbono puro, componente que reacciona fácilmente con oxígeno a altas temperaturas.

c) DIFERENCIA DE DENSIDAD Y ESPESOR ENTRE AMBOS ACOLCHADOS.

Finalmente, independientemente de su composición, la masa del producto influye en todas las etapas por las que la materia prima debe pasar hasta convertirse en el material termoplástico esperado.

La masa se obtendrá a partir de las dimensiones del acolchado y sus densidades y puesto que, calibre y densidad entre LDPE y bio-polímero biodegradable varían, las masas de ambos acolchados no serían idénticas y

podrían interferir en la hipótesis inicial, donde se asume una menor emisión en las etapas de obtención y manipulación de materias primas frente a un aumento en el transporte de esta en el acolchado biodegradable. Si la masa es significativamente mayor o similar al acolchado tradicional, las diferencias de emisiones de CO₂ equivalente podrían llegar a ser insignificantes.

Como conclusión a las generalidades citadas anteriormente se ha decidido realizar el estudio de huella de carbono en varias situaciones, obteniendo así una mayor versatilidad de resultados y profundidad del estudio. Los casos a analizar, mediante el software CES EduPack, serán los siguientes:

- 1. Caso A.** En primer lugar, se analizará el efecto de cada actividad en la vida útil de ambos acolchados. Esto quiere decir que, para el acolchado tradicional natural se tomará como referencia un material base de polietileno de baja densidad obtenido en la península. En cuanto al fin de vida, se estudiarán todas las opciones posibles que hoy en día se desempeñan en España (vertedero, reciclaje y recuperación energética). En cambio, para el acolchado tradicional natural se asumirá un traslado de la materia prima (Master-bi[®]) desde Italia y un proceso de compostaje como etapa final de su vida útil. Tendremos en cuenta otras variables, que se comentarán en el siguiente punto, como es el peso del material, el tipo de transporte, etc.
- 2. Caso B.** El espesor es otro aspecto importante a comparar, puesto que si comparamos entre dos cultivos en los que se emplean las mismas dimensiones de acolchado, tanto de base biológica como de polietileno de baja densidad, el acolchado tradicional excede en masa al biodegradable debido a su espesor. Un aumento del material significa una mayor cantidad, síntesis y, por tanto, generación de CO₂. En definitiva, se estudiará la influencia de la masa en la huella de carbono.
- 3. Caso C.** En segundo lugar, se estudiará el efecto que supondría añadir el material base de negro de carbón en ambos acolchados, así como la influencia de su proporción en estos.

Tras el análisis de los resultados obtenidos se confrontarán los efectos causados por cada una de las variables que se han presentado anteriormente y se concluirá cuál es el tipo de acolchado más sostenible, que es uno de los objetivos planteados en este trabajo fin de máster. Así mismo, se discutirá si la huella de carbono es una herramienta de gestión ambiental suficiente para determinar la sostenibilidad y/o beneficios que supondría un acolchado biodegradable de origen vegetal frente a un acolchado tradicional de polietileno de baja densidad.

4.2.1. CASO A

Los resultados proporcionados por el software CES EduPack se obtienen a partir de una serie de datos y/o variables certificadas que intervienen en las distintas etapas del ciclo de vida del material en concreto. En este caso, en la primera etapa consideramos los datos de fabricación del material y los procesos que intervienen en su fin de vida útil. La segunda etapa analiza el transporte tanto del producto final como de la materia prima necesaria para obtener este. La actividad intermedia entre las dos citadas anteriormente es su uso y puesto que el producto se deja situado en un campo de cultivo sin ninguna manipulación no se considera de interés. El material base de nuestro acolchado biodegradable será el bio-polímero Master-bi®, el cual es transportado desde Patrica, en la provincia de Frosinone, Italia. Los kilómetros a recorrer entre la industria proveedora Mater-Biopolymer Srl y la industria de fabricación situada en Totana (Murcia) son aproximadamente 2000 Km. Estos kilómetros son recorridos por un camión de 14 a 32 toneladas, al igual que en el caso del polietileno de baja densidad para la fabricación del acolchado tradicional. El polietileno de baja densidad proviene de Repsol, del complejo industrial de Puertollano, recorriendo 400 Km hasta la industria de fabricación. De este modo se determinará el efecto de los kilómetros recorridos, así como la cantidad de materia transportada.

Otro parámetro importante a considerar es la masa del material. Los acolchados biodegradables, con una densidad de 1.3 Kg/m^3 , se obtienen, de forma estandarizada para los cultivos más frecuentes de la región, con espesores de entre 12 y 15 micras, mientras que los acolchados tradicionales, en este caso de polietileno con una densidad de 0.95 Kg/m^3 , se obtienen con un espesor de 20-30 micras.

Para obtener el peso del material tomaremos como referencia una hectárea de cultivo, puesto que el acolchado, proporcionado al cliente en forma de bobina, varía su dimensión en función de los requisitos del demandante y/o cultivo, así como su espesor. De esta forma, conociendo que una hectárea son 10000 m² de terreno y que los acolchados no cubren toda la superficie, sino aproximadamente entre un 40-60%, dependiendo del cultivo, se estima que entre 4000 y 6000 m² del terreno contienen plástico. El análisis de la huella de carbono, en este apartado, se estimará con valores intermedios, 5000 m² de polímero, 13.5 micras de espesor para el acolchado biodegradable y 25 micras para el acolchado tradicional. Con estos valores y conociendo que la masa es igual a densidad por volumen se trabajará con 87.75 g y 118.75 g de polímero biodegradable y polietileno, respectivamente.

Por último, la etapa de fin de vida útil del producto respecto al termoplástico tradicional tiene varias opciones. En Europa se recicla alrededor de un 30-40% del plástico de origen fósil producido, el 15-20% se empela en recuperación de energía y el resto se dirige a vertederos (40-45%). Puesto que la etapa final influye enormemente en la huella de carbono, se tendrán en cuenta las tres opciones, mientras que, para el acolchado biodegradable se contemplará su reciclaje como material compostable, teniéndose en cuenta la emisión de CO₂ neutra, debido al ciclo de carbono neutro.

El ciclo del carbono neutro interpreta la evolución del carbono en forma de CO₂ en las distintas etapas que experimenta la biomasa. Es decir, la materia vegetal consume CO₂ en su fotosíntesis y lo libera en su etapa final, en este caso compostaje, llegando a una emisión neutra.

Por lo tanto, los datos para el estudio son los siguientes:

Tabla 7. Datos para el estudio del caso A

Acolchado	Calibre(μ)	Masa (kg)	Transporte (km)
Biodegradable	13,5	0,088	2000
LDPE	25,0	0,119	400

Los resultados obtenidos mediante el software CES EduPack son los siguientes:

Tabla 8. Kg de CO₂ equivalente emitidos en cada una de las etapas del ciclo de vida de ambos acolchados para el caso A.

Acolchado	ETAPA 1 (kg GEI)	ETAPA 2 (kg GEI)	ETAPA 3 (kg GEI)
Biodegradable	0,276	0,005	0
LDPE	0,321	0,001	-0,046/0,001/0,301

En la gráfica se resumen los valores obtenidos para las distintas etapas del ciclo de vida de ambos acolchados, en primer lugar la primera etapa corresponde a la obtención de materia prima y proceso de fabricación. La etapa 2 refleja las emisiones para el suministro de estos materiales y, por último, en la etapa 3 se reflejan las distintas alternativas o actividades finales que forman parte de acolchado tradicional y el proceso de compostaje al que se someterá el acolchado biodegradable. Para el acolchado tradicional se tienen tres distintas alternativas, someter el acolchado a un proceso de reciclaje, retirarlo a un vertedero o emplearlo en la recuperación de energía mediante un proceso de combustión. Los valores se encuentran ordenados de esta forma en la tabla.

Por otro lado, se ha observado una variación significativa en las emisiones con respecto a la capacidad de materia prima que el vehículo puede transportar por viaje. A mayor cantidad de materia prima transportada menos emisiones de GEI, tal y como se muestra en la tabla 5.

Tabla 9. Comparación de emisiones para las distintas capacidades del vehículo que transporta la materia prima.

Acolchado	Capacidad del transporte (ton.)	Distancia recorrida (Km)	Emisiones (Kg CO₂ equi.)
Biodegradable	32	2.000	0,005
Biodegradable	14	2.000	0,010
LDPE	32	400	0,001
LDPE	14	400	0,002

4.2.2. CASO B

El estudio de la huella de carbono está centrado en un solo producto, en este caso los acolchados empleados en mejorar las condiciones de cultivo. Puesto que el estudio se basa en la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que se han emitido en cada una de las actividades que engloban la vida útil del producto por masa de este, la cantidad de material influye en los resultados. El objetivo en este apartado es averiguar en qué proporción influye el espesor de los acolchados, o lo que es lo mismo, la masa de este, teniendo en cuenta que para cada cultivo los espesores varían. Un ejemplo es el cultivo del melón, donde se trabaja con un espesor de 25-30 micras con acolchados tradicionales y, según un estudio realizado por la empresa Novamont, 15 micras para el acolchado tradicional, obteniendo resultados efectivos. En cambio, para el cultivo de fresas se trabaja con espesores mayores.

Razonablemente, se podría decir que los valores de GEI obtenidos serán proporcionales a las distintas masas, es decir, a mayor masa, mayor emisión. Pero además de comprobar esta hipótesis, otra finalidad será comprobar si la diferencia de emisiones de CO₂ equivalente entre el acolchado de LDPE, con un espesor de 20 micras (mínimo espesor), es significativa con respecto al acolchado biodegradable de 15 micras (máximo espesor), y viceversa.

Los datos con los que se han trabajado son los siguientes:

Tabla 10 . Masas empleadas en el caso B.

Acolchado	Calibre (μ)	Masa por ha de cultivo (Kg)
Biodegradable	12,0	0,078
Biodegradable	15,0	0,097
LDPE	20,0	0,095

LDPE	30,0	0,142
-------------	------	-------

Los datos mostrados en la tabla reflejan las masas con las que se trabajan habitualmente para calibres máximos y mínimos. Para el transporte de la materia prima los valores siguen siendo 2000 km para el biodegradable y 400 km para el polietileno de baja densidad. La tabla 7 muestran las emisiones obtenidas para cada una de las etapas.

Tabla 11. Kg de CO2 equivalente emitidos en cada una de las etapas del ciclo de vida de ambos acolchados para el caso B.

Acolchado	Calibre (μ)	ETAPA 1 (kg GEI)	ETAPA 2 (kg GEI)	ETAPA 3 (kg GEI)
Biodegradable	12,0	0,244	0,0051	0
Biodegradable	15,0	0,307	0,0064	0
LDPE	20,0	0,258	0,0012	-0,046/0,001/0,301
LDPE	30,0	0,386	0,0019	-0,068/0,002/0,452

Se expone para cada uno de los calibres y acolchados las emisiones de GEI. En la etapa 3 no hay ninguna emisión para el acolchado biodegradable, puesto que el carbono que interviene en el proceso de compostaje (actividad final del acolchado vegetal) pertenece al ciclo de carbono nulo, así mismo, hay tres valores para el acolchado tradicional. El primer valor corresponde a la etapa final de reciclaje, el segundo a ser retirado a un vertedero, y la última, a la recuperación de energía mediante combustión.

4.2.3. CASO C

Existen numerosos acolchados agrícolas dependiendo de la industria que lo sintetice y del tipo de materia prima empleado. Existen acolchados, negros, transparentes, mixtos, verdes, rojos, etc. Del mismo modo, existen numerosos materiales base, como el polietileno de baja densidad (LDPE), el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), el

copolímero de acetato de vinilo (EVA), en menor proporción el policloruro de vinilo (PVC) y, también de restos vegetales, como la paja de cebada y maíz, por ejemplo.

Los empleados en la región con mayor frecuencia son los acolchados negros y transparentes, pero sobre todo negros. El estudio de este trabajo fin de grado compara acolchados de polietileno con biodegradables, de este modo, ambos pueden presentarse sin coloración o negros, por lo tanto, su composición varía y con ello la emisión de GEI. Hasta ahora se ha realizado el estudio con acolchados transparentes. En este apartado se trabajará con acolchados negros, que contienen negro de humo o de carbón.



Imagen 44. Pellet de termoplástico con negro de carbón.

El negro de carbón es un material compuesto solamente por carbón de tamaño nanométrico, obtenido de la combustión incompleta de hidrocarburos gaseosos, generalmente en industrias petroquímicas. La incorporación de este material al acolchado se hace en proporción de 4-8%, siendo este valor mayor con la bajada del calibre y menor para el biodegradable.

El negro de carbón no se mezcla como tal, en forma de polvo, directamente con el material termoplástico. Esto podría producir problemas de higiene en los equipos empleados para sintetizar la película del acolchado así como ocasionar daños en ellos. El aditivo se introduce en forma de masterbatch. Por otro lado, las partículas en forma de polvo tienden a aglomerarse, impidiéndose una extensión uniforme por todo el acolchado.

El masterbatch es un concentrado de negro de carbón con un polímero, normalmente del mismo tipo que el material base, en este caso hablamos de LDPE y un polímero biodegradable, sirviendo éste como soporte plástico, compatible entonces con el material base. De esta forma se logran pigmentaciones con una gran uniformidad, no se reagrupa formando aglomeraciones y la ausencia de polvo evita daños posteriores en los equipos.

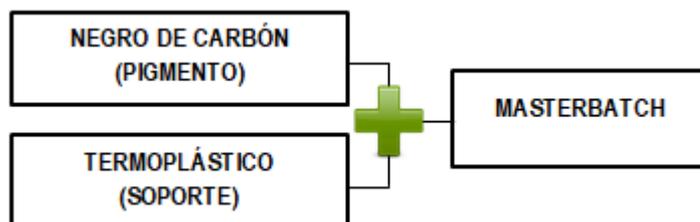


Imagen 45. Esquema composición masterbatch.

Por lo general, la composición del masterbatch es del 1/1 carbón/polímero o 1/2 carbón/polímero, a mayor espesor de acolchado se emplea una menor cantidad de negro de carbón para formar el masterbatch, pero estos valores pueden variar según la finalidad del masterbatch. Además, para estos acolchados se emplea un 10% en peso respecto al material base (10% masterbatch-90% material base). Para acolchados biodegradables el porcentaje a añadir de negro de carbón oscila entre 4-6%, mientras que para el acolchado de polietileno de baja densidad es de un 4-8%, dependiendo del grosor del manto.

Teniendo en cuenta lo anterior los valores empleados en este estudio serán los siguientes:

- Acolchado 1-Masterbatch en acolchado biodegradable, calibre medio 13.5 micras: Se añadirá un 5% de negro carbón (50% del masterbatch).
- Acolchado 2-Masterbatch en acolchado LDPE, calibre medio 25.5 micras: Se añadirá un 6 %, (60% del masterbatch)

En la tabla siguiente se resumen las cantidades en kilogramos que se añadirán de masterbatch para una hectárea de cultivo (5-6% negro de carbón y 5-4% material

base). Además, se ha trabajado con acolchado de espesor medio para observar el efecto del negro de carbón con mayor claridad.

Tabla 12. Datos masa acolchados más masterbatch

Acolchado	Masa termoplástico base (kg)	Masa a añadir negro carbón (kg)	Masa a añadir polímero (kg)
1	0,088	0,004	0,004
2	0,119	0,007	0,005

En la siguiente tabla se resumen los valores finales, en kilogramos de CO2 equivalente, que supondría añadir el negro de carbón a ambos acolchados para cada una de las etapas que forman sus ciclos de vida. Los valores de la etapa 1 muestran la cantidad de GEI emitidos por el material termoplástico empleado y el negro de carbón en el proceso de obtención de la materia prima y fabricación, así mismo, para el transporte se han tenido en cuenta los kilómetros recorridos para suministrar el termoplástica basado en almidón (2000 km), el polietileno de baja densidad (400 km) y el negro de carbón, suministrado desde Galicia y con el cual se recorren 800 km.

Los polímeros pigmentados con negro carbón suponen un problema para el reciclaje de estos, son complicados de separar y generan un producto final con baja calidad, por lo tanto, la etapa de reciclaje del negro de carbón no se contempla. En la etapa 3, final de vida, se asumen como actividades posibles la retirada a vertederos o recuperación de energía mediante combustión.

Tabla 13. Kg de CO2 equivalente emitidos en cada una de las etapas del ciclo de vida de ambos acolchados para el caso C.

Acolchado	ETAPA 1 (kg de CO₂ equi. Totales)	ETAPA 2 (kg de CO₂ equi. Totales)	Vertedero (kg de CO₂ equi. totales)	Combustión (kg de CO₂ equi. totales)
1	0,292	0,005	-	-
2	0,347	0,001	0,0005	0,1011

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para poder llevar a cabo la discusión de los resultados obtenidos en el apartado anterior se han establecido dos escenarios distintos. Un escenario real y un escenario hipotético. El objetivo principal de estudiar dos escenarios distintos es examinar con mayor exactitud todas las alternativas que presenta el acolchado tradicional en su actividad final del ciclo de vida.

En el escenario real se contemplan las distintas alternativas de la actividad final del acolchado tradicional empleadas hoy en día, ya que el biodegradable pasará a ser materia prima de compost, donde el carbón presente en dicha materia pertenece al ciclo del carbón neutro. Por otro lado, el estudio de cada una de las alternativas irá acompañado de las proporciones en las que estas se llevan a cabo.

Finalmente, se ha iniciado una nueva práctica, poco común, pero eficiente como etapa final de los plásticos agrícolas. Esta práctica se llama *downcycle* y será protagonista del escenario hipotético.

4.3.1. ESCENARIO REAL.

Para ambos escenarios los resultados de las etapas: obtención de materia prima, manufactura y transporte, son iguales. Por lo tanto, se discutirá en este apartado únicamente. La tabla 10 muestra de forma resumida los aspectos más importantes a considerar a partir de los resultados obtenidos mediante el software CES EduPack.

Tabla 14. Resultados relevantes obtenidos en cada uno de los casos estudiados para la etapa de obtención de materia, proceso de fabricación y transporte.

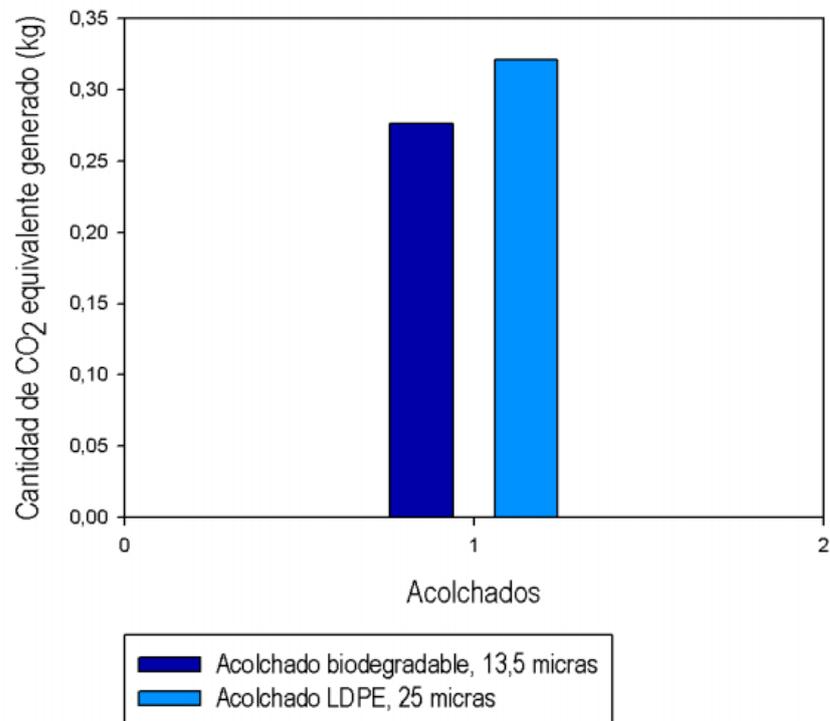
CASOS/ETAPAS	Obtención de materia prima y proceso de fabricación	Transporte
CASO A	Diferencia poco significativa. Acolchado tradicional mayor emisión de GEI.	Mayores emisiones de GEI para transportar el material biodegradable. Emisiones disminuyen con la cantidad transportada.
CASO B	Acolchado biodegradable con	Diferencias poco significativas.

espesor 15μ mayor emisión que el tradicional con 20μ		
CASO C	El negro carbón aumenta entre un 5-10% el valor de la emisión	Valores poco significativos.

La etapa final no se resume en la tabla 14 ya que presenta dos escenarios distintos y se discutirán con más detenimiento en sus apartados correspondientes.

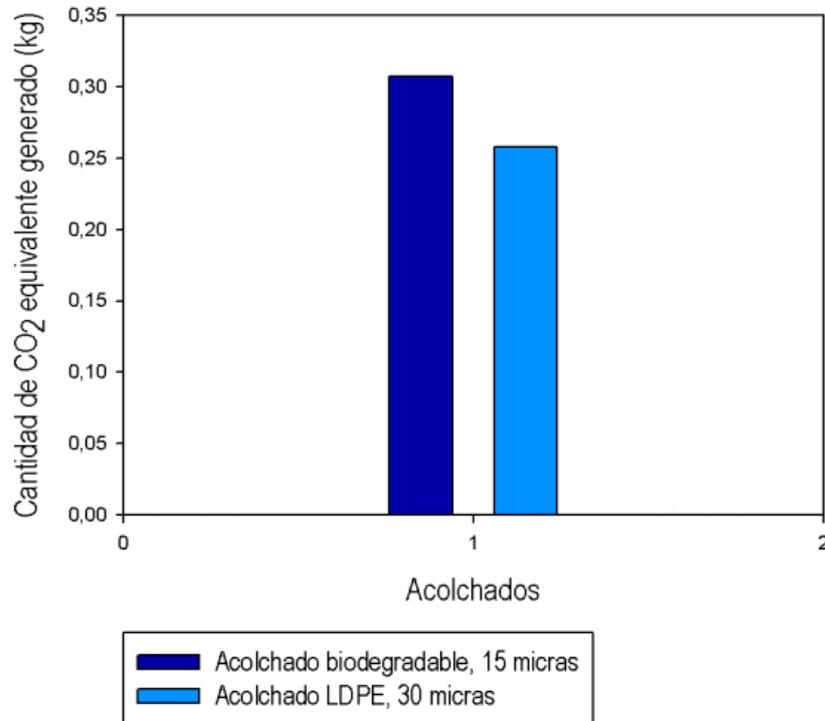
4.3.1.1. OBTENCIÓN DE MATERIA PRIMA Y PROCESO DE FABRICACIÓN.

La etapa obtención de materia prima y proceso de fabricación o manufactura, la diferencia entre el acolchado tradicional y el biodegradable son mínimas, tanto que se ven afectadas con la simple modificación del espesor del manto. A continuación, para poder apreciarlo de forma visual se muestran unas gráficas donde se aprecia la escasa diferencia de emisiones entre ambos acolchados.



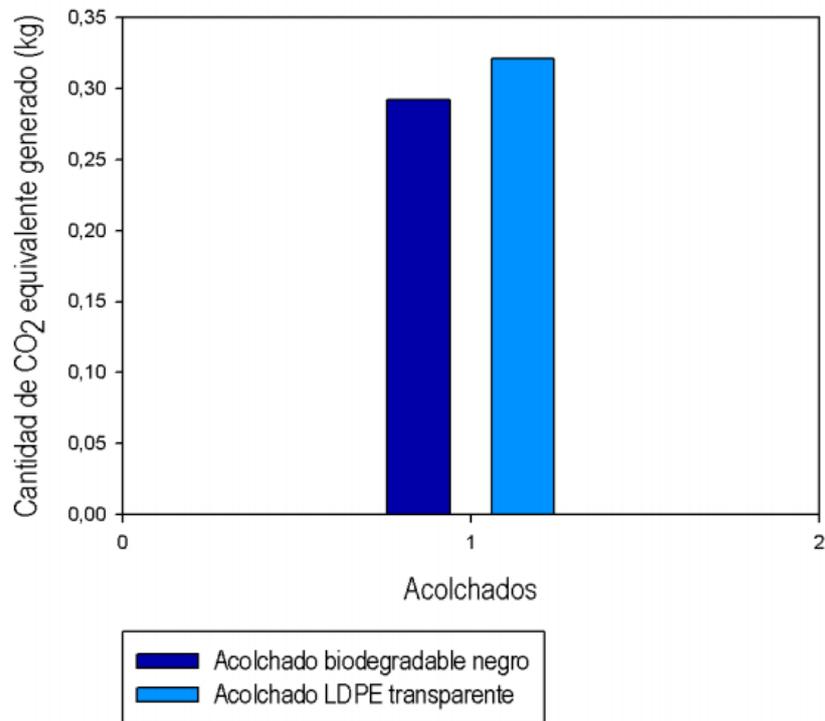
Gráfica 1. Kg de CO₂ equivalente de ambos acolchados con espesores medios.

Por el contrario en la gráfica que se muestra a continuación se representa la posición superior del acolchado biodegradable cuando su espesor es máximo y, por el contrario, mínimo para el acolchado de LDPE. De nuevo se puede apreciar la leve diferencia entre las emisiones de GEI que presentan ambos acolchados.



Gráfica 2. Kg de CO₂ equivalente de ambos acolchados para espesor máximo del biodegradable y espesor mínimo para el tradicional en la etapa 1 del ciclo de vida.

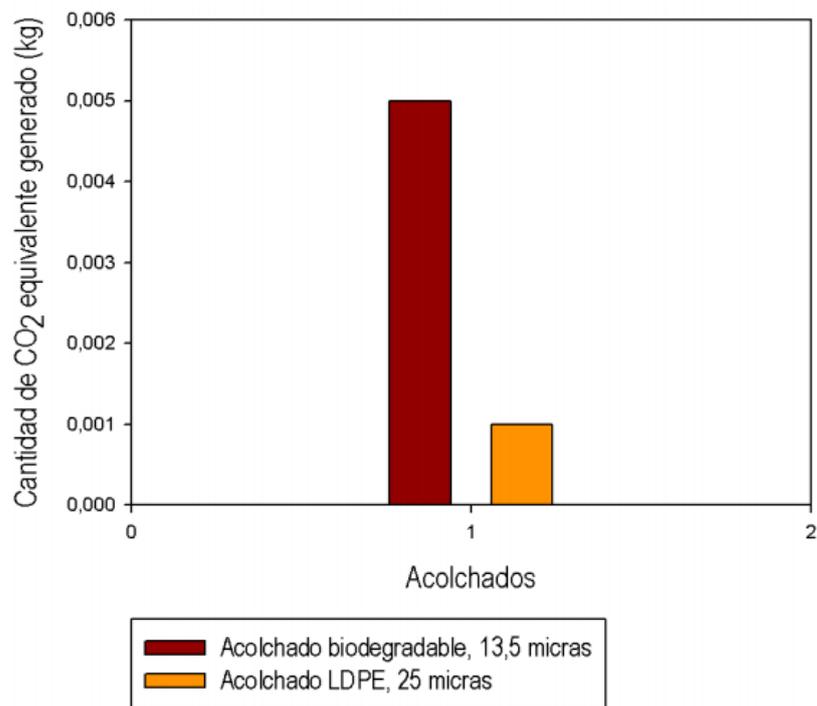
Cuando se añade negro de carbón se eleva entre un 6% aproximadamente la emisión para el biodegradable y un 8% para el acolchado tradicional para calibres medios, de esta forma, si comparamos un acolchado biodegradable negro frente a un acolchado tradicional transparente, el tradicional sigue siendo el más elevado, lo que demuestra que aun siendo baja la diferencia de emisiones entre ambos, influyen varios factores.



Gráfica 3. CO₂ equivalente generado para un acolchado biodegradable negro y un acolchado LDPE transparente para la etapa 1 del ciclo de vida.

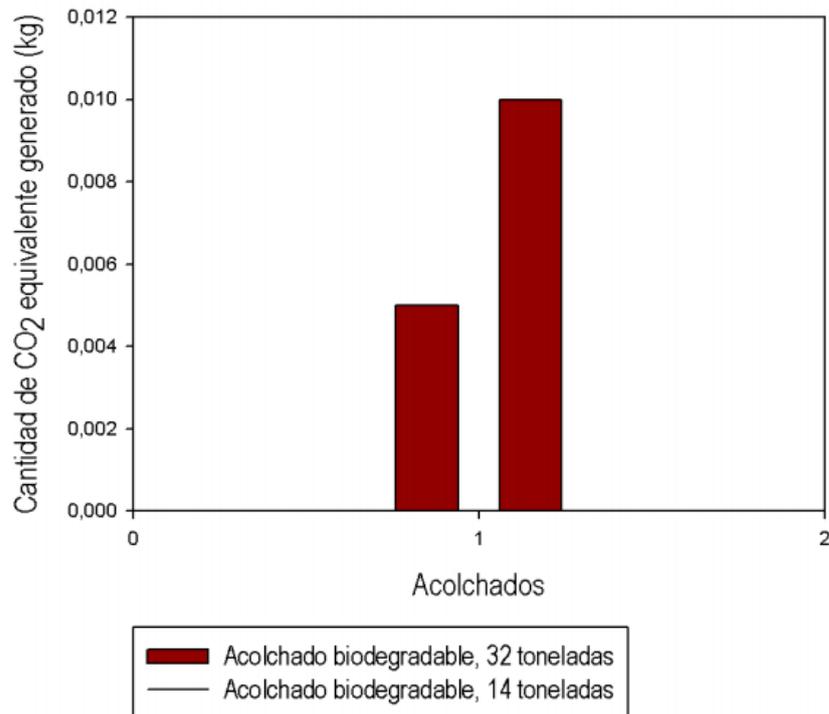
4.3.1.2. TRANSPORTE

Respecto al transporte de ambas materias primas se obtiene un valor significativamente mayor para el acolchado biodegradable, tal y como se esperaba, puesto que es suministrado desde fuera de la península (2000 km), al contrario que el acolchado tradicional, que se suministra desde dentro (400 km).



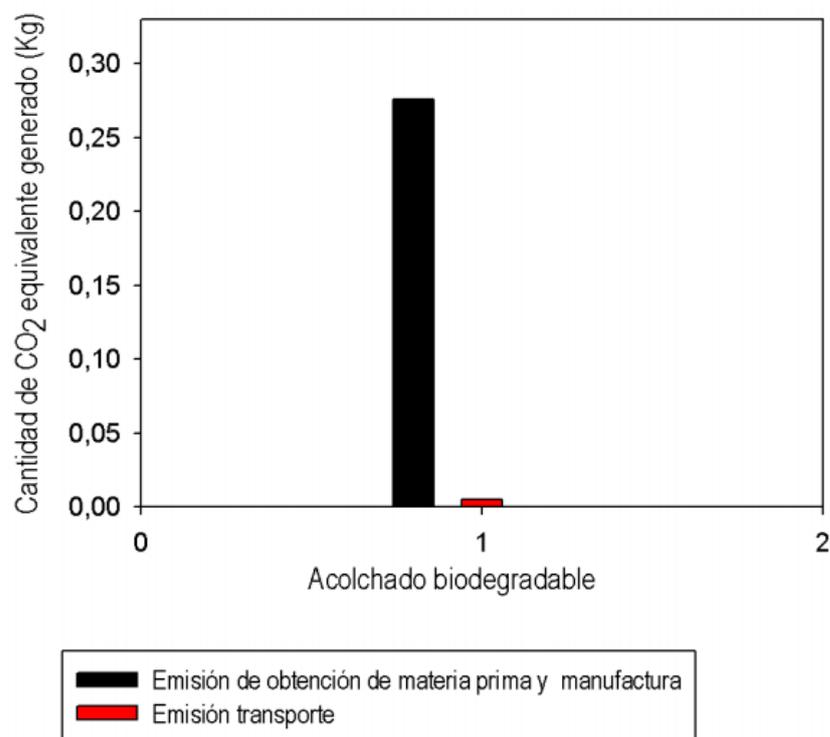
Gráfica 4. Emisiones de ambos acolchados calculados para espesores intermedios. 32 toneladas de mercancía transportada.

Destacar por otro lado la evidencia de que a mayor mercancía transportada menos cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por acolchado. Se han comparado dos vehículos, en este caso camiones, con capacidad de cabina distinta, 32 y 14 toneladas respectivamente. El vehículo que transporta 14 toneladas duplica los valores de emisión en comparación con el vehículo de 32 toneladas, como se muestra en la gráfica 5 para el acolchado biodegradable.



Gráfica 5. Emisiones del acolchado biodegradable calculado para espesor intermedio para 32-14 toneladas de mercancía transportada.

Para espesores distintos y acolchados negros el transporte no varía de forma muy significativa, los valores son similares a los obtenidos en el caso A. Por otro lado, si comparamos la etapa de obtención de materia prima y proceso de fabricación frente al transporte, éste último no representa una gran variación en las emisiones totales, tal y como se muestra en la gráfica 6. En la gráfica 6 se representan las emisiones de ambas etapas para un acolchado biodegradable transparente con espesores medios.



Gráfica 6. Emisiones materia prima y manufactura Vs Emisiones transporte

4.3.1.3. ETAPA FINAL

El acolchado biodegradable será materia prima para el proceso de compostaje y teniendo en cuenta que el carbono que forma papel de este proceso pertenece al ciclo de carbón neutro, no se tiene en cuenta. En cambio, en el caso del acolchado de LDPE se presentan distintas alternativas, lo que da lugar a este escenario real.

Para hacer una estimación más exacta de las emisiones generadas en la etapa final del acolchado tradicional se tomará como referencia los porcentajes determinados por los estudios de Ecoembes y PlasticEurope para cada actividad. Se estima aproximadamente un 40% de residuo termoplástico reciclado, un 20% se somete a combustión, como recuperación de energía y, el resto, un 40%, se dirige a vertederos. Los datos expuestos en la tabla 14 son los equivalentes a los obtenidos en el caso A, caso B, para mínimo y máximo calibre, y caso C, en el que solamente varía el proceso de combustión y vertedero como mejores alternativas de final de vida para ambos acolchados negros, puesto que el negro de carbón, aun no impidiendo que estos sean

recicladados, contamina el producto reciclado disminuyendo su calidad final y obligando a incorporar ciertos aditivos a dicho producto final para poder darle utilidad. En este último caso las proporciones serán de 60-40% para la actividad final en vertedero y combustión, respectivamente.

Tabla 15. Resultados numéricos obtenidos en cada uno de los casos estudiados para la etapa final de vida.

CASOS/ETAPA FINAL DE VIDA	RECICLADO 40%	VERTEDERO 40%	COMBUSTIÓN 20%
CASO A	-0,0228	0,0004	0,0752
CASO B	-(0,0184-0,0276)	0,0004-0,0008	0,0602-0,0904
CASO C	-	0,0005	0.1011

Teniendo en cuenta los valores expuestos en la tabla 14 y los porcentajes establecidos para cada etapa final, los kilogramos totales de GEI producidos en la actividad de un acolchado de polietileno de baja densidad son los especificados en la tabla 15.

Tabla 16. Valores finales para el escenario real en la última actividad del ciclo de vida del acolchado tradicional.

CASOS	Kg totales de GEI para 40-40-20%
A	0,0061
B	0,0048-0,0074
C	0,0407

Para calcular si el error cometido con esta suposición es significativo se obtendrá el error relativo por Kg de CO₂ equivalente emitido. En primer lugar se calcula el error absoluto. Para poder obtener el valor absoluto se debe calcular la media de varios valores, dichos valores se han seleccionado de las proporciones estimadas, para las distintas actividades finales de vida, según los estudios y cálculos realizados por Ecoembes y PlasticEurope, tal y como se ha comentado en apartados anteriores. De esta forma las proporciones seleccionadas para obtener los valores necesarios y cuantificar el error, son las siguientes (reciclado, vertedero, combustión): 35-40-18%, 40-45-15%, 30-40-20%, 37-40-13% y 37-43-20%. Algunos de estos valores no llegan a completar el 100%, esto quiere decir que la parte restante no se ha arrojado de manera consciente a ninguna vía de recuperación o tratamiento, por ejemplo, una bolsa de

plástico arrojada al suelo y que, finalmente, llega al mar. Para este caso, puesto que, quedaría al aire libre se estima que los valores de CO₂ equivalentes de estos materiales serán similares a arrojarlos a un vertedero. Por lo tanto, en el caso de la proporción 35-40-18% donde faltaría un 7% para llegar al 100% las proporciones cambiarán a 35-47-18%.

En la tabla siguiente se muestran las emisiones totales obtenidas de las proporciones comentadas, todo ello para los valores del caso A (masas intermedias):

Tabla 17. Kg de CO₂ equivalente en función de varias proporciones.

PORPORCIÓN (%)	EMISIÓN TOTAL CON ERROR (Kg de CO ₂ equi.)
35-40-18	0,0057
40-45-15	0.0023
30-40-20	0,0084
37-40-13	0,0015
37-43-20	0,0068
45-45-10	0,0061

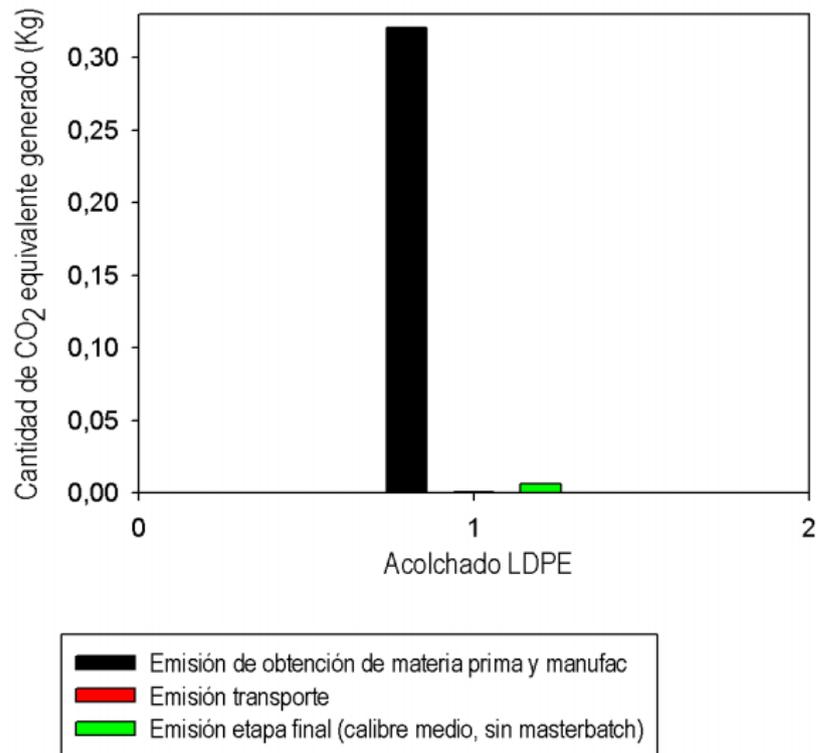
Media obtenida de los valores de la tabla 16: 0,0052 kg de CO₂ equivalente

Error absoluto: Valor real – Valor medio = 0.0061-0.0052 = 0,0009; **0,0061 ± 0,0009**

Error relativo: Error absoluto/ Valor real= $9 \cdot 10^{-4} / 0,0061 = 0.15$

Se comete un error poco significativo. **0.15 Kg de error/Kg de CO₂ equivalente.**

A continuación se aprecia de forma visual la influencia de la etapa final de vida respecto a las diferentes etapas que componen el ciclo de vida del acolchado LDPE.



Gráfica 7. Comparación de las etapas del ciclo de vida del acolchado de LDPE.

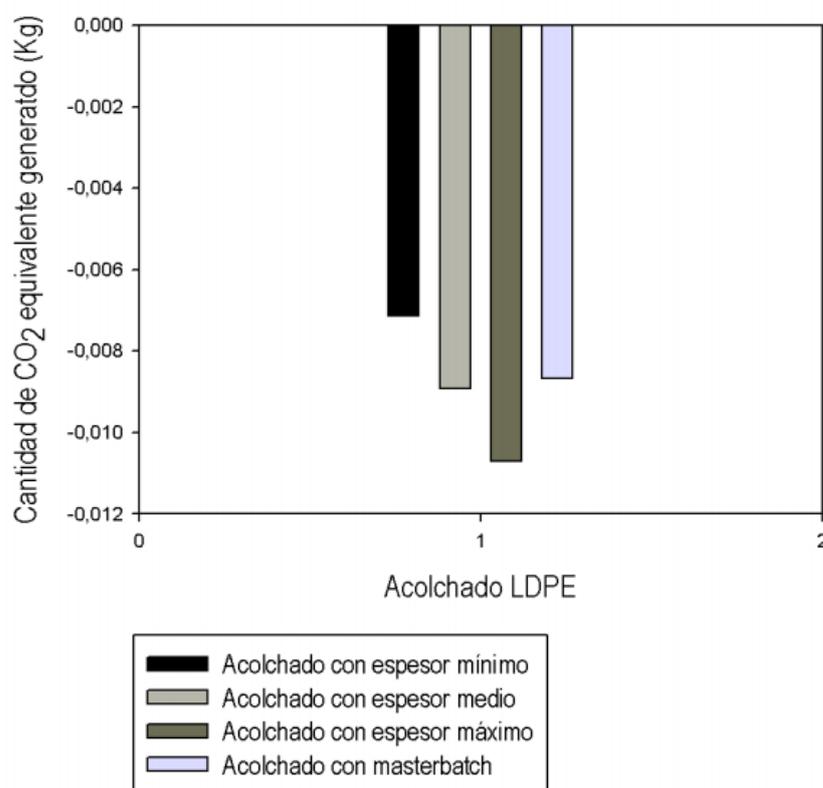
Como se puede observar la etapa más significativa sigue siendo la etapa de obtención de materia prima y manufactura. Por lo tanto, una solución posible sería rediseñar dicha etapa de ambos acolchados obteniendo unos ciclos de vida más sostenibles.

4.3.2. ESCENARIO HIPOTÉTICO

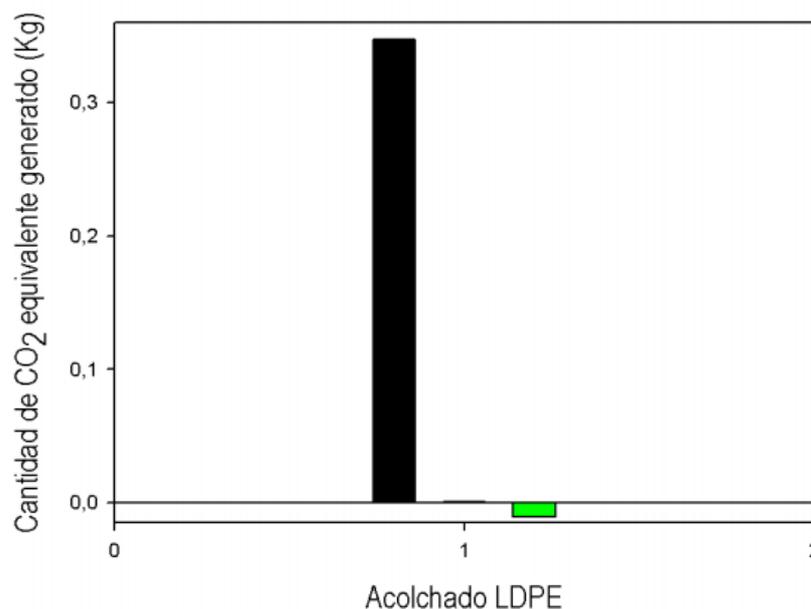
Los residuos plásticos agrícolas se han comenzado a emplear como materia prima en la fabricación de asfaltos o pavimentos, es decir, se emplean para la síntesis de productos o aplicaciones en las que se necesita una calidad más baja, a diferencia del reciclaje, donde al producto final se le debe añadir aditivos para conseguir una calidad aceptable. Esta actividad recibe el nombre de *downcycling* y genera una nueva oportunidad de actividad para la última etapa del ciclo de vida del acolchado tradicional. Recordamos que el biodegradable pasará por un proceso de compostaje.

Tabla 18. Kg de CO₂ equivalentes emitidos por la actividad downcycling en los diferentes casos estudiados.

CASOS	Kg de CO ₂ equivalente.
A	-0,00893
B	-(0,00713-0,0107)
C	-0,00876



Gráfica 8. Kg de CO₂ emitido para los diferentes casos estudiados en el proceso final de downcycling.



Gráfica 9. Comparación de las distintas etapas que forman parte del ciclo de vida de un acolchado negro con etapa final downcycling.

Como se puede observar la etapa más significativa sigue siendo la etapa de obtención de materia prima y manufactura, pero en este caso el proceso final de vida es negativo, lo que favorece a la emisión total generada por el acolchado tradicional frente al biodegradable, aun siendo un valor pequeño respecto a la primera etapa.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que, aunque en este trabajo fin de máster se hable de valores bajo, nunca lo son. El proyecto se ha basado en el estudio de la huella de carbono, generada por el plástico empleado en una hectárea de cultivo. Una sola empresa dedicada a la fabricación de materiales plásticos agrícolas puede producir alrededor de 18.000 toneladas de plástico al año, lo que supondría 25,5 toneladas de CO₂ equivalente emitido, solamente en la etapa de obtención de materia prima y fabricación, para una sola empresa y únicamente de plásticos agrícolas, sin ir más allá de las industrias empleadas en la síntesis de recipientes o envases plásticos. Por ello, plantear una visión más sostenible y hacer un buen uso de estos materiales representa un gran beneficio para nuestro ecosistema, y esta nueva actividad, llamada downcycling, reciente y poco experimentada, podría llegar a ser una buena alternativa.

El empleo de esta técnica es un proceso totalmente integrado en una economía circular que crea una simbiosis industrial, donde los residuos generados en cierta actividad pueden ser empleados como materia prima en otra. El final de vida del ciclo de un

producto es el inicio de otro. De esta forma, además de conseguir una reducción de la cantidad de CO₂ equivalente emitido, se lleva a cabo una mejor gestión de recursos, nuevos modelos de negocio, una armonización del ritmo industrial, ahorro neto de costes en materias primas o productos de consumo...etc. Se consigue un proceso más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, la sociedad y la economía.

A su vez, esta actividad ayudaría a replantearse cuál sería la etapa dominante. Si combinamos dos ciclos de vida, es decir, el ciclo de vida de un acolchado biodegradable o tradicional con el ciclo de vida del siguiente producto que se obtendrá del residuo del primero, en este caso un asfalto, la emisión de la etapa dominante, en este caso obtención de materia prima y fabricación podría compensarse con el ahorro de la emisión del segundo producto, puesto que no debe de obtenerse materia prima al ser el residuo del primer ciclo de vida. De esta forma, la etapa dominante o que encabeza este otro punto de vista, sería la etapa final, que ayudaría a disminuir la emisión en otro proceso así como, la reducción de residuos y gestión de recursos.



Imagen 46. Ciclo de vida de un producto.

El enfoque es importante, puesto que puede darse solución desde un mismo ciclo de vida o ampliar visión y compensar, así como, reducir contaminación o residuos, de varios ciclos de vida. Por otro lado, es importante tener en cuenta que el estudio se ha realizado mediante una sola herramienta de gestión, como es la huella de carbono, la

cual ha dado origen a varias alternativas de mejora. Si estos resultados se contrastasen con los estudios realizados con otras herramientas de gestión, como puede ser un Análisis de Ciclo de Vida existiría la posibilidad de ampliar opciones de mejora y buscar alternativas que supondrían una mejora continua, no solo para un solo producto, sino, como ya se ha podido ver, abarcando y relacionando varios productos, creando un tipo de simbiosis.

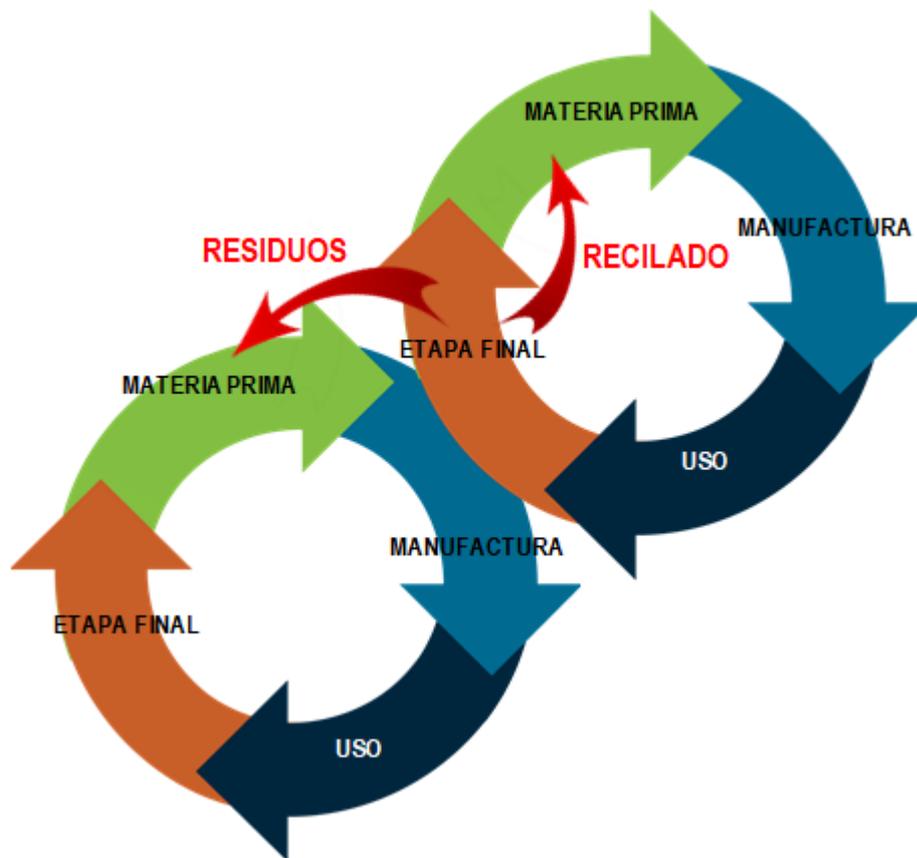


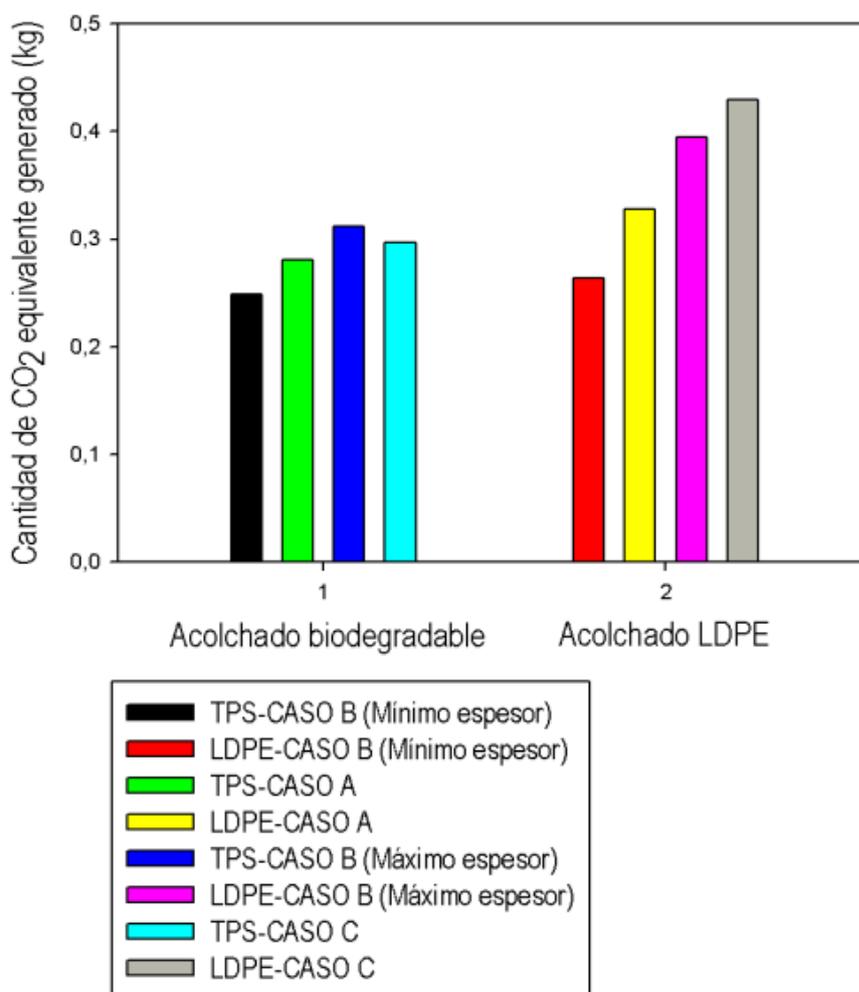
Imagen 47. Economía circular y simbiosis.

4.3.3. HUELLA DE CARBONO TOTAL PARA CADA UNO DE LOS CASOS ESTUDIADOS EN EL ANÁLISIS.

En la siguiente tabla se especifican los valores de emisión total totales de GEI para cada uno de los casos estudiado. El valor total de emisión hace referencia a la huella de carbono total emitida por cada ciclo.

Tabla 19. Huella de carbono total para cada uno de los casos estudiados en el análisis.

Acolchados	CASO A	CASO B	CASO C
Biodegradable	0,281	0,249/0,312	0,297
LDPE	0,328	0,264/0,395	0,429



Gráfica 10. Huella de carbono total para cada uno de los casos estudiados en el análisis.

En la gráfica10 se muestran los valores de la tabla 19 para ambos acolchados.

Como puede observarse la masa y el negro de carbón contribuyen en la variación de la huella de carbono, siendo la masa el factor más sensible respecto a la variación de la huella de carbono total. Por otro lado, el negro de carbón perjudica en mayor medida al colchado termoplástico que al acolchado biodegradable, por el hecho de dificultar el proceso de reciclaje de éste.

Por lo tanto, ambos factores afectan a la emisión de gases efecto invernadero del ciclo de vida de estos materiales. Los valores obtenidos en el estudio servirán como criterio para seleccionar el tipo de acolchado que supondría la elección más sostenible, según las propiedades que se buscan y se requieren en el producto.

5. CONCLUSIÓN Y RESUMEN

1. El estudio se ha llevado a cabo con el software CES EduPack que dispone de una herramienta llamada EcoAudit que ayuda a calcular la cantidad de energía consumida y la emisión de GEI para las distintas etapas que componen el ciclo de vida de un producto. De esta manera se obtiene la etapa dominante y se elabora un ecodiseño.
2. EcoAudit permite analizar las siguientes etapas: Etapa de obtención de materia prima, etapa de manufactura o proceso de fabricación, etapa de transporte, etapa de uso y etapa final de vida. En este proyecto se han tenido en cuenta todas las etapas excepto la de uso, puesto que hablamos de acolchados que se extienden sobre una superficie.
3. El estudio de la huella de carbono se ha dividido en tres casos correspondientes a tres hipótesis iniciales, las cuales son:
 - CASO A: La influencia de la generación de GEI para cada una de las etapas que componen el ciclo de vida de ambos acolchados. Se espera que los valores emitidos para la etapa de obtención de materia prima y manufactura sea mayor que el resto, siendo más elevada la del tradicional por su procedencia fósil. Por otro lado, la materia vegetal para sintetizar el acolchado biodegradable es suministrado desde Italia, mientras que el polietileno de baja densidad es fácilmente adquirible desde la península. Esta diferencia de kilómetros recorridos para obtener la materia podría suponer un aumento significativo de los Kg de CO₂ equivalente para el acolchado biodegradable. Por tanto, es interesante observar qué etapa es la predominante para cada uno de los acolchados.
 - CASO B: La masa de los acolchados. El acolchado tradicional se fabrica para unos grosores de entre 20-30 micras, mientras que el acolchado biodegradable se encuentra entre 12-15 micras. Esta diferencia de espesores podría suponer una variación de los resultados del caso anterior.

- CASO C: Los acolchados pueden presentarse transparentes, blancos, negros, rojos, mixtos...etc. Generalmente en la región se comercializan los acolchados negros, esto quiere decir que se le incorpora un aditivo. Este aditivo es un extra que forma parte del producto final, el acolchado, por lo tanto debe tenerse en cuenta y estudiar en qué proporción influye.
4. Para la etapa de obtención de materia prima y manufactura se ha obtenido una mínima diferencia entre ambos acolchados. El acolchado tradicional supera al biodegradable pero no para todos los grosores. Cuando el calibre del acolchado tradicional es mínimo y el biodegradable máximo los puestos se intercambian, siendo el acolchado biodegradable el acolchado que mayor cantidad de CO₂ equivalente genera. Por otro lado, al comparar un acolchado biodegradable negro con un acolchado LDPE transparente, sin negro de carbón, éste último sigue siendo el acolchado con mayor emisión para la etapa 1. Por tanto, la poca diferencia de emisión entre ambos acolchados donde, el acolchado tradicional se encuentra por encima, depende de varios factores, como el espesor y la composición de los mantos. De esta forma, el biodegradable podría llegar a emitir una mayor cantidad de CO₂ equivalente que el tradicional modificando el espesor y su concentración en negro de carbón.
 5. En la etapa de transporte se observa una gran diferencia entre el acolchado biodegradable, este con mayor emisión, y el acolchado tradicional, así como en la cantidad transportada. A mayor cantidad transportada por viaje, menos cantidad de CO₂ equivalente emitido. Por otro lado, los factores que puedan interferir no son significativos para los valores de emisión obtenidos en el transporte, ya sea la modificación del espesor o su composición, el transporte predominante siempre será de la materia prima. De esta forma, si obtenemos un acolchado biodegradable con mayor o menor espesor, no se observarán grandes variaciones en la emisión de CO₂ equivalente porque la materia prima se transporta por toneladas.
 6. La etapa final para cada acolchado difiere. En el acolchado biodegradable se asume como nula, debido a que será destinado como materia prima a un

proceso de compostaje y el carbono que participará en las reacciones del proceso pertenece al ciclo de carbono neutro. Para el acolchado tradicional se han establecidos dos escenarios distintos, un escenario real y un escenario hipotético. En el escenario real se estudiarán las distintas actividades más comúnmente empeladas hoy en día, como son el reciclado, la retirada a vertederos o la recuperación de energía por medio del proceso de combustión. Por otro lado, surge otra actividad llamada *downcycling* para residuos generados en plasticultura. Ésta actividad, poco explotada y no puesta en práctica desde hace mucho, resulta interesante y será protagonista del escenario hipotético.

7. La etapa final del acolchado de LDPE es más complejo que el biodegradable, puesto que presenta mayores alternativas, entre ellas están las actividades de reciclaje, *downcycling*, vertedero y combustión, ordenadas de menor a mayor emisión. En las dos primeras se consumen GEI, en la tercera se mantienen los niveles estables, pero supondrían un problema para la contaminación de nuestro entorno, y la última eleva notablemente la cantidad de CO₂ equivalente emitida.
8. Hoy en día no todo el material termoplástico es dirigido a una sola actividad (reciclado, vertedero, combustión), de este modo en el escenario real se estudian todas las alternativas según la proporción en la que son explotadas cada una de ellas. Esta proporción se estima de los estudios realizados por Ecoembes y PlasticEurope. Aproximadamente, se ha estimado en este trabajo fin de máster que, el 40% es reciclado, otro 40% es arrojado a vertederos y, por último, el 20% es empleado en procesos de recuperación de energía, donde debido al proceso de combustión las emisiones son bastante elevadas. Los resultados de emisión obtenidos han sido positivos, es decir, se eleva la emisión de GEI con la combinación de estas tres alternativas, aunque no de forma muy significativa en comparación con la etapa de producción.
9. En un posible escenario futuro o hipotético, se ha contemplado una nueva actividad llamada *downcycling*, donde plásticos agrícolas son empleados como materia prima para asfaltos o pavimentos. De esta forma, además de reducir un pequeño porcentaje las emisiones (no muy significativo), se reduce la

contaminación, el número de residuos, se lleva a cabo una mejor gestión de materiales o materias primas, y por consiguiente, se traduce en una etapa final de vida para estos materiales más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

10. Si se comparan cada una de las etapas, la dominante, con diferencia, es la etapa de obtención de materia prima y proceso de fabricación. Por lo tanto, dentro de las alternativas para combatir esta emisión es rediseñar o realizar un ecodiseño a esta etapa dominante. Por otro lado, el enfoque a la mejora es importante. Si se enfocase de manera que se pudiera combinar el ciclo de vida de los acolchados con el de los pavimentos, generados mediante el proceso de *downcycling*, la etapa final del ciclo de vida podría ser de mayor importancia que la primera etapa. Puesto que lo generado en la primera etapa de los acolchados se podría compensar con el ahorro de obtención de materia prima para el siguiente ciclo, ya sea para fabricar pavimentos, envases, tuberías...etc.
11. A primera vista, los valores de emisiones obtenidos parecen poco importantes, pero si planteamos la producción de plásticos agrícolas a escala mundial, llegan a ser preocupantes. Una sola industria de producción de plásticos agrícola puede llegar a generar 18.000 toneladas de plástico al año, cifras preocupantes cuando hablamos de que solamente en la etapa de obtención de materia prima y fabricación, para una sola industria y referidos al plástico agrícola, sin especificar las toneladas de envases plásticos que se generan y desechan al día, se emite unos 25,5 toneladas de GEI. Alarmantes cantidades de gases efecto invernadero son emitidas al año a la atmósfera terrestre y gran parte pertenece a la industria plástica.
12. La identificación de dos factores, como son el calibre y la composición de negro de carbón del material, ayudará a seleccionar la opción con mayor grado de sostenibilidad según las cualidades y/o propiedades reclamadas para el acolchado.
13. Todas estas conclusiones han sido obtenidas a partir de un único estudio o herramienta de gestión, la huella de carbono. Se ha limitado a estudiar la sostenibilidad de dos productos a partir de la emisión de gases efecto

invernadero. Pero, como ya se ha comentado anteriormente el enfoque del estudio es importante, así como experimentar u observar otras variables que indiquen sostenibilidad, como la cantidad de residuos generados o la energía consumida, es decir, emplear otras herramientas de gestión y ampliar el estudio podría suponer ampliar las alternativas de mejora y propulsar ambos acolchados a ser productos cada vez más sostenibles. La mejora nunca termina, es constante.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. E. Flores, “Polímeros vs. plásticos,” *Facultad de ingeniería - Universidad Rafael Landívar*, no. 14, pp. 51–60, 2009.
- [2] É. Hermida, “Capítulo 9: Polímeros,” *Colección Materiales y materias primas.*, p. 70, 2011.
- [3] Universidad de Valencia, “Tema 9. Química Física de los Polímeros 1.,” *Química Física Avanzada. Cuarto Curso*, pp. 1–43, 2010.
- [4] J. Coreño-Alonso and M. T. Méndez-Bautista, “Relación estructura-propiedades de polímeros,” *Educación Química*, vol. 21, no. 4, pp. 291–299, 2010, doi: 10.1016/s0187-893x(18)30098-3.
- [5] EQUO, “La economía circular,” pp. 1–8, 2016.
- [6] Mercet et al., “Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona,” *Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio*, vol. 4, p. 56, 2018.
- [7] E. Cerdá, “Economía Circular, Estrategia Y Competitividad Empresarial Economía Circular,” 2015.
- [8] E. Arroyo Martínez, “Análisis del ciclo de vida enfocado a la construcción de una vivienda unifamiliar compuesta por tableros de madera contralaminada. Tesis Pregrado,” p. 123, 2018.
- [9] Ihobe S.A, “Análisis de ciclo de vida y huella de carbono,” *Gobierno Vasco*, pp. 1–53, 2009.
- [10] G.Gonzalez Baca, “MATERIALES PLÁSTICOS PARA PELÍCULAS DE ACOLCHADOS.”, 2008.
- [11] L. Armijo, “Acolchados biodegradables de mater-bi características y manejo,” *Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- [12] F. J. Servera Díaz, “Evaluación de materiales biodegradables para acolchado en el cultivo de pimiento,” 2014.
- [13] European Commission, “A circular economy for plastics – Insights from research

and innovation to inform policy and funding decisions. ”, 2019.

- [14] European Bioplastics, “What are bioplastics?”, 2018.
- [15] A. V. Morillas, R. M. E. Valdemar, M. B. Villavicencio, and M. V. Pérez, “Bioplásticos y plásticos degradables,” *Universidad Autonoma Metropolitana*, p. 11, 2015.
- [16] Ecoembes, “Proyecto de Análisis de Bioplásticos” pp. 1–15, 2009.
- [17] Z. Serrano Cermeño, “Hortalizas acolchadas con plástico,” p. 24, 2000.
- [18] A. Muhammad, A. R. Rashidi, M. Muhammad, and H. Shah, “Effect of Coconut Fiber Reinforcement on Mechanical Properties of Corn Starch Bioplastics,” *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. October, pp. 267–270, 2018.
- [19] L. C. de Azevedo *et al.*, “Biodegradable Films Derived from Corn and Potato Starch and Study of the Effect of Silicate Extracted from Sugarcane Waste Ash,” *ACS Applied Polymer Materials*, vol. 2, no. 6, pp. 2160–2169, 2020, doi: 10.1021/acsapm.0c00124.
- [20] A. García, “*Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*”, vol. 25, no. 26. 2015.
- [21] Greenpeace España, “Un Mediterráneo lleno de plástico,” *Greenpeace*, pp. 1–16, 2017.
- [22] PlasticsEurope, “Plastics – the Facts,” *Plastics – the Facts 2018*, ” p. 38, 2018.
- [23] Greenpeace, “Plásticos en los océanos,” *Dossier de prensa*, p. 7, 2016.
- [24] A. Vázquez Morillas, M. Velasco Pérez, M. Beltrán Villavicencio, and R. M. Espinosa Valdemar, “El reciclaje de los plásticos,” pp. 1–12, 2014.
- [25] Ecoembes, Anarpla, “Guía de buenas prácticas.”,2018.

7. ÍNDICE DE IMÁGENES, TABLAS Y GRÁFICAS.

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Máquina que producía piezas de plástico a partir de un molde de forma rudimentaria.	6
Imagen 2. Polimerización del Polietileno (PE).....	7
Imagen 3. Macromolécula del Polietileno (PE).....	8
Imagen 4. Estructura a) Lineal, b) Lineal ramificado, c) Entrecruzada, d) Reticular.	9
Imagen 5. a) Reencuentro adyacente, b) Reencuentro no adyacente.	11
Imagen 6. Modelo cadena plegada.	11
Imagen 7. Estructura de micela de fleco.	12
Imagen 8. Polietileno de baja densidad.....	12
Imagen 9. Representación gráfica del punto de fusión y de transición vítrea	13
Imagen 10. Balance energético de la tierra.....	16
Imagen 11. Cultivo con acolchado opaco.....	20
Imagen 12. Ciclo del dióxido de carbono (CO ₂). Se consume CO ₂ durante el crecimiento de las cosechas.	22
Imagen 13. Relación entre polímeros convencionales, bioplásticos y plásticos biodegradables.....	24
Imagen 14. Isótopos del carbono.	24
Imagen 15. Proceso de degradación de un plástico biodegradable.....	26
Imagen 16. Planta de compostaje.....	28
Imagen 17. Estructura Ácido Poliláctico (PLA).....	29
Imagen 18. Estructura Polihidroxialcanoato (PHA).	29
Imagen 19. Estructura Almidón Termoplástico (TPA).	29
Imagen 20. Estructura de los subpolisacáridos del almidón.....	30
Imagen 21. Disposición estructuras semicristalinas y amorfas dentro del gránulo de almidón.....	31
Imagen 22. Micrografía electrónica de granos de almidón.....	32
Imagen 23. Formación del gel.....	32
Imagen 24. Inicio del proceso de gelatinización.....	33
Imagen 25. Proceso de gelatinización del almidón.	34
Imagen 26. Microplásticos.....	36

Imagen 27. Criba-tambor	39
Imagen 28. Molino de martillo	39
Imagen 29. Unidad de lavado.....	40
Imagen 30. Extrusora de husillo sencillo	41
Imagen 31. Estructura lineal glucosa.	46
Imagen 32. Estructura amilasa.....	46
Imagen 33. Estructura amilopectina.	46
Imagen 34. Estructura LDPE.....	47
Imagen 35. Aspecto del negro de carbón.....	48
Imagen 36. Molécula de Glicerina	49
Imagen 37. Eco Audit. Fases de obtención de materia, fabricación, final de vida y transporte	50
Imagen 38. Eco Audit. Fase de uso e informe.....	50
Imagen 39. Bajo Guadalentín. Región en rojo.....	51
Imagen 40. Distribución de un acolchado agrícola en un medio de cultivo	55
Imagen 41. Estimación de la producción anual de una industria dedicada a la síntesis de termoplásticos agrícolas.....	64
Imagen 42. Ruta Patrica(Italia)-Totana(España).	67
Imagen 43. Ruta Puertollano-Totana	67
Imagen 44. Pellet de termoplástico con negro de carbón.	75
Imagen 45. Esquema composición masterbatch.....	76
Imagen 46. Ciclo de vida de un producto.	90
Imagen 47. Economía circular y simbiosis.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de diseño del acolchado biodegradable.	52
Tabla 2. Propiedades del acolchado biodegradable.....	59
Tabla 3. Cronograma de diseño acolchado polietileno baja densidad.	60
Tabla 4. Propiedades del acolchado LDPE	62
Tabla 5. Precio medio por año de material base.	65
Tabla 6. Incremento de los costes finales para el suministro de materia prima de acolchados biodegradables.....	66
Tabla 7. Datos para el estudio del caso A.....	71

Tabla 8. Kg de CO ₂ equivalente emitidos en cada una de las etapas del ciclo de vida de ambos acolchados para el caso A.....	72
Tabla 9. Comparación de emisiones para las distintas capacidades del vehículo que transporta la materia prima.....	72
Tabla 10 . Masas empleadas en el caso B.....	73
Tabla 11. Kg de CO ₂ equivalente emitidos en cada una de las etapas del ciclo de vida de ambos acolchados para el caso B.....	74
Tabla 12. Datos masa acolchados más masterbatch.....	77
Tabla 13. Kg de CO ₂ equivalente emitidos en cada una de las etapas del ciclo de vida de ambos acolchados para el caso C.	77
Tabla 14. Resultados relevantes obtenidos en cada uno de los casos estudiados para la etapa de obtención de materia, proceso de fabricación y transporte.	78
Tabla 15. Resultados numéricos obtenidos en cada uno de los casos estudiados para la etapa final de vida.	85
Tabla 16. Valores finales para el escenario real en la última actividad del ciclo de vida del acolchado tradicional.	85
Tabla 17. Kg de CO ₂ equivalente en función de varias proporciones.	86
Tabla 18. Kg de CO ₂ equivalentes emitidos por la actividad downcycling en los diferentes casos estudiados.....	88
Tabla 19. Huella de carbono total para cada uno de los casos estudiados en el análisis.	92

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Kg de CO ₂ equivalente de ambos acolchados con espesores medios.	79
Gráfica 2. Kg de CO ₂ equivalente de ambos acolchados para espesor máximo del biodegradable y espesor mínimo para el tradicional en la etapa 1 del ciclo de vida.	80
Gráfica 3. CO ₂ equivalente generado para un acolchado biodegradable negro y un acolchado LDPE transparente para la etapa 1 del ciclo de vida.	81
Gráfica 4. Emisiones de ambos acolchados calculados para espesores intermedios. 32 toneladas de mercancía transportada.	82
Gráfica 5. Emisiones del acolchado biodegradable calculado para espesor intermedio para 32-14 toneladas de mercancía transportada.....	83
Gráfica 6. Emisiones materia prima y manufactura Vs Emisiones transporte	84

Gráfica 7. Comparación de las etapas del ciclo de vida del acolchado de LDPE.....	87
Gráfica 8. Kg de CO ₂ emitido para los diferentes casos estudiados en el proceso final de downcycling.....	88
Gráfica 9. Comparación de las distintas etapas que forman parte del ciclo de vida de un acolchado negro con etapa final downcycling.	89
Gráfica 10. Huella de carbono total para cada uno de los casos estudiados en el análisis.	92

8. ANEXOS

8.1. FICHA TÉCNICA DEL ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO (TPS)



Thermoplastic starch (plasticized)

General properties

Designation

Starch-based thermoplastic

Density	1.26e3	-	1.28e3	kg/m ³
Price	3.76	-	4.48	EUR/kg

Tradenames

TPS, Mater-Bi

Composition overview

Composition (summary)

Blend of modified corn-starch (polysaccharide), synthetic biodegradable polyester, plasticizer

Base	Polymer
Polymer class	Thermoplastic: amorphous
Polymer type	Starch
Polymer type full name	Starch-based thermoplastic
% filler (by weight)	0 %
Filler type	Unfilled

Composition detail

Polymer	100	%
---------	-----	---

Mechanical properties

Young's modulus	2.4e8	-	1.5e9	Pa
Compressive modulus	* 2.4e8	-	1.5e9	Pa
Flexural modulus	* 2.4e8	-	1.73e9	Pa
Shear modulus	* 1.5e8	-	9e8	Pa
Poisson's ratio	* 0.4	-	0.44	
Yield strength (elastic limit)	1.6e7	-	2.2e7	Pa
Tensile strength	1.6e7	-	2.2e7	Pa
Compressive strength	* 2e7	-	2.8e7	Pa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 2.2e7	-	3.2e7	Pa
Elongation	0.1	-	0.8	strain
Hardness - Vickers	* 4.71e7	-	6.47e7	Pa
Hardness - Rockwell M	* 23	-	31.7	
Hardness - Rockwell R	* 35	-	48.2	
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 5.6e6	-	7.7e6	Pa
Fracture toughness	* 8e5	-	1.3e6	Pa.m ^{0.5}

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C	* 5.9e3	-	1.39e4	J/m ²
--------------------------------	---------	---	--------	------------------

Thermal properties

Glass temperature	* 283	-	293	K
Heat deflection temperature 0.45MPa	* 298	-	373	K
Heat deflection temperature 1.8MPa	* 278	-	353	K
Maximum service temperature	* 333	-	353	K
Minimum service temperature	213	-	223	K
Thermal conductivity	* 0.13	-	0.23	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.5e3	-	1.7e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 1.8e-4	-	2.4e-4	strain/°C

Processing properties

Linear mold shrinkage	* 0.15	-	0.5	%
Melt temperature	* 454	-	462	K
Mold temperature	288	-	343	K
Molding pressure range	* 6.1e7	-	6.3e7	Pa

Electrical properties

Electrical resistivity	* 1e8	-	1e10	ohm.m
Dielectric constant (relative permittivity)	* 4	-	5	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0.05	-	0.15	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 1.2e7	-	1.6e7	V/m

Optical properties

Transparency	Opaque
--------------	--------

Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs	* 5	-	10	%
Water absorption @ sat	20	-	67	%

Durability: flammability

Flammability	Highly flammable
--------------	------------------

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Limited use
Water (salt)	Limited use
Weak acids	Limited use
Strong acids	Unacceptable
Weak alkalis	Limited use
Strong alkalis	Unacceptable
Organic solvents	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Good
Oxidation at 500C	Unacceptable

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	4.94e7	-	5.46e7	J/kg
CO2 footprint, primary production	2.38	-	2.63	kg/kg
Water usage	0.1	-	0.3	m ³ /kg

Material processing: energy

Polymer molding energy	* 1.84e7	-	2.03e7	J/kg
Polymer extrusion energy	* 7.93e6	-	8.74e6	J/kg
Polymer machining energy (per unit wt removed)	* 1.94e6	-	2.15e6	J/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer molding CO2	* 1.47	-	1.62	kg/kg
Polymer extrusion CO2	0.635			kg/kg
Polymer machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.155	-	0.172	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	* 4.86e7	-	5.01e7	J/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.46	-	1.5	kg/kg
Recycle fraction in current supply	0.1			%
Downcycle	✓			
Combustion for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 1.66e7	-	1.74e7	J/kg
Combustion CO2	* 1.59	-	1.67	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegradable	✓			
A renewable resource?	✓			

8.2. FICHA TÉCNICA DEL TERMOPLÁSTICO DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)



PE-LD (molding and extrusion)

General properties

Designation

Low density polyethylene / LDPE (Low/medium density, branched homopolymer)

Density	917	-	932	kg/m ³
Price	1.13	-	1.25	EUR/kg

Tradenames

Alathon; Alkathene; Alkatuff; Alphacan; Alpolic; Appryl; Argentina-I; Argetena-J; Aspun; Asrene; Bapolene; Borstar; Brañen; Bynet; Cestidur; Cestilene; Cestilite; ChampLine; Clearflex; Cogefill; Cogegum; Compotene; Cosmothene; Cotene; CPGSeaboard; DaelmPoly; Dafnelen; Daisolac; Densetec; Dinalen; Dowlex; DPE; Dunalon; Dynex; Elenac; Elite; EL-Lene; Eltex; Eraclene; Ethafoam; Etilnas; Evatane; Evolve; Excco; Farralloy; Ferrene; Finathane; Flexet; Flexirene; Forlink; Formolene; Fortiflex; Funecon; Getlan; G-Lene; G-Lex; Halene; Harmorex; HID; Hipersite; Hitec; HiVal; Hivorex; HiWax; HI-ZEX; Hostalen; Ilen; Indothene; Innovex; Ipethene; J-Rex; Kemcor; Lacqtene; Lagomix; Lagotene; Lamdex; LinTech; Liten; Lubotene; Lucofin; Luflexen; Lumitac; Lupolen; Lupolex; Malen-E; Marflex; Marlex; Maxbatch; Maxlen; Microlen; Microthene; Mirason; Mirathen; mPact; Nevlen; Nipolon; Nissen; Nortuff; Novapol; Novatec; Novex; Okiten; Osstyrol; Padmex; Paxon; Perlene; Petlen; Petrothene; Plastazote; Polidan; Polinter; Polyfort; Polystone; Pre-Elec; Pro-Fax; Reclair; Relene; Repolen; Rexell; Rblene; Rigidex; Rotoflame; Sanalte; Sanatec; Sanren; Schulink; Scolefin; S-Com; Seetec; Spherilin; Stamylen; Stamylen; Sumikathene; Sunfine; Suntec; Suplex; Syncure; Tecafine; Thai-Zex; Thermolen; Tipilen; Tipolen; Tracel; Tracolon; Tufin; Tyvek; Ultzex; Umerit; Univa; Venelene; Vstolen; VulTracell; Vyon; Vylek; Yuhwa; Yukalon; Zemid

Composition overview

Composition (summary)

(CH₂CH₂)_n homopolymer with a high degree of branching – i.e. substitution of H by polyethylene chain branches

Base	Polymer		
Polymer class	Thermoplastic: semi-crystalline		
Polymer type	PE-LD		
Polymer type full name	Polyethylene, low density		
% filler (by weight)	0		%
Filler type	Unfilled		

Composition detail

Polymer	100		%
---------	-----	--	---

Mechanical properties

Young's modulus	1.72e8	-	2.83e8	Pa
Compressive modulus	* 1.72e8	-	2.83e8	Pa
Flexural modulus	2.41e8	-	3.3e8	Pa
Shear modulus	* 5.94e7	-	9.77e7	Pa
Bulk modulus	* 6.89e8	-	7.23e8	Pa
Poisson's ratio	* 0.439	-	0.457	
Shape factor	3.5			
Yield strength (elastic limit)	8.96e6	-	1.45e7	Pa
Tensile strength	1.33e7	-	2.64e7	Pa
Compressive strength	* 1.08e7	-	1.74e7	Pa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 1.86e7	-	3.7e7	Pa
Elongation	1	-	6.5	strain
Hardness - Vickers	* 2.65e7	-	4.31e7	Pa
Hardness - Rockwell M	* 29	-	31	
Hardness - Rockwell R	* 40	-	50	
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 5.31e6	-	1.06e7	Pa
Fracture toughness	* 1.21e6	-	3.39e6	Pa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.141	-	0.233	

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C	1.9e5	-	2e5	J/m ²
Impact strength, notched -30 °C	1.9e5	-	2e5	J/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	1.9e5	-	2e5	J/m ²

Impact strength, unnotched -30 °C	1.9e5	- 2e5	J/m ²
Thermal properties			
Melting point	371	- 388	K
Glass temperature	148	- 183	K
Heat deflection temperature 0.45MPa	313	- 317	K
Heat deflection temperature 1.8MPa	* 276	- 304	K
Maximum service temperature	354	- 368	K
Minimum service temperature	205	- 215	K
Thermal conductivity	0.322	- 0.348	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.84e3	- 1.92e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	1.8e-4	- 3.96e-4	strain/°C
Processing properties			
Linear mold shrinkage	1.5	- 5	%
Melt temperature	394	- 505	K
Mold temperature	303	- 323	K
Molding pressure range	3.44e7	- 1.03e8	Pa
Electrical properties			
Electrical resistivity	3.3e16	- 3e17	ohm.m
Dielectric constant (relative permittivity)	2.2	- 2.4	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	4e-4	- 6e-4	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	1.77e7	- 3.94e7	V/m
Comparative tracking index	600		V
Optical properties			
Refractive index	1.57		
Transparency	Translucent		
Absorption, permeability			
Water absorption @ 24 hrs	0.005	- 0.01	%
Water vapor transmission	0.248	- 0.506	g.mm/m ² .day
Permeability (O ₂)	113	- 193	cm ³ .mm/m ² .day.atm
Durability: flammability			
Flammability	Highly flammable		
Durability: fluids and sunlight			
Water (fresh)	Excellent		
Water (salt)	Excellent		
Weak acids	Excellent		
Strong acids	Acceptable		
Weak alkalis	Acceptable		
Strong alkalis	Acceptable		
Organic solvents	Limited use		
UV radiation (sunlight)	Poor		
Oxidation at 500C	Unacceptable		
Primary material production: energy, CO₂ and water			
Embodied energy, primary production	7.68e7	- 8.49e7	J/kg
CC ₂ footprint, primary production	1.95	- 2.15	kg/kg
Water usage	0.0381	- 0.114	m ³ /kg
Material processing: energy			
Polymer molding energy	* 2.28e7	- 2.51 e7	J/kg
Polymer extrusion energy	* 8.25e6	- 9.09e6	J/kg

8.3. FICHA TÉCNICA DEL NEGRO DE CABRÓN



Carbon (petroleum coke base)

General properties

Designation

Petroleum Coke Base Carbon

Density	1.25e3	-	1.41e3	kg/m ³
Porosity (closed)	* 0	-	0.09	%
Porosity (open)	* 0.24	-	0.33	%
Price	8.3	-	12.6	EUR/kg

Composition overview

Composition (summary)

C

Base	C (Carbon)
------	------------

Composition detail

C (carbon)	100	%
------------	-----	---

Mechanical properties

Young's modulus	1.1e10	-	1.6e10	Pa
Flexural modulus	* 1.1e10	-	1.6e10	Pa
Shear modulus	* 4.6e9	-	6.7e9	Pa
Bulk modulus	* 6.1e9	-	8.9e9	Pa
Poisson's ratio	* 0.17	-	0.23	
Shape factor	15			
Yield strength (elastic limit)	* 6.2e6	-	7.6e6	Pa
Tensile strength	6.2e6	-	7.6e6	Pa
Compressive strength	4.34e7	-	6.2e7	Pa
Flexural strength (modulus of rupture)	1.72e7	-	2.07e7	Pa
Elongation	* 4e-4	-	7e-4	strain
Hardness - Vickers	* 1.45e8	-	1.6e8	Pa
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 5.56e6	-	6.49e6	Pa
Fracture toughness	* 1e6	-	1.4e6	Pa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.002	-	0.02	

Thermal properties

Melting point	3.8e3	-	3.95e3	K
Maximum service temperature	* 2.85e3	-	2.96e3	K
Minimum service temperature	0.15			K
Thermal conductivity	5.2	-	8.7	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.05e3	-	1.16e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	7e-7	-	8e-7	strain/°C
Latent heat of fusion	* 2.42e6	-	2.73e6	J/kg

Electrical properties

Electrical resistivity	3.5e-7	-	4.3e-7	ohm.m
------------------------	--------	---	--------	-------

Optical properties

Color	Black
Transparency	Opaque

Durability: flammability

Flammability	Non-flammable
--------------	---------------

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent

Strong acids	Acceptable		
Weak alkalis	Excellent		
Strong alkalis	Unacceptable		
Organic solvents	Excellent		
UV radiation (sunlight)	Excellent		
Oxidation at 500C	Limited use		
Halogens	Acceptable		
Metals	Acceptable		
Primary material production: energy, CO2 and water			
Embodied energy, primary production	* 6.54e7	- 7.22e7	J/kg
CO2 footprint, primary production	* 3.53	- 3.9	kg/kg
Water usage	* 0.0686	- 0.0759	m ³ /kg
Material processing: energy			
Ceramic finishing energy	* 1e6	- 2e6	J/kg
Material processing: CO2 footprint			
Ceramic finishing CO2	* 0.08	- 0.16	kg/kg
Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction			
Recycle	✗		
Recycle fraction in current supply	4.73	- 5.22	%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✓		
Heat of combustion (net)	* 3.2e7	- 3.36e7	J/kg
Combustion CO2	* 3.58	- 3.76	kg/kg
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		
A renewable resource?	✗		