



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio de la biodegradabilidad y compostabilidad de los diferentes plásticos

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE PROCESOS
SOSTENIBLES



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Paula Moreno Martínez
Director: Marta Doval Miñarro
Codirector: Ramón Francisco Pamies Porras

Cartagena, noviembre de 2020

Agradecimientos

“A mis padres, a mis hermanos y a toda mi familia, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes sólo puedo expresar mi sincero agradecimiento por apoyarme durante esta fase a la cual hoy pongo punto final”

“A todas y cada una de las personas que esta experiencia me ha dado”

“A mis profesores por su acompañamiento, su energía y su apoyo durante esta etapa que nos ha unido”

“A mi tutora de proyecto por haber sido mi guía y mi estímulo durante el diseño y redacción del proyecto”

Resumen

El trabajo se inicia analizando teóricamente los efectos y características de los plásticos convencionales, cuya materia prima se obtiene principalmente a partir de derivados del petróleo. La problemática principal de estos materiales es su elevado tiempo de degradación, convirtiéndose en un problema tanto a nivel medio ambiental como para la salud, ya que un porcentaje muy alto de los mismos acaba en los océanos. Por ello, para hacer frente a este problema en los últimos años surgieron una serie de polímeros producidos a partir de desechos orgánicos, conocidos como bioplásticos, los cuales provienen de productos vegetales, tales como el aceite de soja, el maíz o la fécula de la patata. Dentro de este grupo se incluyen plásticos biodegradables, materiales que después de su uso, se descomponen naturalmente por acción de diferentes organismos en dióxido de carbono, metano, agua y biomasa. Además, dentro de este grupo se incluyen los plásticos compostables, materiales biodegradables que tienen la calidad necesaria para poder producir compost. Así el principal objetivo es analizar exhaustivamente la biodegradabilidad y compostabilidad de los diferentes tipos de plásticos para poder ayudar a los diferentes consumidores y la población en general a entender mejor dichos conceptos e incentivar a los mismos a usar compuestos biodegradables para evitar en la medida de lo posible usar plásticos de un solo uso. Además, se va a mostrar de manera clara la normativa para facilitar el uso de estos plásticos, ya que en muchos casos la falta de información acerca de los mismos dificulta su uso o su inclusión en la mayor parte de las industrias. Por último, se van a mostrar los distintos organismos certificadores de plásticos biodegradables y compostables que existen en la actualidad para determinar cuantitativamente la biodegradabilidad y la compostabilidad de dichos materiales y garantizar que dichos productos cumplen con la normativa vigente y poseen unas características de calidad adecuadas.

Palabras clave: Residuo, plástico, contaminación, bioplástico, biodegradable, compostable y degradación.

Abstract

This work begins by theoretically analyzing the effects and characteristics of conventional plastics, which are manufactured from petroleum derivatives. The long degradation time of these materials leads to difficulties in the waste managing, becoming a problem both at an environmental and health level, since a very high percentage of them end up in the oceans. In recent years, a series of polymers, known as bioplastics, have emerged in response to this situation. These materials come from vegetable products such as soybean oil, corn or potato starch. This group includes biodegradable plastics, materials that after use, are naturally decomposed through different organisms into carbon dioxide, methane, water and biomass. Also included in this group are compostable plastics, biodegradable materials that have the necessary quality to be able to produce compost. Thus, the main objective is to thoroughly analyze the biodegradability and compostability of different types of plastics in order to help different consumers and the general population to better understand these concepts and to encourage them to use biodegradable compounds to avoid using single-use plastics. In addition, regulations will be clearly shown to facilitate the use of these plastics, since in many cases the lack of information about them makes their use or inclusion in most industries difficult. Finally, the different certifying bodies for biodegradable and compostable plastics that currently exist will be shown in order to quantitatively determine the biodegradability and compostability of these materials and to guarantee that these products comply with current regulations and have adequate quality characteristics.

Key words: Waste, plastic, pollution, bioplastic, biodegradable, compostable and degradation.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	16
1.1	Antecedentes históricos	18
1.2	Origen del primer plástico sintético.....	19
1.3	Desarrollo de polímeros.....	21
1.4	Problemática del plástico en el medio ambiente.....	25
1.5	Evolución de los plásticos a lo largo de la historia.....	29
1.6	Estrategia europea del plástico dentro de la economía.....	31
1.6.1	Pasos a seguir para fijar esta estrategia; reciclado.....	37
1.6.2	Futuro de los plásticos a nivel mundial	42
1.7	Situación actual en España.....	43
2.	MARCO TEÓRICO	46
2.1	Biodegradabilidad.....	46
2.1.1	Mecanismos de degradación de los diferentes polímeros	50
2.1.2	Aplicaciones de polímeros biodegradables	64
2.2	Compostabilidad.....	74
2.2.1	Etapas del proceso compostaje.....	76
2.2.2	Parámetros de seguimiento en el proceso de compostaje.....	78
2.2.3	Parámetros relativos a la naturaleza del residuo.....	81
2.2.4	Reacciones más importantes producidas durante el proceso de compostaje	86
2.2.5	Sistemas de compostaje industrial: Pila y túnel.....	89
3.	OBJETIVOS DEL PRESENTE TFM.....	94
4.	ESTRUCTURACIÓN DE LA NORMATIVA RELATIVA A PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y COMPOSTABLES	95
4.1	Organización de la normativa	96
5.	DISTINTOS ORGANISMOS CERTIFICADORES DE PRODUCTOS PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y COMPOSTABLES	103

5.1	Productos plásticos biodegradables	103
5.1.1	Certificación de productos plásticos biodegradables.....	103
5.1.2	Armonización de la certificación.....	103
5.1.3	Organismos de certificación en Europa.....	104
5.1.4	Etiquetado.....	104
5.2	Productos plásticos compostables.....	104
5.2.1	Certificación de productos plásticos compostables.....	104
5.2.2	Armonización de la certificación.....	106
5.2.3	Organismos de certificación en Europa.....	106
5.2.4	Etiquetado.....	106
6.	ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD/ COMPOSTABILIDAD DEL PLA EN BASE A LA BIBLIOGRAFÍA	107
6.1	Obtención del ácido láctico.....	108
6.2	Proceso de polimerización	111
6.3	Propiedades del PLA	113
6.4	Proceso de degradación	115
6.5	Diseño de un ensayo normalizado de la biodegradabilidad del PLA	119
7.	CONCLUSIONES.....	125
8.	BIBLIOGRAFÍA	126

Índice de figuras

Ilustración 1 Clasificación de los plásticos según su estructura. (Losadhesivos.com, 2020)	17
Ilustración 2 Micrografía de Alcalígenes Eutrophus con gránulos de PHA. (Élida Beatriz Hermida, 2004).....	24
Ilustración 3 Códigos de identificación de las resinas de plástico.	25
Ilustración 4 Grado de contaminación por plásticos. (Marcus Eriksen ,Laurent C. M. Lebreton, Henry S. Carson, Martin Thiel, Charles J. Moore, Jose C. Borerro, Francois Galgani, Peter G. Ryan and Julia Reisser, 2014)	27
Ilustración 5 Diagrama de flujo que muestra la clasificación de los bioplásticos según su procedencia.....	29
Ilustración 6 Residuos plásticos generados en la UE en 2015.	39
Ilustración 7 Producto con sello Ecolabel.	40
Ilustración 8 Tasa de reciclaje de residuos de envases de plástico en Europa (%). (Europeo, 2018).....	44
Ilustración 9 Clasificación de los diferentes plásticos en función de su biodegradabilidad y material de origen.	46
Ilustración 10 Clasificación de los polímeros biodegradables atendiendo a su origen. .	48
Ilustración 11 Esquema básico de los factores que intervienen en la degradación de un biopolímero.....	50
Ilustración 12 Cambios en el volumen con la temperatura, los que reflejan transiciones de primer orden en la figura A y de segundo orden en la figura B. (Bustamante, 2012)....	52
Ilustración 13 Resistencia a la tracción de diferentes polímeros con la temperatura. (Bustamante, 2012).....	54
Ilustración 14 Degradación térmica PVA. (Julián Esteban Barrera, John Alexander Rodríguez, Jairo Ernesto Perilla y Néstor Ariel Algecira., 2007)	54
Ilustración 15 Termodescomposición del poliestireno. (Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez, 2006).....	55
Ilustración 16 Reacción de termodescomposición del polimetacrilato de metilo (PMMA) al azar y por despropagación. (Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez, 2006).....	56
Ilustración 17 Degradación oxidativa.....	58
Ilustración 18 Degradación termooxidativa del poliéster. (Viteri, 2018).....	58

Ilustración 19 Degradación hidrolítica del PET. (Adaptación de (Alejandro Vásquez, Elbert Contreras, Andrés Felipe Sánchez, John Rober Muñoz, Alejandro Hoyos y Carmina Gartner.).....	59
Ilustración 20 Proceso de biodegradación de residuos oxo-biodegradables.	61
Ilustración 21 Degradación del PET mediante la bacteria Ideonella. (Falcotitlan, 2016)	62
Ilustración 22 Estructura de la amilopectina. (Caicedo, 2011)	62
Ilustración 23 Proceso de degradación del PLA. (Viteri, 2018).....	63
Ilustración 24 Estructura de alginato y mecanismo de reacción. (Díaz, 2017)	64
Ilustración 25 Colágeno- formación de triple hélice. (Jordi López, Sandra Kalil y Rosana Amaral Schiaffino., 2010)	65
Ilustración 26 Estructura química del almidón. (EcuRed, 2020)	66
Ilustración 27 Aplicaciones de polímeros biodegradables dentro del campo del envasado.	67
Ilustración 28 Estructura química del ácido poliláctico. (Textos científicos, 2020)	68
Ilustración 29 Estructura química del PHA. (Ana Carolina Lemos Delgado y Alexis Mina Cordoba., 2015).....	69
Ilustración 30 Estructura química del quitosano. (Zulay Mármol, Gisela Páez, Marisela Rincón, Karelen Araujo, Cateryna Aiello, Cintia Chandler y Edixon Gutiérrez, 2011)	69
Ilustración 31 Estructura química del PGA. (CymitQuimica.com, s.f.).....	70
Ilustración 32 Estructura del PLGA. (Nanovexbiotech, 2014)	71
Ilustración 33 Estructura química del PCL. (Anexo C: Polímeros biodegradables con aplicaciones en suturas quirúrgicas, 2019)	72
Ilustración 34 Estructura química del PCPP-SA . (Alba, 2016).....	72
Ilustración 35 Esquema básico del proceso de compostaje.	74
Ilustración 36 Porcentaje de superficie con riesgo de desertización en España. (Instituto Geográfico Nacional., 2020)	75
Ilustración 37 Clasificación de los polímeros compostables. (Adaptación de (Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics, 2012)	76
Ilustración 38 Etapas del proceso de compostaje.	76
Ilustración 39 Evolución del pH en el proceso de compostaje. (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008)	80

Ilustración 40 Evolución característica de la relación C/N durante el proceso de compostaje. (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.)	83
Ilustración 41 Esquema del balance de materia del proceso de compostaje.	85
Ilustración 42 Sistemas de compostaje.	91
Ilustración 43 Sistema de compostaje en pila volteada. (Tortosa, 2015)	92
Ilustración 44 Sistema de compostaje en túnel. (Tortosa, 2015).....	94
Ilustración 45 Esquema representativo de la normativa estatal.....	99
Ilustración 46 Esquema representativo de la normativa europea.	101
Ilustración 47 Etiquetas de certificación. (Enestadocrudo, 2020).....	104
Ilustración 48 Proceso de certificación de un producto compostable.	105
Ilustración 49 Etiqueta OK Compost. (Enestadocrudo, 2020)	106
Ilustración 50 Etiquetas de los distintos grados de compostabilidad de un material según OK Biobased. (Guillebon, 2011).....	107
Ilustración 51 Ácido láctico con sus isómeros D (-) y L (+). (Textos científicos, 2020)	108
Ilustración 52 Estadios de la producción de ácido láctico mediante fermentación bacteriológica. (Tecnología de los plásticos, 2011)	109
Ilustración 53 Principales bacterias termófilas usadas en los procesos de fermentación. (Tecnología de los plásticos, 2011)	109
Ilustración 54 Secuencia de producción de ácido láctico por síntesis química. (Ricardo Heliodoro Gil-Horán, Rosa María Domínguez-Espinosa y Juan Daniel Pacho-Carrillo., 2008).....	110
Ilustración 55 Métodos de síntesis para obtener PLA de alto peso molecular. (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008)	111
Ilustración 56 Estructura química de la lactina. (Wikipedia, 2020)	112
Ilustración 57 Estructura química del hexametilbenceno. (Wikipedia, 2020)	114
Ilustración 58 Mecanismos de degradación térmica del PLA. (Loong-Tak Lim, Rafael Auras y Maria Rubino, 2008).....	116
Ilustración 59 Hidrólisis del PLA. (Gaurav Kale, Sher Paul Singh y Rafael Auras, 2006)	117
Ilustración 60 Degradación biótica y abiótica durante la etapa de compostaje. (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008)	118
Ilustración 61 Esquema del proceso.	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de los plásticos en función de su tamaño. (Datos adquiridos de (Greenpeace, 2016))	26
Tabla 2 Posibles contaminantes y efectos sobre la salud. (Datos adquiridos de (Greenpeace, 2016))	28
Tabla 3 Destino de los residuos de plástico y envases de plástico generados en España en 2016. (Datos adquiridos de (María Jesús Romero y Adrián Ortiz, 2020)).....	43
Tabla 4 Temperaturas de fusión y de transición vítrea de algunos plásticos. (Datos adquiridos de (Bustamante, 2012)).....	53
Tabla 5 Contenido máximo de metales y otras sustancias tóxicas en los materiales plásticos.(Datos adquiridos de (UNE-EN 14995. Plásticos. Evaluación de la compostabilidad. Programa de ensayo y especificaciones., 2007))	102
Tabla 6 Principales organismos certificadores de plásticos biodegradables en Europa.(Datos adquiridos de (OWS, 2020))	104
Tabla 7 Principales organismos certificadores de plásticos compostables en Europa. (Datos adquiridos de (Guillebon, 2011)).....	106

Índice de abreviaturas y acrónimos

PLA: Ácido poliláctico.

PLLA: Ácido poli-L-láctico.

PDLA: Ácido poli-D-láctico.

PCPP-SA: ácido policarboxifenoxipropanosebácico.

H₂S: Ácido sulfhídrico.

FDA: Administración de medicamentos y alimentos.

NASA: Administración Espacial Aeronáutica de Estados Unidos.

H₂O: Agua.

NH₃: Amoníaco.

AEBAM: Asociación Española de Basuras Marinas.

AENOR: Asociación Española de normalización y Certificación.

ABA: Australasian Bioplastics Association.

PCB: Bifenilos policlorados.

BMG: Biodegradable Material Group of China.

BPS: Biodegradable Plastics Society of Japan.

BPI: Biodegradable Products Institute of USA.

BPA: Bisfenol A.

BOE: Boletín oficial del Estado.

COT: carbono orgánico total.

PBAS: Copoliésteres.

CES: Cuerpo Europeo de Solidaridad.

DBP: Dibutilftalato.

DEHP: Di (2-etilhexil) ftalato.

DDT: Dicloro difenil tricloroetano.

CO₂: Dióxido de carbono

FAS: Espacio de aire libre.

PBDE: Éteres difenilos polibromados.

EFSA: European Food Safety Authority.

HCH: Hexaclorociclohexano.

HAP: Hidrocarburos aromáticos policíclicos.

ICEX: Instituto Español de Comercio Exterior.

ISO: International Organization for standardization.

JBPA: Japan Bioplastics Association.

CH₄: Metano.

HTCC: N-2-hidroxi-propil-3- trimetil-cloruro de amonio quitosano.

NP: Nonifenol.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

ONU: Organización de Naciones Unidas.

FAO: Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

ONG: Organización no gubernamental.

PCL: Policaprolactona.

PC: Policarbonato.

PVC: Policloruro de vinilo.

PEA: Poliésteramida.

PS: Poliestireno.

EPS: Poliestireno expandido.

PEAD: Polietileno de alta densidad.

PEBD: Polietileno de baja densidad.

PHA: polihidroxicanoatos.

PHB: Polihidroxibutirato.

PLGA: poli (láctico-co-glicólico).

PP: Polipropileno.

INP: Redes poliméricas interpenetradas.

SST: Sólidos suspendidos totales.

Tf: Temperatura de fusión.

Tg: Temperatura de transición vítrea.

PET/PETE: Tereftalato de polietileno.

UNE: Una Norma Española.

UE: Unión europea.

UNEP: United Nations Environment Program.

Glosario

- ❖ **Economía circular:** hace referencia al concepto que relaciona la economía con la sostenibilidad. El objetivo fundamental de la misma es que el valor de recursos (agua, energía...), los materiales y los productos permanezcan en la economía durante el mayor tiempo posible, al mismo tiempo que se disminuya la cantidad de residuos generada. Se trata de establecer una nueva economía, circular, no lineal (forma de actuar hasta ahora), centrada en el fundamento de “cerrar el ciclo de vida de los productos, los residuos, los servicios, el agua, los materiales y la energía”. La economía circular abarca los conceptos de reciclar, reutilizar, rediseñar, entre otras muchas (Economiacircular, 2020).
- ❖ **Reutilización:** representa la acción de dar una segunda vida a un producto que dejó de funcional o que se quedó obsoleto, como un televisor, un frigorífico, etc, es decir, consiste en extraer los diferentes componentes de un producto y para posteriormente colocarlo en otro como repuesto (Scrap y Rezagos S.R.L, 2020).
- ❖ **Reparación:** acto de arreglar un objeto deteriorado con el objetivo principal de darle un segundo uso (Thefreedictionary, 2020).
- ❖ **Reciclado:** Técnica mediante la cual los productos plásticos son transformados mediante los diferentes procesos físicos y/o químicos existentes en la actualidad. Hay dos tipos de reciclado diferentes: puede ser químico o mecánico (físico) (Scrap y Rezagos S.R.L, 2020).
- ❖ **Unión europea (UE):** es una entidad geopolítica que representa la mayor parte del continente europeo. Dicha entidad se caracteriza por ser una asociación económica y política única en el mundo, constituida por 28 países con sede en Bruselas (europea, 2020).
- ❖ **ONU:** Es una organización internacional formada por 193 países (ONU, 2020). La ONU puede establecer medidas sobre los problemas a los que enfrenta la humanidad actual. Esta organización sostiene tres propósitos principalmente:
 - i. Mantener la paz y la seguridad entre los diferentes países miembros.
 - ii. Promover la colaboración entre países para solucionar los problemas que puedan ocurrir.
 - iii. Impulsar el cumplimiento de los derechos humanos.
- ❖ **Contaminación accidental:** Cuando se provoca un daño personal o material a los bienes y propiedades de una persona física o jurídica. Esto lo cubre el seguro

de responsabilidad civil con la garantía complementaria de contaminación accidental (Howden, 2020).

1. INTRODUCCIÓN

El término plástico proviene de la palabra griega <<plastikos>> (que se puede moldear), el cual representa una amplia gama de productos sintéticos o semisintéticos que se utilizan en numerosas aplicaciones en la actualidad. Estos productos surgieron con el objetivo principal de mejorar la calidad de vida del ser humano, ya que los plásticos se pueden encontrar en infinitud de productos, desde envases, ropa, coches, móviles, hasta edificios, convirtiéndolo en un material imprescindible a día de hoy, ya que miremos donde miremos vemos plástico.

Los plásticos son materiales de estructura molecular y características fisicoquímicas similares, cuyas propiedades principales son la elasticidad y flexibilidad durante un alto rango de temperaturas, permitiendo así su moldeo y adaptación en las diferentes formas que se quiera dar. Por tanto, los plásticos se pueden definir como materiales sintéticos o semisintéticos derivados de celulosa, carbón, gas natural y como material principal y más usado el petróleo, obtenidos mediante procesos de polimerización, es decir, de multiplicación seminatural de largas cadenas de átomos de carbono, dando así origen a una sustancia orgánica maleable en caliente y resistente en frío (Raffino., 2020).

Según sus características, existen tres familias de plásticos:

- ❖ Termoplásticos: Se definen como plásticos que se pueden reciclar fácilmente, debido a que estos se funden cuando se calientan, permitiendo así que se puedan moldear repetidas veces sin que sus propiedades originales se vean muy afectadas. Los termoplásticos más conocidos son: PEBD, PP, PEAD, PS, PVC, EPS y PC (Cairplas, 2018), a partir de los mismos se fabrican productos plásticos de uso común como bolsas, tuberías, juguetes, envases, entre otros muchos.
- ❖ Termoestables: Se definen como aquellos polímeros que modifican sus propiedades originales de manera irreversible cuando son atacados por el calor, por la luz o por agentes físico-químicos, pasando de ser un material líquido y soluble a ser un material viscoso e insoluble, como consecuencia de la creación de un retículo tridimensional covalente. Durante el proceso de entrecruzamiento o de curado, las cadenas poliméricas reaccionan entre sí al mismo tiempo que lo hacen con un agente entrecruzador, constituyendo macromoléculas orientadas en todas las direcciones y con gran cantidad de enlaces covalentes entre las mismas.

La reacción de curado es decisiva en la utilización del producto termoestable. El curado de un material termoestable es bastante complejo y se desarrolla en varias etapas. Primero se produce el desarrollo lineal de las cadenas, luego ocurre la formación de las ramificaciones y por último tiene lugar el proceso de entrecruzamiento. Conforme transcurre este proceso el peso molecular se incrementa provocando la unión de varias cadenas dando lugar a un retículo de peso molecular infinito. El retículo tridimensional desarrollado concede al producto curado unas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química muy altas. Además, cabe decir, que este tipo de plásticos tiene un reciclaje muy complicado debido a que, al estar constituidos por polímeros con cadenas ligadas químicamente, al fundirlos para formar nuevos compuestos sea necesario destruir su estructura molecular, lo que conlleva a una gran alteración de sus propiedades originales. Existen diferentes tipos de termoestables como, por ejemplo: resinas ureicas, resinas fenólicas, etc. (Cairplas, 2018).

- ❖ **Elastómeros:** En este tipo de plásticos se produce una situación intermedia a los dos anteriores. Las diferentes cadenas que forman el polímero están unidas entre sí por pocos puntos, y además las cadenas están plegadas. Así, cuando un elastómero es sometido a un esfuerzo de tensión vuelve a su estado original cuando se le deja de aplicar dicho esfuerzo (López, 2007).

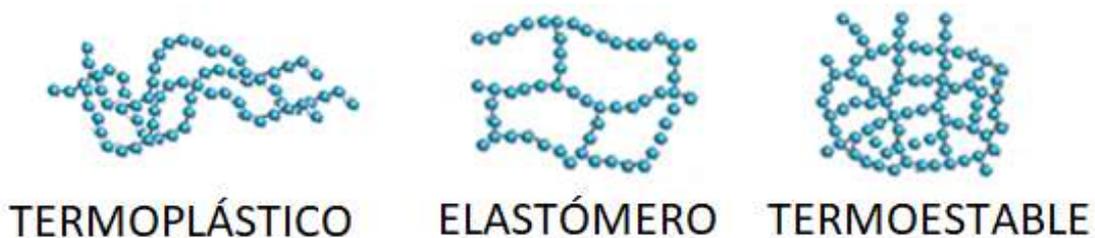


Ilustración 1 Clasificación de los plásticos según su estructura. (Losadhesivos.com, 2020)

Una vez definido lo que es un plástico y su clasificación es necesario describir cómo surgieron los mismos para poder entender bien su trayectoria a lo largo de la historia.

1.1 Antecedentes históricos

La naturaleza era, en la antigüedad, el único medio mediante el cual el ser humano podía crear diferentes herramientas y utensilios de uso diario. Las materias primas más usadas inicialmente eran la madera, la piedra y el metal. Sin embargo, estos materiales no cumplían todos los requisitos que el hombre necesitaba, de ahí, con el objetivo de mejorar su calidad de vida y de intentar progresar continuamente empezaron a agregar a los mismos elementos que solventasen estas necesidades. Los materiales más usados al principio fueron los polímeros naturales, tales como el ámbar, el asta natural, la goma de laca y la gutapercha. (García, 2009)

El ámbar, lo podemos encontrar en la naturaleza en forma de resina de coníferas (Ilustración 1). Se data, que allá por el año 2000 a.C, los faraones del antiguo Egipto ya usaban estas resinas, para, entre otras cosas, embalsar a sus muertos. Los egipcios también usaban la asta natural para fabricar figuras y recipientes, calentándola previamente, consiguiendo así un material moldeable y fácil de trabajar. El asta natural fue utilizada en Europa durante el medievo, teniendo diversos usos y aplicaciones, donde los asteros (trabajadores del cuerno) lograban herramientas de uso diario con este material, como podían ser peines, cucharas, etc. En cuanto a la goma de laca, es definida como un polímero natural obtenido por las secreciones de la hembra de un chinche conocida como “lac”, con origen en la India y en el sudeste de Asia (Decoora, 2020). Esta secreción se diluye en alcohol y una vez haya sido endurecida, se puede fijar en superficies, consiguiendo así un recubrimiento impermeable, reluciente y casi transparente. La gutapercha, no menos importante que los anteriores materiales, es una goma de origen vegetal muy similar al caucho, obtenida a través del sangrado en determinados árboles de Indonesia y las Indias Orientales después de realizarles varias incisiones. Era usada por los indígenas para recubrir recipientes y objetos.

Durante el siglo XIX, se descubrieron diferentes materiales como el caucho, ebonita, el celuloide y la galatita, cuyos elementos se consideran antecesores de los diferentes plásticos utilizados en la actualidad.

En el año 1820, *Thomas Hancock*, descubrió el caucho, al lograr una masa plástica tras triturar y mezclar goma cruda. La desventaja principal de este material es que sus propiedades naturales no le permitían conseguir una forma concreta, ya que, tras la extracción del molde, este se deformaba y se aplastaba sobre sí mismo, debido al efecto

de la gravedad, gracias a que el aire no lo solidificaba y por ende se convertía en un material no útil. En 1839, *Charles Goodyear*, logra solucionar el problema de *Hancock* tras conseguir transformar de manera accidental el caucho crudo en un elemento resistente y elástico al vulcanizarlo con azufre. Así surgió el nuevo material con el que se fabricarían los neumáticos en las diferentes industrias automovilísticas.

En 1851, Pedro Pablo Gallardo, desarrolla otro nuevo polímero que empieza a comercializarse industrialmente. A este nuevo material le llamó *Ebonita*, la cual se forma a base de caucho endurecido tras agregarle hasta un 50% de azufre.

En 1855 tuvo lugar otro acontecimiento muy importante, *Alexander Parker* descubrió que la celulosa, las fibras vegetales de la madera y el algodón mezcladas con ácido nítrico y un agente solvente o disolvente se endurecían y al calentarse formaban un material ligero, fuerte y moldeable. A este material lo llamó *Parquesita*. Este autor ansiaba producir *Parquesita* a gran escala, pero no halló un solvente suficientemente económico para producirlo.

Así, en 1870, *John Wesley Hyatt*, impresor e inventor americano, relevó a *Parker*, hallando el ansiado solvente buscado por el mismo, cuyo compuesto uniría la celulosa con el ácido nítrico. Debido a que la celulosa era el componente fundamental, llamó *Celuloide* a este nuevo material. Este autor, además, fue quien estableció las bases en que se asentaría la nueva industria del plástico, para ello, diseño y construyó la maquinaria necesaria para manufacturar y moldear el plástico. Así, el *Celuloide* acabaría convertido en más de veinticinco mil objetos distintos. Los productos fabricados con celuloide más importantes fueron la dentadura postiza, los cuellos y puños de camisas postizos y el corsé. Este material fue evolucionando hasta el punto de que se usó en la industria cinematográfica, llegándose a producir más de 36.000 millones de kilos de película cada año. Sin embargo, este material dejó de usarse debido a que está compuesto en gran parte por ácido nítrico, un material altamente inflamable.

Por último, en 1895, *Emil Bertiner* logra diseñar lo que conocemos como *Galatita*, cuya etimología proviene de las palabras griegas gala (leche) y litos (piedra). Este material es un producto que deriva de la caseína tratada con formol.

1.2 Origen del primer plástico sintético

Leo Baekeland, químico e inventor estadounidense, en 1907, estudio la reacción fenol-formaldehído, tras la mezcla de fenol (ácido fénico) y gas formaldehído en

presencia de un catalizador. En esta reacción observó que al calentarla tomaba la forma del recipiente donde se hallaba. Sin embargo, este material al calentarlo emitía un gas que hacía que se solidificara en una masa espumosa que se desmigajaba fácilmente. Sin embargo, en 1909 se creó una maquinaria que permitía solucionar este problema. Dicha maquinaria permitía calentar los productos a altas temperaturas y presionar los mismos expulsando este gas, creando un material suave, liso y duro. A este nuevo compuesto se le llamo *Bakelita*. Este material ha representado un paso muy importante en la historia del plástico, ya que, a diferencia de otros materiales creados anteriormente, la bakelita era fruto de tubo de ensayo y no tenía analogía en la naturaleza. Además, este nuevo compuesto dio origen a una nueva extensa categoría de plásticos, los termoplásticos, materiales duros, resistentes, ininflamables, y prácticamente irrompibles, pudiendo conservar su forma de manera infinita una vez moldeados. La *Bakelita* permitió fabricar teléfonos, cámaras, relojes, radios, joyas, etc. Este polímero tras la primera guerra mundial fue considerado por los diferentes diseñadores como material de su era, no porque imitará de forma efectiva a los materiales tradicionales sino porque fue creada de forma artificial.

Como consecuencia del desarrollo de nuevos plásticos, los plásticos naturales pasaron a tener poco o nulo uso, y empezó el crecimiento en masa hacia la industrialización y comercialización de varios polímeros como el acetato o las resinas urea-formaldehído. Justo en este momento se consiguió crear algo único e impensable hasta la fecha, objetos transparentes.

En 1915 tuvo lugar un acontecimiento muy importante, al descubrirse la formación de polímeros de encadenamiento molecular de dos o más monómeros de naturaleza diferente. A este proceso se le designó como copolimerización.

En 1928, *Carothers*, un químico de la empresa DuPont, en busca de un material sustituto de la seda natural, logra crear un nuevo polímero, la poliamida, que comercialmente denominó *Nylon*. Este material se usó principalmente para fabricar cepillos de dientes, medias y para el diseño de la lona y las cuerdas de los paracaídas, este último uso tuvo especial importancia a lo largo de la segunda guerra mundial.

Se consiguieron desarrollar, en 1930, los polímeros que más influencia e importancia iban a tener en nuestro siglo. Los más destacados son el *poli (cloruro de vinilo)*, el *poliestireno*, las *poliolefinas* y el *poli (metacrilato de metilo)*. De 1930 a 1935

se consiguió desarrollar la técnica de los termoplásticos, la cual permitió establecer métodos nuevos de trabajo para estos recientes materiales. A su vez, en esta década la utilización del poliéster se basa en su aplicación como pinturas y barnices. También se logran desarrollar lo que en un futuro será un nuevo compuesto, más conocido como *plástico reforzado*, desarrollado a partir de las resinas de poliéster.

En 1936, se introdujo al mercado el *poli (metacrilato de metilo)*, cuyo producto es un vidrio orgánico, cuyas características principales son la ligereza, la transparencia y la facilidad para su moldeo, adquiriendo así casi cualquier forma que se proponga el fabricante. Este polímero es conocido comercialmente como *Plexiglás*. Durante la segunda guerra mundial este material tuvo gran importancia, ya que fue utilizado para la fabricación de las ventanillas de los aviones. *Carleton Ellis*, un año después tras diversas investigaciones, descubrió que al adicionar monómeros insaturados a poliésteres insaturados se conseguía disminuir considerablemente los procesos y tiempos de reticulación y polimerización. Debido a este descubrimiento a este autor se le considera hoy en día como padre de los poliésteres insaturados.

Las *resinas de contacto* llegaron a emplearse años después, convirtiéndose así en las precursoras del uso de materiales compuestos fabricados a partir de resinas de poliéster.

En 1938, *Roy S. Plunkett* descubrió el *politetraflouretileno*, material que hoy en día se comercializa con el nombre de *Teflón*. Este material tiene diversas propiedades, siendo la más reseñable la capacidad de aguantar el calor, llegando a soportar temperaturas de hasta 300 °C.

1.3 Desarrollo de polímeros

En el año 1939, en pleno desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, el numeroso ejército japonés logró conquistar varios territorios del actual continente asiático, en concreto los ricos territorios de las indias orientales, dejando a los Estados Unidos sin su principal fuente de caucho natural, acontecimiento que obligó a que este país investigara y desarrollara nuevos elastómeros sintéticos, compensando la escasez de estos preciados materiales. De esta forma es cómo surgió el *neopreno*, utilizado en la fabricación de neumáticos para aviones y diferentes y diversos vehículos militares.

En 1940, Alemania ataca Londres, y como consecuencia este país tiene que defenderse. Los ingleses sabían que tenían una fuerza aérea muy débil y anticuada, pero

gracias a que estos crean un nuevo material, *el polietileno*, ganan la batalla a los alemanes. Este nuevo polímero era un aislante eléctrico excepcional, resistente y muy ligero. Hasta la época era la única sustancia que podía aislar los equipos de radar de alto voltaje sin añadir excesivo peso a los aviones. En consecuencia, los pilotos podían llevar radares en los aviones, lo que les daba una ventaja vital de noche y con niebla.

En adición a estos acontecimientos, a lo largo de este periodo aumentó enormemente el uso de plásticos reforzados, fabricados a base de poliésteres insaturados y fibra de vidrio.

La guerra fue motivo de auge en la industria del plástico, como consecuencia de esta, se siguió investigando e innovando, dando lugar al desarrollo de nuevos polímeros como *el polipropileno* y *los poliuretanos*, obtenidos por la empresa alemana *Bayer*.

Tras la finalización de la guerra, en el año 1945, las industrias se propusieron como objetivo primordial, la mejora y evolución de la calidad de estos materiales, promoviendo así, el conocimiento científico y técnico de los plásticos. Debido a esta revolución industrial, en 1942 se crearon sociedades como la SPE (Society of Petroleum Engineers).

A partir del año 1950 despuntan las investigaciones que se centraban en la investigación de nuevos métodos de síntesis de polímeros. Los científicos e ingenieros buscaban potenciar las características y cualidades de los polímeros ya conocidos al mismo tiempo que desarrollaban nuevos, los cuales podían considerarse derivados de los que ya existían. Podemos mencionar, sirva a modo de ejemplo, cuando en 1951, en Alemania, en los laboratorios de *Basf A.G.*, se llevó a cabo el descubrimiento de la forma de elaborar espuma rígida tras el calentamiento del poliestireno en el interior de un horno, el cual lleva aplicado un agente de espumación. Cabe destacar, que esta misma empresa, en 1971 consiguió desarrollar *poliestireno expandible*, usado hoy ampliamente en diversas industrias.

Paralelamente, la empresa Dupont desarrolla y empieza a comercializar *las fibras de aramida*, más conocidas comercialmente con el nombre de *Kevlar*. En la década de los 50, *Karl Ziegler* y *Giulio Natta* consiguieron importantes avances, a través de estudios e investigaciones, acerca de catalizadores metalocénicos, por los que en 1963 recibieron un premio Nobel de Química. En 1954, Giulio Natta sintetizó *el polipropileno*.

De los años 60 en adelante, se desarrollaron gran variedad de plásticos, los cuales competían tanto con sus antecesores hasta la fecha disponibles como con los materiales usados desde tiempos muy antiguos como podían ser la madera o el metal. Un ejemplo evidente es el que nos ofrece el plástico reforzado, desarrollado con una matriz resinosa de poliéster y reforzado con fibra de vidrio, el cual llega a competir con el aluminio por su ligereza y rigidez. A principios de los años 70, la innovación y fabricación de los plásticos recibe una inesperada y dura recaída, debiéndose está a la crisis energética causada por los países árabes que decidieron embargar y anular el suministro de petróleo a los diferentes países que se posicionaron a favor de Israel en la Guerra de *Yom Kippur* (EE. UU y Países Bajos), lo que causo la desestabilización total de la economía a nivel mundial y, por ende, la subida del precio de las materias primas, especialmente el de los plásticos.

Desde la década de los años 70 en adelante, se llevan a cabo diversos descubrimientos científicos y tecnológicos. Las empresas encargadas de producir polímeros en EE. UU como *la Dupont, Hitachi, Down Chemical, Unión Carbide New Kadel, Allied Chemical, Allied Corp, la Mitsubishi Chemical, La NASA, los laboratorios de las fuerzas aéreas* entre otras muchas impulsaron la innovación e investigación acerca de nuevos polímeros tras la mezcla o aleación de algunos inmiscibles entre sí. Complementando dichos descubrimientos y con igual importancia, se mejoran continuamente las herramientas, maquinarias, los procesos y los medios productivos, se consiguen avances en relación con los plásticos reforzados y materiales reforzados (“composites”), se desarrollan una amplia variedad de nuevos tipos de aditivos para su aplicación en los diferentes polímeros y los recién fabricados ostentan propiedades y características mejores en comparación a los anteriores, tales como la resistencia ante la exposición a temperaturas muy elevadas, resistencia al daño por uso, una mayor resistencia mecánica, al igual que una resistencia a agentes químicos y a la corrosión. Las *resinas de poliamida* pueden ser un claro ejemplo, creadas por la empresa Dupont, científicamente conocidas como *AVAMID-K* y *AVAMID-N*, son poseedoras de unas extraordinarias matrices termoplásticas con altas resistencias mecánicas a temperaturas muy elevadas.

A lo largo de los años 80, el ámbito científico de los plásticos va a profundizar y basar sus estudios en áreas más internas como, por ejemplo, la investigación sobre la modificación superficial de los nuevos polímeros descubiertos para favorecer la

compatibilidad biológica con el cuerpo humano, de esta forma se originan los biopolímeros. Estos son materiales generados mediante procesos de fermentación bacteriana, como es el caso del *polihidroxibutirato (PHB)*, cuyo compuesto es obtenido gracias a la fermentación bacteriana del “*Alcaligenes eutrophus*” (Ilustración 2). En adición, se crean polímeros conductores, polímeros termocromáticos, se estudian polímeros piezoeléctricos, polímeros cristalinos líquidos y materiales reforzados trenzados. Más adelante, entrarían en el mercado los elastómeros híbridos creados a partir de gomas naturales y sintéticas o por polímeros sintetizados cuyo objetivo era potenciar y maximizar sus propiedades sintéticas. Siguiendo la línea de investigación e innovación, los polímeros nuevos se mezclarían con diversos materiales de diferente naturaleza, propiedades y características como podían ser los cementos plásticos, creados a partir de cementos tradicionales mezclados con bajas dosis de agua y de polímero.



Ilustración 2 Micrografía de Alcaligenes Eutrophus con gránulos de PHA. (Élida Beatriz Hermida, 2004)

Actualmente, los plásticos forman parte indispensable de nuestro estilo de vida, ya que estos materiales contribuyen a hacer más fácil nuestro día a día. La amplia gama de plásticos de la que disponemos actualmente en el mercado es casi infinita, lo que dio lugar a que, en 1988, el *Bottle Institute de la Society of the Plastics Industry* estableciera un mecanismo de códigos para identificar de manera rápida y fiable los diferentes productos plásticos. Estos códigos tienen un número en el interior de un símbolo con forma de triángulo y una abreviatura en la parte inferior, como se muestra en la siguiente ilustración.

Códigos de identificación de resinas de plástico



Ilustración 3 Códigos de identificación de las resinas de plástico.

De las diferentes resinas plásticas deben usarse las catalogadas con los códigos 2 (polietileno de alta densidad), 4 (polietileno de baja densidad), la 5 (polipropileno) y 1 (polietileno tereftalato). Sin embargo, los productos marcados con el código 1, no deben ser usados repetidas veces, ya que podría desprender DEHP, un ftalato tóxico. Por otro lado, se deben evitar las resinas catalogadas con los códigos 3 (puede contener ftalatos y bisfenol A), 6 (espuma de poliestireno) y 7 (puede contener Bisfenol A), debido a los compuestos que las constituyen.

1.4 Problemática del plástico en el medio ambiente

La producción de plásticos a nivel mundial se ha incrementado en los últimos 50 años de manera masiva. En 2015 se produjeron 381 millones de toneladas de plástico, en comparación a los 299 millones de toneladas producidas en 2013. (Greenpeace, 2016). Hoy en día, la enorme cantidad de plásticos de infinitud de tamaños que existe en el medio marino es especialmente alarmante debido a su persistencia en el medio ambiente y su facilidad de dispersarse, ya que el principal problema ambiental que tienen los plásticos es su resistencia a la descomposición. La razón por la cual los plásticos tardan un periodo de tiempo muy largo en descomponerse es la fuerza que presentan sus enlaces químicos. Estos mantienen unidas sus moléculas, frenando la degradación por los diferentes microorganismos en el medio. El tiempo promedio que tarda un plástico en descomponerse está entorno a los 100 y 600 años, en función del ambiente al que se exponga (Samaniego, 2019).

En la actualidad, se ignora la cantidad exacta de plásticos en los mares, pero se estima según el departamento científico de Greenpeace que alrededor de 5,25 billones de trozos de plástico acaban en los mares, lo que representa un valor de 268.940 toneladas de plásticos flotando sobre los mares, sin tener en cuenta la cantidad de plásticos ya existentes en los fondos marinos. A nivel europeo, numerosos estudios muestran como

parte de los residuos europeos desembocan en zonas clasificadas como especialmente vulnerables como son el Mar Mediterráneo y partes del Océano Ártico. Además, catalogan al mar Mediterráneo como una de las zonas de mayor acumulación de plásticos en los océanos (Europea, 2018). Esto afecta tanto a nivel medio ambiental como a nivel económico, ya que la acumulación de basura marina provoca daños en el turismo, en la pesca y en el transporte marítimo. Como consecuencia de este problema, se ha establecido una clasificación de dichos plásticos en función de su tamaño como se muestra en la ilustración siguiente tabla:

Tabla 1 Clasificación de los plásticos en función de su tamaño. (Datos adquiridos de (Greenpeace, 2016))

Tipo de plástico	Diámetro o longitud
Macroplástico	>25 mm
Mesoplástico	5-25 mm
Microplástico	<5 mm
Nanoplásticos	1 μm

Por otro lado, numerosos estudios exponen los efectos que tienen los fragmentos de plásticos sobre las aves, los peces y los mamíferos, como por ejemplo el estudio publicado por la ONU, donde Esther Garrido, una profesional de inocuidad alimentaria del Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO muestra cómo al analizar numerosos organismos acuáticos en el laboratorio se ve que contienen altas concentraciones de microplásticos en su organismo (ONU, 2019).

Por ello, el foco más importante está en los microplásticos. Este tipo de plásticos posee menos de 5 mm de diámetro y tiene forma filamentosa, esférica o de fragmento (Greenpeace, 2016). Los microplásticos pueden clasificarse como primarios o secundarios, donde los primarios se producen en ese tamaño, como, por ejemplo, los pellets, mientras que los secundarios son macroplásticos que se han degradado por su exposición a las olas, el viento o la luz ultravioleta.

La importancia que los microplásticos está teniendo actualmente se debe a que se ha comprobado que estos afectan a la vida marina e indirectamente a la salud humana, ya que los animales marinos se pueden enredar, asfixiar, estrangular o provocar una bioacumulación de estos en su organismo, lo que conlleva a que cuando el ser humano

ingiera ese animal pueda ser un producto tóxico para el mismo ya que estos microplásticos pueden liberar contaminantes. Se estima que cada año en la UE se expulsan entre 75.000 y 300.000 toneladas de microplásticos en el medio ambiente (Jiménez, 2018). En la siguiente ilustración se muestra el grado de contaminación por plásticos en el mundo, donde se puede comprobar la elevada cantidad microplásticos existente en la actualidad.

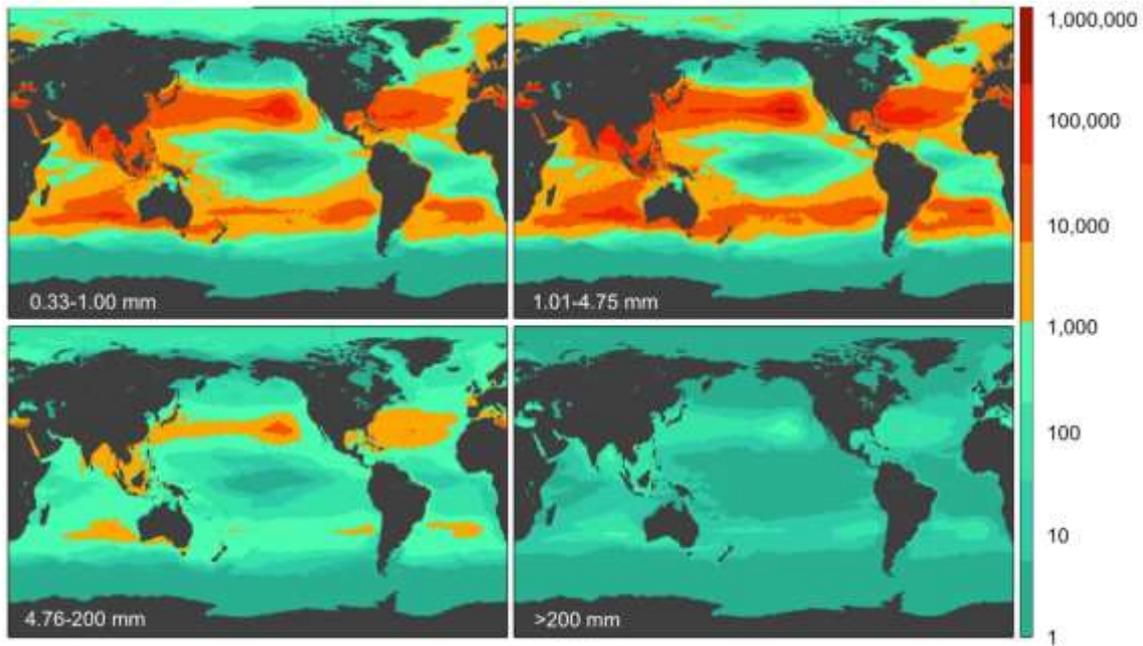


Ilustración 4 Grado de contaminación por plásticos. (Marcus Eriksen ,Laurent C. M. Lebreton, Henry S. Carson, Martin Thiel, Charles J. Moore, Jose C. Borerro, Francois Galgani, Peter G. Ryan and Julia Reisser, 2014)

Según un estudio realizado por Greenpeace señala que al menos 170 especies de animales marinos ingieren microplásticos. Sin embargo, el campo de los microplásticos es relativamente nuevo, y todavía se están realizando análisis e investigando métodos para aislar, identificar y documentar la contaminación por dichos compuestos, ya que es muy difícil llevar a cabo estudios para monitorizar el número de microplásticos en el intestino de un pescado o marisco. Por lo que de momento los estudios que se han realizado hasta ahora se están centrando en la presencia de dichos polímeros en los distintos organismos. En la siguiente tabla se muestran diferentes sustancias químicas que contienen algunos tipos de plásticos y sus posibles efectos sobre la salud.

Tabla 2 Posibles contaminantes y efectos sobre la salud. (Datos adquiridos de (Greenpeace, 2016))

	Sustancia química	Función	Posibles efectos
Monómero	BPA	Para la elaboración de resina epoxi y policarbonato.	Posible disruptor endocrino. Además, puede afectar al desarrollo de los fetos.
Aditivos	DEHP, DBP y DEP	Se utilizan como disolventes y afianzadores de los perfumes en productos cosméticos	Diversos ftalatos son tóxicos para la reproducción y pueden afectar al hígado si se ingiere en una cantidad elevada de los mismos.
	NP	Actúa como plastificante, antioxidante, y estabilizador de plásticos.	Es tóxico para los animales marinos, ya que se comporta como disruptor endocrino en los peces. Además, afecta a la reproducción y desarrollo de otros animales y del hombre.
	PBDE	Pirorretardante que se usa en algunos plásticos, textiles y espumas.	Puede actuar como disruptor endocrino y además puede tener graves efectos sobre la salud como consecuencia de su influencia en el desarrollo neurológico, la conducta, el sistema inmunológico y el hígado en humanos.
Contaminantes	PCB	Hace años se usaba como pirorretardante y plastificante en ciertos plásticos, así como aislante de fluidos en los transformadores.	Es tóxico para gran cantidad animales ya que afecta a su sistema inmune, a su reproducción y desarrollo de su sistema nervioso. Además, puede afectar al hígado e inducir ciertos tipos de cáncer.
	HAP	Se producen como consecuencia de la quema incompleta de los combustibles fósiles.	Son duraderos y bioacumulativos. Estos compuestos son ellos son cancerígenos, mutágenos y tóxicos para la reproducción.
	HCH y DDT	El HCH se usaba como insecticida en la agricultura. El DDT se usa para el control de la malaria.	El HCH es tóxico para el hígado y riñón. El DDT es muy tóxico para la fauna marina, ya que afecta a su reproducción.

Sin embargo, en la actualidad se necesita más investigación para mejorar la comprensión sobre las fuentes y los impactos de los microplásticos, incluidos sus efectos sobre la salud y el medio ambiente, para establecer soluciones innovadoras que impidan su dispersión. Además, es imprescindible adquirir conciencia de que cuanto más plástico se desecha mayor cantidad de basura se acumula en el mundo. La responsabilidad de crear un entorno más sostenible en nuestro planeta debe ser compartida entre las empresas y los ciudadanos para garantizar el buen estado de nuestro ecosistema a corto y largo plazo y así poder posibilitar la vida de las generaciones futuras.

1.5 Evolución de los plásticos a lo largo de la historia

El impacto negativo derivado de su desecho se ha convertido en un problema a nivel mundial. Frente a este problema en numerosos países se establecen una serie de normativas para regular la producción y consumo de materiales plásticos a base de petróleo, como la regulación de bolsas de plástico, medidas de reciclaje en relación a plásticos de un solo uso o la prohibición de microplásticos en diversos productos como los cosméticos. Aun así, el problema es muy grave y no tiene una solución sencilla y directa, ya que para poder hacer frente a este problema se necesita tiempo y dinero. Por ello, en los últimos años surgieron una serie de polímeros producidos a partir de desechos orgánicos, conocidos como bioplásticos, los cuales se pueden definir como un tipo de plástico derivado de productos vegetales, tales como el aceite de soja, el maíz o fécula de patata.

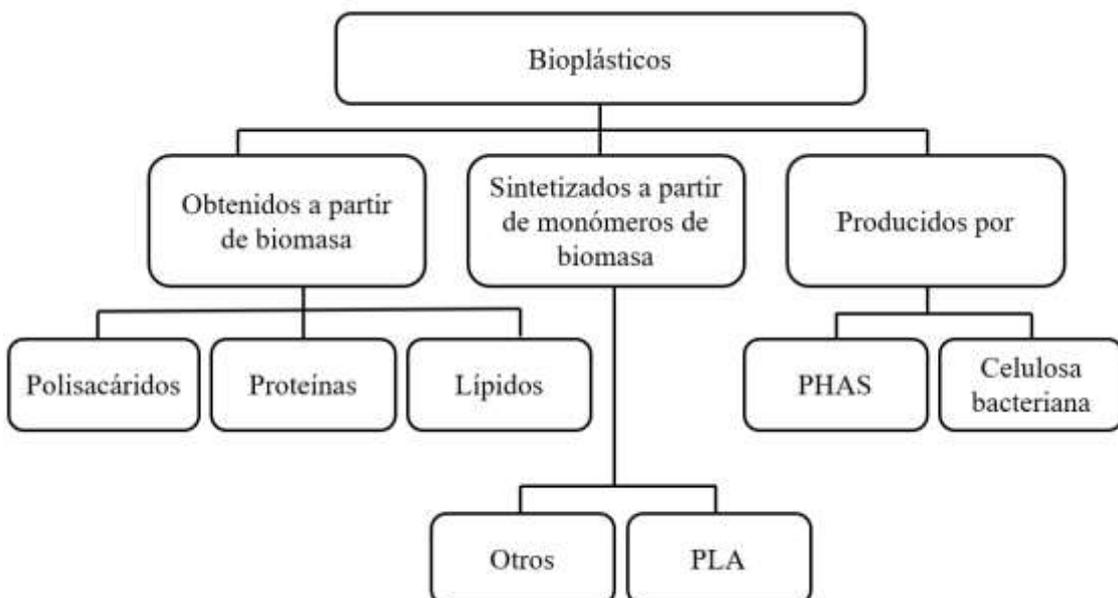


Ilustración 5 Diagrama de flujo que muestra la clasificación de los bioplásticos según su procedencia.

En este punto es necesario, incluir una serie de conceptos que se van a usar a lo largo del desarrollo del presente TFM, como son el concepto de producto biodegradable y compostable.

Un producto es biodegradable si después de su uso, se descompone naturalmente mediante los diferentes organismos que conviven en el medio donde se localice el plástico sin necesidad de agregar productos químicos en dióxido de carbono, metano, agua y biomasa (Juliana Meneses, Catalina María Corrales y Marco Valencia, 2007). El periodo de biodegradación varía en función de la cantidad de oxígeno, la temperatura, el pH y el grado de humedad. Los productos biodegradables normalmente se degradan en un periodo de tiempo de meses y son de origen vegetal (Greenpack, 2017).

Por último, se encuentran los productos compostables, normalmente el término compostable y biodegradable se asocia a un solo significado, sin embargo, no hacen referencia a lo mismo. Un producto biodegradable puede descomponerse mediante microorganismos, pero no tiene por qué obtenerse de esto un abono de alta calidad. Por tanto, un producto biodegradable no tiene que ser necesariamente compostable, pero un producto compostable es necesariamente biodegradable.

Así, el compostaje es un proceso biológico aerobio natural que permite la conversión y la valorización de materias orgánicas en productos ricos en compuestos húmicos (COPLASEM, 2020). Del proceso de compostaje se obtiene un abono de calidad que puede ser utilizado de manera directa en agricultura. Este proceso ha permitido evitar incineraciones contaminantes costosas y poder aumentar la cadena de valor de estos productos mediante su reciclaje.

Hoy en día se están fomentando cada vez más el uso de plásticos biodegradables, los cuales brindan nuevas oportunidades, pero también nuevos riesgos. La falta de un etiquetado claro para los consumidores, así como de una adecuada recogida y tratamiento de residuos, podrían empeorar el problema de la presencia de plástico en el medio ambiente y generar problemas en el proceso de reciclado. Por otra parte, los plásticos biodegradables pueden, tener un papel fundamental en determinadas aplicaciones y la innovación en este ámbito debe de ser profunda y exitosa, como se desarrollará más detalladamente en el apartado siguiente.

1.6 Estrategia europea del plástico dentro de la economía

A finales del año 2015, la Comisión Europea estableció un plan de acción, en el cual se destacaba a los plásticos como un asunto primordial y se comprometía a disponer una estrategia en la cual se establecieran nuevas medidas en las que se tomase el plástico a lo largo de toda su cadena de valor. En 2017, la Comisión ratificó que se centraría en la elaboración y empleo de plásticos, y que trabajarían para alcanzar en el año 2030 que todos los envases de plástico sean reciclables.

Esta estrategia fija los fundamentos para establecer una nueva economía del plástico en la que el diseño y la producción de productos de plástico tengan muy en cuenta los conceptos de reutilización, reparación y reciclado, así como el diseño y desarrollo de productos más sostenibles. Así, se conseguirá un mayor valor añadido y se impulsará la innovación, disminuyendo la contaminación, a través de la reducción de residuos en los vertederos, menores emisiones de CO₂, ahorro en agua y energía y creación de empleo verde.

Además, la estrategia expone compromisos para el establecimiento de medidas a escala de la Unión Europea (UE). No obstante, todos estos compromisos deben aplicarse tanto a nivel nacional como internacional para promover el cambio a escala mundial. Por ello Europa debe de ser clara y contundente con las medidas que toma para poder servir de ejemplo al resto del mundo.

❖ Desafíos de los plásticos a día de hoy

En la actualidad, aunque la producción de plástico en Europa se ha estabilizado en los últimos años, la producción de plásticos a nivel mundial está aumentando, como consecuencia del incremento de la producción en otras partes del mundo.

En la Unión Europea (UE), el reciclado de plástico ha aumentado desde los años ochenta, sin embargo, los valores de reciclado y la reutilización siguen siendo muy bajos, en comparación con otros materiales como el vidrio, el papel o el metal.

Cada año se producen en Europa alrededor de 25,8 millones de toneladas de residuos de plástico, de los cuales se recogen menos del 30% para su reciclado (Europea C. , Una estrategia europea para el plástico en una economía circular , 2018). De esta cantidad, gran parte se traslada fuera de la Unión Europea (UE) para ser tratada en otros

países (principalmente China), en los que normalmente se emplean diferentes normas medioambientales menos estrictas que las que se aplican en la UE.

Por otro lado, la demanda de plástico reciclado en Europa solo hace referencia al 6% de la demanda total (Una estrategia europea para el plástico en una economía circular., 2018). Actualmente, debido al bajo precio de los productos producidos con materias primas vírgenes y la inquietud acerca de la comercialización de los productos reciclados, hace que las inversiones en procesos de reciclado de plástico se hayan inmovilizado por la baja visión de rentabilidad del sector.

Se calcula que la fabricación de plástico junto con la incineración de residuos plásticos expulsa a la atmosfera alrededor de 400 millones de toneladas de CO₂ al año en todo el mundo. En los últimos años, con el incremento de la producción de plástico reciclado se ha contribuido a disminuir la dependencia que se tiene a los plásticos procedentes de combustibles fósiles, al mismo tiempo que se ha reducido la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera. Según ciertas estimaciones, el potencial de ahorro anual de energía que podría conseguirse si se reciclase de manera total todos los plásticos producidos a nivel mundial equivaldría a 3500 millones de barriles de petróleo anuales.

Como ya se ha descrito en el apartado anterior se están desarrollando plásticos de origen biológico que ofrecen las mismas características funcionales que el plástico usado tradicionalmente pero que tienen un menor impacto a nivel medioambiental. Sin embargo, hasta el momento solo suponen un porcentaje minoritario en el mercado.

Debido a que las cadenas de valor del plástico son cada vez más transfronterizas, los problemas y oportunidades asociados al plástico deben percibirse como un principio a nivel global y no sólo a nivel nacional o de la UE. Por ello, hoy en día, existe una gran concienciación sobre de la naturaleza de los residuos plásticos, como se puede ver en los programas internacionales en materia de basura marina, como puede ser la Asociación Mundial para la Basura Marina de la ONU y los planes de acción presentados por el G7 y G20 para prevenir y reducir la basura marina.

❖ *De la tradicional economía lineal hacia una economía circular*

Europa y el mundo necesitan una visión estratégica para pasar de la tradicional economía lineal a una economía circular del plástico para los próximos años. Esta estrategia debe fomentar la innovación y transformar en nuevas oportunidades los

desafíos presentes en la actualidad. La UE planteará nuevas medias para poder llevar a cabo esta estrategia, para ello todos los diferentes grupos de la cadena de valor deben cumplir con las exigencias fijadas en la misma.

Sin embargo, en la actualidad existen una serie de limitaciones que hacen que esta forma de actuación no se implante de manera directa a nivel mundial. A continuación, se muestra un pequeño resumen de las barreras existentes a día de hoy.

Barreras culturales.

- i. La utilización de materias primas recicladas no tiene una imagen muy buena en el mercado actual.
- ii. En la actualidad, el desconocimiento e insensibilidad sobre la importancia de los productos reciclados, supone una gran limitación para avanzar hacia una economía más circular.
- iii. La escasa concienciación de los diferentes consumidores acerca de los beneficios que los productos ecológicos pueden ofrecer, no posibilita el cambio en los patrones de consumo y al mismo tiempo ejerce una presión importante desde el lado de la demanda.
- iv. El impacto económico de la economía circular se percibe como bajo.
- v. Existe cierta presión por parte de las partes interesadas hacia un consumo sostenible de recursos, es decir, se agradece la participación total de los integradores de la empresa en los aspectos relacionados con economía circular.
- vi. La resistencia al cambio mantiene los modelos de negocio enclavados en su configuración convencional.

Barreras tecnológicas/know-how.

- i. Deficiencia en programas de formación de economía circular en todos los niveles educativos.
- ii. La falta de conocimiento (Know-how) técnico y tecnológico puede dificultar a la transición de una PYME hacia una economía circular más circular.
- iii. Los productos no están diseñados para cambiar a modelos de negocio circulares: facilidad de desmontaje, reparación, renovación y reingeniería y sus atributos físicos impiden reutilizar productos.
- iv. Falta de piezas de repuesto, herramientas de reparación o guías de reparación.

Barreras de mercado.

- i. Externalidades como los costes ambientales no se contemplan en el precio de los productos.
- ii. Las empresas prefieren comprar materias primas primarias (más baratas) a comprar materias primas recicladas, cuyo coste normalmente es superior. Lo que hace que se incremente el precio del producto final y por ello generalmente es rechazado por los consumidores.
- iii. Las empresas pueden ser reticentes a involucrarse en procesos de economía circular si perciben riesgos en su ventaja competitiva.
- iv. El suministro de materiales reciclados no es suficiente para compensar la demanda de materiales de una preferencia por el material virgen, combinado con la inseguridad hacia la calidad del material reciclado.
- v. La inercia producida en el mercado debido al dominio de las tecnologías existentes y la falta de demanda de productos sostenibles provoca que los modelos de negocio circulares resulten casi inviables.

Barreras legislativas-normativas.

- i. Falta de implantación de la jerarquía de residuos (directiva 2008/98/EC) Directiva marco de residuos.
- ii. La falta de unificación entre departamentos y niveles jerárquicos es una barrera básica hacia la transición a la economía circular.
- iii. Falta de certificación/acreditación de actividades de reutilización.
- iv. La industria de gestión de residuos carece de una dirección de alto nivel en gestión de recursos y en la eficiencia del uso de material.
- v. Bajo apoyo legislativo sobre aspectos relacionados con la reutilización.
- vi. La carga administrativa relativa a prácticas ambientales como control y seguimiento de datos puede ser considerada compleja y difícil de bordar por las PYMES.
- vii. Ausencia de una normativa de calidad para actividades de reparación.

Barreras relacionadas con la cadena de valor/flujo de información.

- i. Algunas PYMES encuentran dificultades a la hora de implantar soluciones ambientales cuando están al final de cadena de suministro, o son parte de cadenas globales de alto impacto ambiental.

- ii. Falta de conocimiento sobre que industrias/ empresas comercializan materiales reciclados de manera fiable.
- iii. La falta de integración entre los actores de la cadena de suministro constituye otra barrera.
- iv. Los productores de piezas y otros equipos no originales pueden tener oportunidades limitadas para adoptar modelos de economía circular debido a su posición en la cadena de valor.
- v. Establecer un sistema único de recogida que reduce la posibilidad de separación en origen.

Barreras económicas.

- i. Los costes de implantación presentan una barrera para las empresas fabricantes, especialmente si se implantan en la cadena de suministro.
- ii. La falta de capital se considera una de las barreras más destacadas en la adaptación a la economía circular de las PYMES.
- iii. Debido a la falta de inversión en tecnologías enfocadas al diseño de productos más circulares circular, provoca que para las PYMES sea muy difícil implantar esta economía circular.
- iv. En algunos casos los materiales reciclados no cubren los costes de procesado, en este caso estos costes extra se trasladan al cliente, lo que supone una barrera para las empresas.

Además, esta nueva estrategia de “economía circular del plástico” se basa en un proceso innovador y sostenible en el diseño y producción que respete todas las necesidades del ser humano y que se cumplan con los tres principios de reutilización, reparación y reciclado. La estrategia establece los siguientes apartados:

- En el año 2030, la capacidad de selección y reciclado tiene que incrementarse de manera masiva. Este hecho impulsará la creación de nuevos puestos de trabajo (empleo verde).
- Los diferentes productos plásticos deberán ser más duraderos.
- Se deben diseñar productos plásticos que faciliten los procesos de reutilización y reciclado de calidad. Además, para el año 2030, se establece que todos los recipientes de plástico comercializados en la unión europea tienen que poder reciclarse de manera rentable.

- Una recogida separada y eficaz de residuos plásticos ayudará a facilitar los tratamientos posteriores que se les vayan a dar. El porcentaje de las tasas de reciclaje de residuos de envases plásticos deberá tener un valor similar a los de otros materiales de envasado.
- Los residuos plásticos mal catalogados se suprimirán progresivamente.
- La industria química deberá trabajar de manera directa con las empresas de reciclado de plástico y ayudarlas a localizar nuevos mercados estables. Este proceso ayudará a aumentar la vida útil de los diferentes plásticos. Las sustancias que dificulten el proceso de reciclado deberán reemplazarse o suprimirse paulatinamente.
- Un mayor reciclado de plásticos ayudará a disminuir la dependencia que tiene hoy en día Europa de EE. UU u otros países de África o Asia al tener que adquirir sus combustibles fósiles para poder subsistir, además también contribuiría a disminuir las emisiones de CO₂.
- Deberá crearse un mercado para plásticos reciclados que marche correctamente y que tenga perspectivas de crecimiento concretas, ya que cada vez habrá más productos reciclados, donde el porcentaje de materiales reciclados que forman parte de dicho producto se irá incrementando paulatinamente.
- Se podrán utilizar nuevas materias primas para producción de materiales plásticos cuando se haya comprobado que son más sostenibles que las diferentes alternativas no renovables.
- Europa deberá corroborar su liderazgo en equipos y tecnologías de clasificación y reciclado.
- Los empresarios deberán ver la necesidad de actuación ante la cantidad de residuos plásticos existente en la actualidad como una nueva oportunidad de negocio.
- Un sistema de recogida de residuos eficaz, combinado con una disminución en la generación de residuos y una mayor sensibilización por parte de los consumidores, deberá impedir los residuos y asegurar que sean tratados de manera correcta.

- Deberán localizar soluciones innovadoras para evitar que los microplásticos lleguen a los mares, para ello tendrá que analizarse su origen, las rutas que siguen y sus efectos sobre la salud humana.
- La UE deberá ejercer un papel fundamental en la dinámica mundial y los países tendrán que colaborar para paralizar el flujo de plástico en los diferentes océanos y tomar medidas correctoras contra los residuos plásticos ya generados.

1.6.1 Pasos a seguir para fijar esta estrategia: reciclado

Incrementar el reciclado del plástico conlleva obtener numerosos beneficios tanto medioambientales como económicos, como son:

- ❖ Reducción de las emisiones de CO₂.
- ❖ Ahorro energético.
- ❖ Ahorro de agua.
- ❖ Reducción de residuos.
- ❖ Ahorro económico.
- ❖ Ahorro de petróleo y gas.
- ❖ Creación de empleo verde.

Para alcanzar un nivel de reciclado máximo de los diferentes productos solo se puede conseguir mejorando el diseño y modo de producción de los de los mismos. Asimismo, es necesario que se establezca una mayor cooperación en toda la cadena de valor: desde la industria, los fabricantes, las diferentes empresas tanto públicas como privadas, hasta los ciudadanos productores de residuos plásticos. Concretamente, los principales actores deberían contribuir para:

- i. Tomar medidas en el diseño y estimular la innovación para lograr que los plásticos y los productos de plástico sean fácilmente reciclables.
- ii. Actualizar la capacidad de reciclado y clasificación de residuos.
- iii. Mejorar la recogida selectiva de los residuos de plástico, con el objeto de avalar la calidad de los recursos dentro de la industria del reciclado.
- iv. Crear mercados estables y rentables para los diferentes productos reciclados.

Para estimular estos avances, la comisión ha planteado normas sobre la gestión de residuos. Entre ellas se incorporan obligaciones más contundentes para que las

autorizaciones nacionales refuercen la recogida selectiva, así como los objetivos para impulsar la inversión en reciclado y evitar el exceso de infraestructuras para el tratamiento de los residuos mezclados (por ejemplo, incineración) y normas más armonizadas sobre el recurso a la responsabilidad ampliada del productor. La comisión ha empujado a los colegisladores para que lleguen a un acuerdo sobre estas nuevas normas lo antes posible. Una vez adoptada esta nueva legislación europea debería mejorar la situación actual. Sin embargo, se necesitan medidas adicionales para complementar la normativa sobre residuos y suprimir las barreras que desafían al sector del plástico.

❖ **Diseño que favorezca el proceso de reciclado**

En la actualidad, los fabricantes de productos plásticos tienen poco interés en aspectos relacionados con la reutilización o reciclado en el diseño sus productos. Los plásticos como se ha desarrollado en el apartado de introducción están constituidos por largas cadenas de diversos polímeros, con aditivos determinados para satisfacer las necesidades de los productos que el mercado demanda, estableciendo una amplia variedad de los mismos. Esta amplia gama puede dificultar el proceso de separación y consecuentemente su reciclado, ya que esto puede afectar a la calidad del plástico reciclado. Además, en determinados diseños como consecuencia de la innovación en los productos se le añaden colores oscuros a los polímeros que también podrían repercutir de manera negativa en la calidad de los productos reciclados.

Los envases de plástico deben de ser una de las materias más importantes a tener en cuenta en el diseño dentro del campo de los plásticos, sobre todo en los envases de un solo uso, para facilitar su posterior reciclado. Según estudios realizados en la UE alrededor de un 60% de los residuos plásticos podrían reciclarse y constituir una de las principales materias primas de los nuevos plásticos reciclados. Además, también afirma que si se mejorase el diseño de los productos plásticos para favorecer el reciclado se podría reducir en un 50% el coste de productos reciclados.

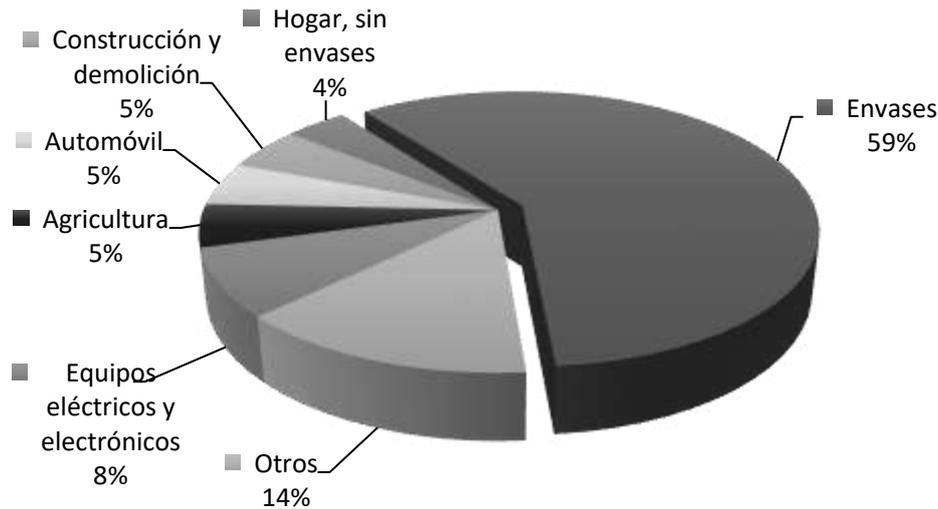


Ilustración 6 Residuos plásticos generados en la UE en 2015.

Datos adquiridos de (María Jesús Romero y Adrián Ortiz, 2020)

En 2015, la comisión europea estableció que para el año 2025 en la UE, como mínimo el 55% de todos los envases de plástico deberá reciclarse (Una estrategia europea para el plástico en una economía circular., 2018). Para cumplir con estos objetivos es necesario que la UE adopte medidas para secundar el diseño protegiendo en el mercado interior. Además, la comisión fija que para el año 2030, todos los envases plásticos comercializados en la UE deben ser reutilizables o reciclables de manera sencilla. Para ello, la comisión premiará económicamente a los productores de productos plásticos que desarrollen diseños más sostenibles.

Del mismo modo, se ha establecido que para el año 2025 las botellas de bebidas deben reunirse de forma separada del resto de plástico, llegando a un 90% en la tasa de reciclaje de los mismos y, en 2030, todo el plástico que no sea termoestable en Europa tendrá que ser reciclable (María Jesús Romero y Adrián Ortiz, 2020).

Todas estas medidas van a tener una gran repercusión a corto y medio plazo en la industria del plástico en Europa, que engloba alrededor de 60.000 empresas del sector, con un volumen de negocio de 350.000 millones de euros, y que da empleo directo a más de 1,5 millones de personas en Europa. Esta industria produjo 60 millones de toneladas de productos plásticos, incluyendo materiales plásticos (termoplásticos y poliuretanos) y otros plásticos (termoestables, adhesivos, revestimientos y sellantes).

Por otro lado, en los sectores de la construcción, el mueble, el automóvil y la electrónica también se usa una cantidad de plástico muy elevada, los cuales son

constituyen una fuente importante de residuos. Dichos residuos podrían reciclarse, sin embargo, la falta de información sobre la posible presencia de sustancias y productos químicos suponen un gran problema para su reciclado. Por ello la comisión europea se compromete a realizar estudios para identificar posibles sustancias en estos materiales plásticos para facilitar así su reciclado y evitar posibles daños en la salud humana o en el medio ambiente.

Además, la comisión conserva su compromiso de establecer requisitos para los productos con arreglo a la Directiva sobre diseño ecológico (Directiva 2009/125/CE). Así, será más sencillo reciclar los plásticos usados en una amplia gama de aparatos eléctricos y electrónicos. La Comisión ya ha propuesto requisitos obligatorios de diseño en diferentes productos para que sea más sencillo y seguro desmontar, reutilizar y reciclar. Asimismo, ha establecido criterios para mejorar la reciclabilidad de los plásticos mediante la etiqueta ecológica y la contratación pública ecológica.



Ilustración 7 Producto con sello Ecolabel.

En esta imagen se muestra un producto con el sello Ecolabel, cuyo sello hace referencia a la etiqueta ecológica oficial de la Unión Europea (UE), la cual fue creada en el año 1992 para certificar aquellos productos ecológicos que tienen muy en cuenta la protección del medio ambiente (Moraño, 2019). Cuando se compra un producto con este sello, se contribuye de manera indirecta a:

- Generar menos CO₂ en su fabricación y uso.
- Usar de forma más eficiente el agua, la energía y las materias primas.
- Los fabricantes elaboran productos más duraderos y fácilmente reciclables.
- Impulsar empresas más sostenibles con el medio ambiente y la innovación ecológica.

Por tanto, esta imagen muestra un producto para el lavavajillas, en el que además de fijar requisitos para el propio producto de limpieza, exige determinados aspectos a cumplir por el envase de plástico.

❖ **Fomentar el mercado de plásticos reciclados**

El bajo mercado de plásticos reciclados es otro de los principales inconvenientes para cambiar la cadena de valor del plástico. En Europa, el empleo de plásticos reciclados en los nuevos productos es bastante bajo y hoy en día sigue acotándose a aplicaciones muy concretas y de escaso valor. La inseguridad relativa a la salida de productos reciclados al mercado, el miedo a que dichos productos no satisfagan las necesidades de los consumidores y la baja rentabilidad de los mismos dificultan que los empresarios quieran invertir en este campo, por ello la UE ve necesario ampliar y modernizar los productos reciclados para que puedan competir con los productos del mercado actual.

Fundamentalmente los plásticos se reciclan en instalaciones pequeñas, sobre todo de ámbito regional. Por ello, la Comisión se ha comprometido a trabajar con el Comité Europeo de Normalización y la industria para desarrollar normas de calidad para los residuos plásticos clasificados y los plásticos reciclados.

Es primordial para conseguir aumentar la cantidad de plásticos reciclados en la cadena de valor una mayor integración sobre todo en industrias del sector químico. Su experiencia y sus conocimientos tecnológicos podrían ayudar a alcanzar un nivel de calidad elevado, ya que la contaminación accidental o la falta de información sobre la existencia de residuos con sustancias químicas pueden suponer un problema para los distintos flujos de residuos de plástico. Estas inquietudes contribuyen a reducir la demanda de plásticos reciclados en una serie de productos nuevos con requisitos de seguridad específicos. Por ello, la Comisión europea debe abordar estos problemas y apoyar la utilización de plástico reciclado. Además, la UE también colaborará a través de

la financiación a proyectos de investigación para conseguir mejorar la identificación de los contaminantes y sobre la eliminación de los mismos.

Por otro lado, en relación al uso de plásticos reciclados en aplicaciones que estén en contacto con alimentos, como podrían ser botellas de agua, la UE establece como objeto principal dar prioridad a la seguridad alimentaria al mismo tiempo que presenta un marco claro y fiable para la establecer las bases de la economía circular. Por ello, la comisión está desarrollando procedimientos de autorización de más de un centenar de procesos de reciclado seguros. Además, en cooperación con la EFSA, también evaluará si pudiera autorizarse el empleo seguro de otros materiales plásticos reciclados.

❖ **Importancia de la recogida selectiva y la clasificación de los diferentes residuos plásticos**

Otro de los problemas que se tiene para conseguir un mayor reciclado del plástico es la insuficiencia de los volúmenes, la calidad de la recogida selectiva y la clasificación de los residuos. Esta última constituye un paso primordial para evitar la introducción de contaminantes en el proceso de reciclado y así poder mantener tanto la seguridad como la calidad de los mismos. Por ello, tanto los ciudadanos, como las autoridades locales, regionales y nacionales desempeñan un papel esencial dentro del proceso de reciclaje, ya que gracias a la colaboración de todos se pueden conseguir los objetivos fijados de recogida en un periodo relativamente corto. Para conseguir los objetivos de recogida y clasificación la Comisión desarrollará una guía sobre la recogida selectiva y la clasificación de residuos.

1.6.2 Futuro de los plásticos a nivel mundial

Fuera de Europa, el consumo de plástico se está incrementando de manera muy rápida, principalmente en Asia, lo que conlleva a la generación de una gran cantidad de residuos. En este caso, en Europa más del 50 % de los residuos plásticos producidos se envían a países fuera de la misma. Hace unos años, más del 85 % de dichos residuos se exportaban a China (Europea C. , Una estrategia europea para el plástico en una economía circular , 2018), sin embargo, en el año 2017 esta situación cambió tras la decisión de este país de vetar la importación de gran variedad de residuos de plástico (Xataka, 2018).

Por ello, hoy más que nunca es primordial la cooperación entre los diferentes países del mundo para hacer frente al problema de los residuos plásticos en los mares y océanos, ya que estos constituyen un patrimonio común, y si no se cambia la forma actual de actuar esto tendrá efectos muy graves en las generaciones futuras como consecuencia

de la destrucción de los ecosistemas marinos. La instauración de sistemas sólidos de prevención y gestión de residuos, en particular en las economías emergentes, es primordial para mantener los plásticos alejados del mar.

1.7 Situación actual en España

Por último, se va a mostrar la situación actual de España en relación a los residuos de plástico y su destino final.

En 2016 (último periodo en el que se tienen datos completos), y según muestran las investigaciones efectuadas por la asociación Europe Plastics, en España se produjeron 2,3 millones de toneladas de residuos plásticos. De los cuales, el 46 % se enviaron a vertedero, el **37%** a reciclaje y el **17%** a recuperación energética. (María Jesús Romero y Adrián Ortiz, 2020). Dentro del reciclaje, destacan los residuos de envases de plástico, ya que un **45,4 %** de los residuos de envases plásticos se destinan a reciclado, cuyo valor posiciona a España por encima de la media europea, la cual se encuentra en torno al **40,8 %**.

Tabla 3 Destino de los residuos de plástico y envases de plástico generados en España en 2016. (Datos adquiridos de (María Jesús Romero y Adrián Ortiz, 2020))

	Residuos plásticos post-consumo	Residuos de envases plásticos
Cantidad total (2016)	2,3 millones de toneladas	1,5 millones de toneladas*
Vertedero	46,0%	38,2%
Reciclado	37,0%	45,4%
Valorización energética	17,0%	16,4%

Si comparamos estos valores con los valores obtenidos por los diferentes países de la UE, **España se convierte en el segundo país europeo que mayor cantidad de plástico recicla por habitante, sin embargo, también es el que mayor cantidad de plásticos destina a vertedero (23 kg por persona al año)**. Esto como se ha descrito en el apartado anterior debe de cambiar ya que conlleva la pérdida económica de millones de euros, tiene consecuencias sobre la salud y genera gran impacto ambiental.



**Ilustración 8 Tasa de reciclaje de residuos de envases de plástico en Europa (%).
(Europeo, 2018)**

Del mismo modo, la situación actual en España en relación a la gestión de residuos se caracteriza por:

❖ **Salida de residuos plásticos**

En el año 2016, según muestra el Instituto Español de Comercio Exterior (ICEX), se enviaron a China un total de 138.338,81 toneladas de residuos de plástico, por el coste de 36.318.781,51 millones de euros.

Pero china como consecuencia de la cantidad masiva de residuos plásticos que recibía de España y de otros lugares del mundo, prohibió introducir residuos plásticos domésticos al país, lo que supuso un gran problema para España, ya que tuvo que buscar nuevos destinos y crear nuevas plantas de tratamiento para dichos residuos. Este flujo de residuos plásticos que no se trataban en España, empezó a hacerlo, creando nuevas oportunidades dentro del país, ya que no debería ser una alternativa acabar en países donde la legislación es menos estricta o en centros dónde no se tratan correctamente. Del mismo modo, el vertedero tampoco debería ser una opción para los mismos.

❖ **Programas de gestión de residuos**

Como el resto de los países de la UE España tiene que exponer la planificación de residuos de todo país con sus revisiones y/o actualizaciones. Estos planes tienen que revisarse y actualizarse cada seis años.

Algunas comunidades de España como Madrid, Aragón, Baleares y Canarias aún no han presentado sus planes de gestión de residuos a la comisión desde el año 2010, por lo que la misma ha iniciado acciones jurídicas contra España ante el Tribunal de Justicia de la UE por no presentar los planes de gestión de residuos de acuerdo a los requisitos sobre las normas de la UE para la Directiva marco sobre residuos (Directiva 2008/98/CE).

❖ **Medidas tomadas por España ante la problemática de los residuos**

Ante la cantidad de residuos existente en España, sobre todo en las zonas marítimas, en el año 2013 se desplegó un proyecto de seguimiento de las basuras marinas en las playas, cuyo proyecto se lleva a cabo de manera estacional en 26 playas españolas. La principal intención del mismo es reunir y organizar las piezas encontradas según su tipología (plásticos, maderas, gomas, papel y cartón, telas, vidrio, metales, residuos médicos, etc), comparar la situación en las distintas playas españolas, evaluar tendencias y suministrar información que permita desarrollar medidas orientadas a disminuir los residuos en el medio marino.

A lo largo de los últimos años, numerosas iniciativas españolas y consorcios públicos y privados están desarrollando proyectos e iniciativas para minimizar esta situación, como la asociación territorial de ámbito estatal **AEBAM** que establece programas de concienciación, divulgación e investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Biodegradabilidad

Es el proceso biológico realizado por diferentes organismos vivos, fundamentalmente microorganismos y hongos, los cuales consumen totalmente una sustancia o producto dando lugar a elementos químicos más simples, permitiendo así la reincorporación de los mismos al ciclo natural del carbono. El proceso de biodegradación depende de condiciones ambientales tales como, la humedad, la concentración de oxígeno, la temperatura, tipo de microorganismos, etc.

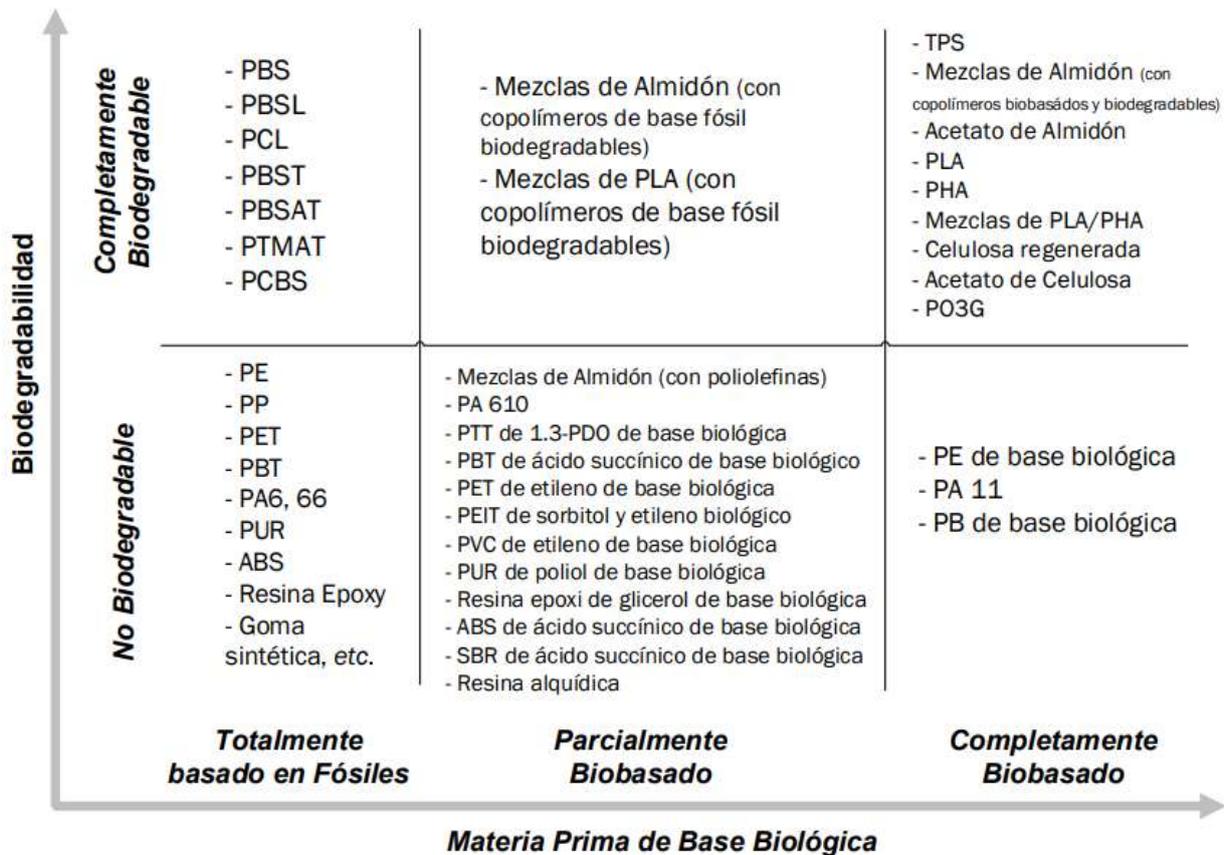


Ilustración 9 Clasificación de los diferentes plásticos en función de su biodegradabilidad y material de origen.

En la actualidad, pueden ocurrir dos tipos de procesos de biodegradación: **aeróbica** (en presencia de oxígeno) y **anaeróbica** (en ausencia de oxígeno). La diferencia fundamental entre ambos es que en la biodegradación anaeróbica se genera biogás, esencialmente metano, cuyo compuesto es considerado un gas de efecto invernadero, el cual incrementa el calentamiento global del planeta.

Atendiendo a su origen, se establece una clasificación de los polímeros biodegradables en:

- ❖ **Polímeros naturales:** Se obtienen de vegetales, animales marinos y bacterias. Dentro de este tipo se pueden encontrar polímeros como las proteínas y los polisacáridos.
- ❖ **Polímeros sintéticos:** Representan los compuestos formados por la unión de monómeros obtenidos de manera artificial. Dentro de este grupo destacan la policaprolactona y el ácido poliláctico.
- ❖ **Polímeros de origen microbiano:** Estos polímeros son sintetizados por bacterias y actúan como gránulos de almacenamiento de carbono y energía. Dentro de este grupo destacan los polihidroxialcanoatos.
- ❖ **Mezclas de polímeros:** son aquellos compuestos obtenidos a partir de un polímero natural y un polímero sintético. A modo de ejemplo, se puede hablar de materiales compuestos por mezclas de almidón y poliestireno. Estos polímeros son muy interesantes desde el punto de vista económico, ya que sus costes de producción son relativamente bajos.
- ❖ **Polímeros naturales modificados:** Estos compuestos combinan mezclas de polímeros (mezclas de poliestireno y almidón o mezclas de almidón y policaprolactona) con polímeros naturales (celulosa o almidón) como por ejemplo los polialcanatos o el acetato de celulosa.

A continuación, se muestra un esquema de los polímeros biodegradables existentes en la actualidad:

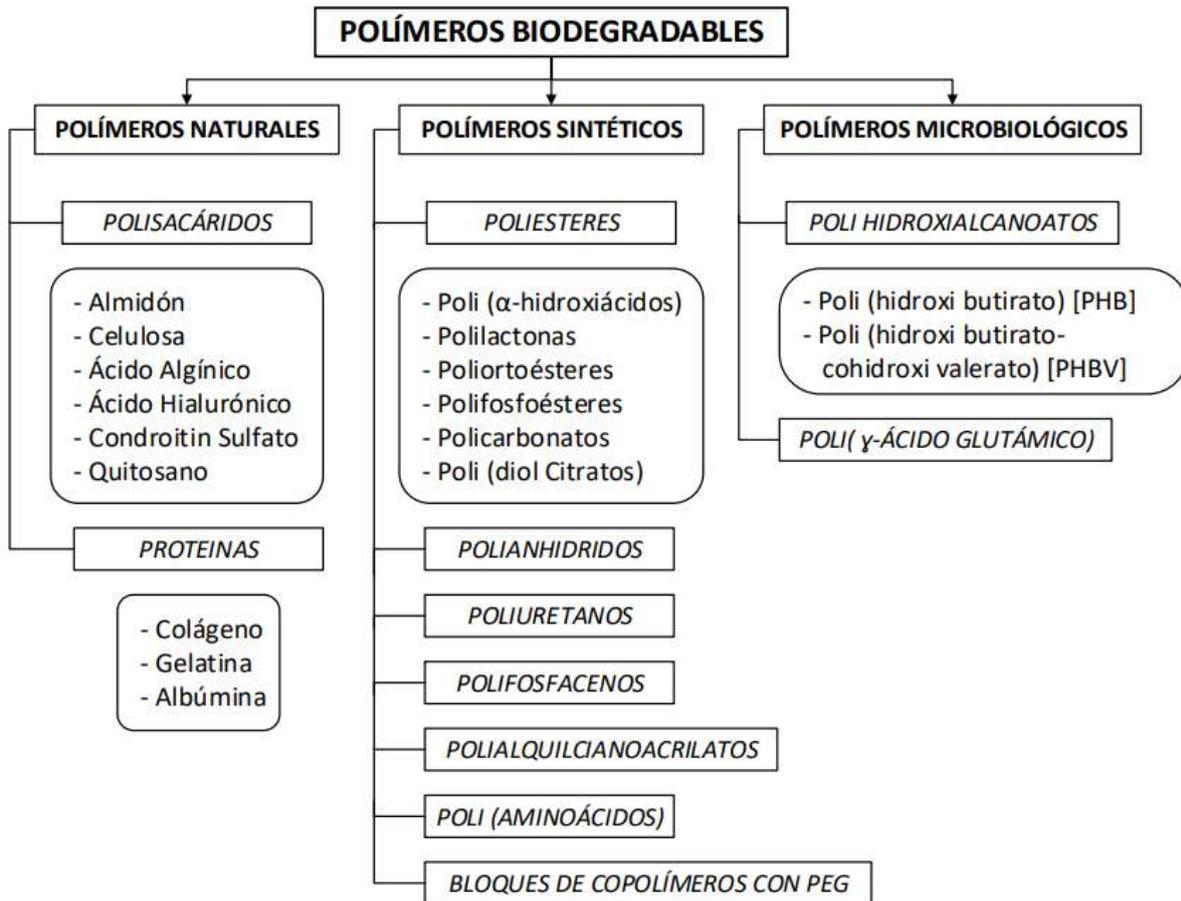


Ilustración 10 Clasificación de los polímeros biodegradables atendiendo a su origen.

Estos polímeros biodegradables presentan una serie ventajas en comparación a los plásticos usados tradicionalmente. Las principales son:

- i. Se reduce la actual dependencia del petróleo como principal materia prima para obtención de productos plásticos.
- ii. Estos materiales son capaces de degradarse totalmente en un periodo de tiempo relativamente corto.
- iii. Los subproductos formados durante el proceso de degradación son fundamentalmente agua, dióxido de carbono y biomasa.
- iv. Se reduciría la elevada cantidad de residuos existente en la actualidad.

La presencia de estos materiales ha incrementado el campo de la investigación médica, debido a que los polímeros biodegradables son materiales compatibles con el

cuerpo humano, y tras cumplir sus objetivos en el mismo, se eliminan sin tener que realizar ningún tipo de intervención quirúrgica.

Desde esta perspectiva, si todos los plásticos fueran biodegradables acabaríamos con el gran problema existente en la actualidad, sin embargo, existen una serie de inconvenientes, como son:

- i. El problema fundamental es que estos biopolímeros se obtienen a partir de productos alimentarios. Independientemente del tiempo que tarden los mismos en biodegradarse después de su uso, ¿qué cantidad de terreno se necesitaría para cultivar las materias primas que se utilizarían para fabricar estos materiales?. Es muy importante hacer esta pregunta ya que, como se ha descrito en el apartado de introducción en 2015 se produjeron 381 millones de toneladas de plástico en el mundo, lo que nos hace pensar la cantidad inmensa de terreno que se necesitaría para la obtención de dichos productos. Del mismo modo, a nivel medioambiental se producirían serios problemas como consecuencia de que se incrementarían los procesos de deforestación, el consumo de agua y el uso de fertilizantes procedentes del petróleo. Por lo que si se mira desde esta perspectiva no parece una opción muy viable en un mundo en el que existe una cantidad muy elevada de personas sin un plato de comida al día. De la misma manera, al no ser productos alimenticios se podría incrementar la cantidad de transgénicos producidos, pudiendo crear un mercado de alimentos muy peligroso. Además, en general, el coste de producción de un polímero biodegradable es bastante más alto que el coste de producción de un plástico derivado del petróleo.
- ii. La mayor parte de estos plásticos necesitan unas condiciones determinadas para biodegradarse, es decir, deben tener una mezcla equilibrada de oxígeno, temperatura (normalmente superior a 50 °C), humedad y aireación. Estas condiciones se dan en una planta de compostaje y fuera de las mismas es complicado que se alcancen dichas condiciones y por tanto difícil que se produzca la biodegradación.
- iii. Los plásticos biodegradables, normalmente tienen unas propiedades mecánicas inferiores a los plásticos tradicionales derivados del petróleo, presentando menor resistencia física.

- iv. La UNEP establece que, en un río, mar, u océano, estos materiales nunca o casi nunca van a biodegradarse, ya que es casi imposible que se den las condiciones necesarias para ello.
- v. Su reciclaje es complejo, debido a que los plásticos biodegradables no se podrían combinar con los usados tradicionalmente ya que disminuiría la calidad del producto final.

2.1.1 Mecanismos de degradación de los diferentes polímeros

La degradación de un polímero hace referencia al proceso mediante el cual se produce una alteración en su estructura química, apreciándose un cambio en sus propiedades. Estos procesos pueden ser físicos, químicos o darse ambos tipos de manera simultánea.

Además, para mejorar las propiedades de dichos polímeros se les suele añadir diferentes aditivos como pueden ser antioxidantes, estabilizantes, plastificantes,...entre otros. Estos compuestos pueden repercutir en la velocidad de degradación de los polímeros. Sin embargo, también existen otro tipo factores que intervienen en la velocidad de degradación como se muestra en la siguiente ilustración.

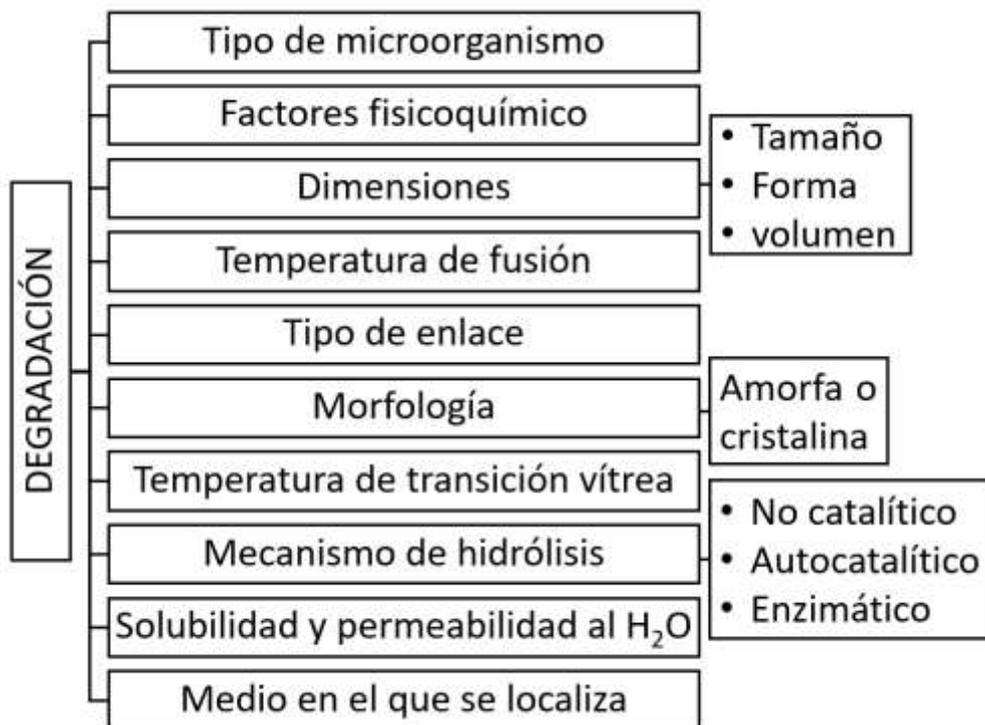


Ilustración 11 Esquema básico de los factores que intervienen en la degradación de un biopolímero.

En la actualidad existen diferentes mecanismos de degradación, como son la termodegradación (producida a causa de la temperatura), la fotodegradación (producida como consecuencia de la radiación UV), la degradación oxidativa y la hidrólisis (producidas por degradación química), degradación mecánica (producida por grandes esfuerzos mecánicos), la biodegradación y degradación enzimática (producidas por degradación biológica), cuyos procesos se describen con mayor detalle a continuación.

Antes de pasar a describir los diferentes mecanismos de degradación existentes, quiero destacar que para que cualquiera de estos tipos de procesos tenga lugar es necesario que los polímeros que vayan a ser degradados estén formados por los siguientes tres componentes, ya que en ausencia de alguno de ellos el proceso degradativo no tendrá lugar:

1. Debe tener un sustrato, es decir una sustancia química o materia orgánica.
2. Debe de existir un agente que desarrolle el proceso de degradación.
3. En función del tipo de polímero debe haber un ambiente con unas características específicas (humedad, oxígeno, temperatura, pH, etc).

❖ Termodegradación

La degradación térmica o termodegradación de los polímeros representa la ruptura de los enlaces covalentes o de los grupos funcionales al administrar temperaturas muy elevadas (entre 100 y 200 °C).

La estabilidad térmica de un polímero depende de dos mecanismos. El primero hace referencia al proceso reversible y representa el ablandamiento del material como consecuencia del incremento de temperatura. Durante este proceso se produce la eliminación de los grupos laterales, creando compuestos de bajo peso molecular que se volatilizan a la temperatura de degradación. El segundo mecanismo representa la descomposición irreversible de una sustancia como consecuencia del calor. Este proceso predomina a temperaturas elevadas.

El primer mecanismo únicamente depende de la temperatura, en cambio, en el segundo depende tanto de la temperatura como del tiempo y está afectado por otros factores como la atmosfera circulante (Bustamante, 2012).

Al enfriar o calentar un plástico aparecen fundamentalmente dos tipos de transiciones. La transición es de primer orden cuando las propiedades del polímero varían bruscamente y de segundo orden cuando el cambio se realiza gradualmente. Normalmente esta última se asocia a los fragmentos amorfos del polímero.

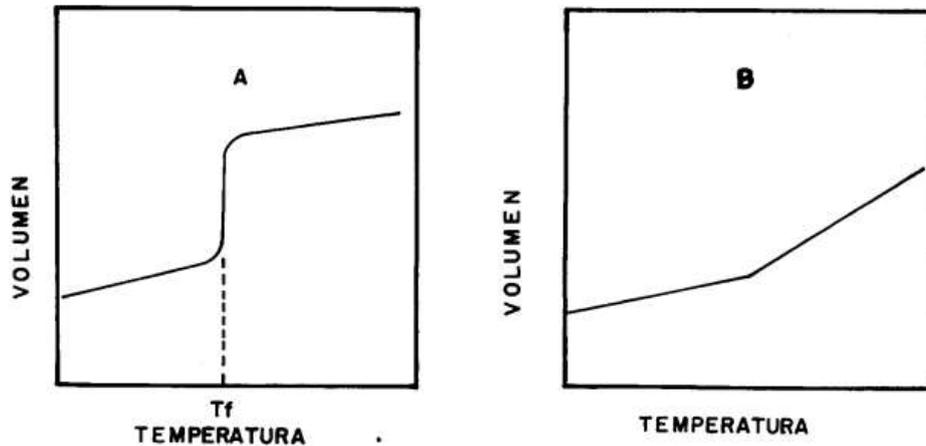


Ilustración 12 Cambios en el volumen con la temperatura, los que reflejan transiciones de primer orden en la figura A y de segundo orden en la figura B. (Bustamante, 2012)

Además de las transiciones, las propiedades de un plástico cambian constantemente con la temperatura. Cuando se incrementa la temperatura, las vibraciones de las cadenas de los polímeros aumentan, provocando que sus uniones se debiliten. La disminución de la cohesión provoca el ablandamiento del material y consecuentemente produce el cambio de otras propiedades mecánicas, físicas, ópticas y eléctricas.

Por otro lado, en el proceso termodegradación es imprescindible tener en cuenta los siguientes parámetros. El primero de ellos hace referencia a la temperatura de transición vítrea (T_g), la cual se puede definir como la temperatura por debajo de la cual un polímero muestra características propias del estado vítreo, como son la rigidez y fragilidad. Esta temperatura depende de la estructura química del polímero y, por lo tanto, puede utilizarse para reconocer a los mismos. Esta transición sólo se da en polímeros amorfos y es distinta para cada polímero (mexpolímeros, s.f.).

La transición vítrea representa la transición de segundo orden más importante. Esta se produce a temperaturas inferiores que el punto de fusión (intervalo de ablandamiento) y generalmente la relación T_g/T_f se encuentra entre 0,58 y 0,78 (Bustamante, 2012).

La temperatura de transición vítrea no representa un fenómeno de equilibrio y depende fundamentalmente de la escala de tiempo utilizada en su determinación.

Además, este parámetro varía en función de otros parámetros como son el peso molecular del material, el entrecruzamiento y los plastificantes.

El segundo parámetro a tener en cuenta es el punto de fusión, aun no se ha establecido si la fusión de los diferentes polímeros es una transición de primer o segundo orden, ya que el varía en función del peso molecular de los mismos. El punto de fusión se incrementa con el peso molecular como se muestra en la siguiente expresión empírica:

$$1/T_f = a + b/x \quad \text{Ec.1}$$

Donde la x es la longitud de la cadena y a y b representan dos constantes experimentales.

Durante el proceso de fusión se producen cambios considerables en las propiedades de los polímeros. La medida de esos cambios se utiliza para determinar el punto de fusión y así establecer el tipo de polímero que se trata, como se puede ver en la siguiente imagen.

Tabla 4 Temperaturas de fusión y de transición vítrea de algunos plásticos. (Datos adquiridos de (Bustamante, 2012))

Material	Tg (° C)	Tf (°C)
Nylon 66	40	256
Polidimetilsiloxano	-123	-58
Poliisopreno (cis)	-73	30
Cloruro de polivinilo	75	100
Poliisobutileno	-65	44
Cloruro de polivinilideno	-5	190
Polietileno	-24	110
Acetato de polivinilo	30	-
Politetrafluoretileno	20	327
Poliestireno	100	-

Las propiedades de los plásticos por debajo del punto de fusión definen su aplicación práctica, por ello es fundamental examinar el cambio de estas propiedades con la temperatura.

En la primera reacción se ve cómo se eliminan los grupos hidroxilo del polivinilalcohol (ilustración 12, a). En la segunda reacción se representa la rotura de las cadenas y configuración de los subproductos de peso molecular inferior que el polímero de partida (ilustración 16, b).

Las reacciones de termodegradación pueden tener lugar en presencia de oxígeno (termo-oxidación) o en ausencia del mismo (pirólisis). En relación a las reacciones de tipo pirolítico, quiero destacar que para que tengan lugar estas se tienen que alcanzar temperaturas muy elevadas como es el caso de: PET (-390 °C), PS (-375 °C), PMMA (-320 °C), PC (-425 °C), copolímero poli (etileno/polipropileno) (-415 °C), PVAc (-310 °C) (Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez, 2006), ya que estas reacciones están vinculadas a las energías de enlace asociadas a su composición química. Este tipo de reacciones no es muy importante durante el procesado de la mayor parte de los polímeros ya que a lo largo de su procesado no se alcanzan temperaturas tan elevadas. No obstante, hay diversos polímeros que son muy delicados a la temperatura, como el PVC, que puede experimentar termodescomposición a temperaturas inferiores a 200°C. Por ello, durante su elaboración, se le adicionan aditivos con una cantidad elevada de sustancias plastificantes para que pueda ser transformado a temperaturas dentro del intervalo 100 –200°C (Viteri, 2018).

Estos procesos de termodescomposición son típicos de los polímeros elaborados a través de un proceso de polimerización por adición y se producen al azar, o en cadena. En la fragmentación al azar (ilustración 13), como su propio nombre apunta, la ruptura se produce al azar, dando lugar a fragmentos poliméricos de menor tamaño que el polímero original y mayor tamaño que los monómeros que constituyen el mismo.

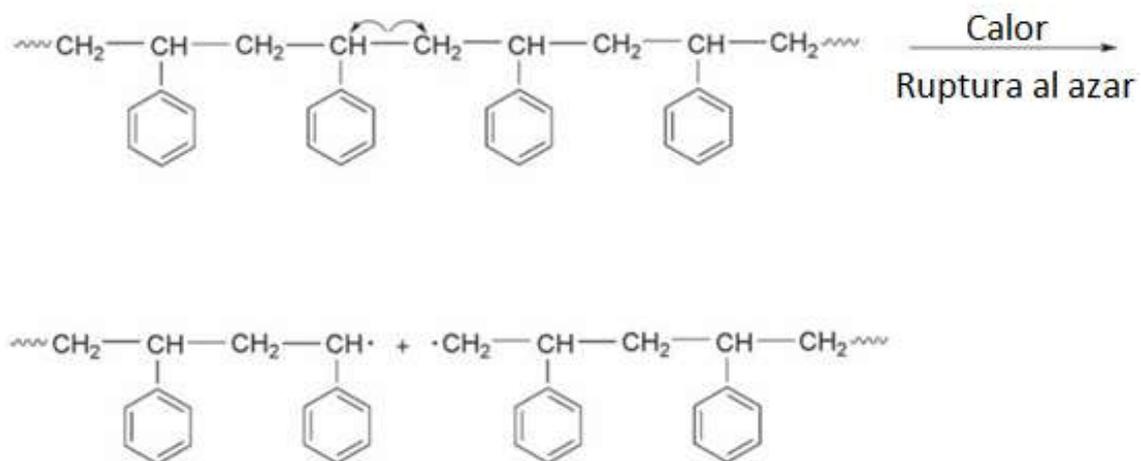


Ilustración 15 Termodescomposición del poliestireno. (Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez, 2006)

Por otro lado, en la descomposición en cadena (ilustración 14) la ruptura radicalaria de enlaces tiene lugar en un extremo de la cadena del polímero. Esta reacción es conocida como despropagación y se considera la reacción inversa a la polimerización por adición, donde se produce la liberación de gran cantidad de unidades de monómero.

Estos dos tipos de reacciones pueden presentarse de manera separada o conjuntamente. Del mismo modo, también pueden ocurrir en las fotodegradaciones y en las degradaciones oxidativas, procesos que se desarrollaran a continuación.

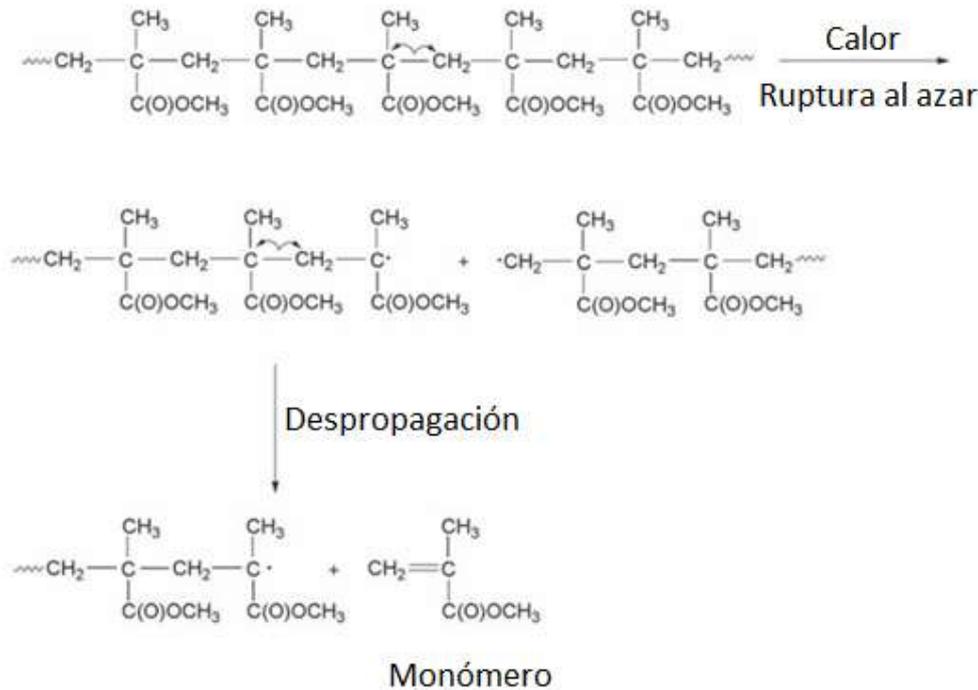


Ilustración 16 Reacción de termodescomposición del polimetacrilato de metilo (PMMA) al azar y por despropagación. (Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez, 2006).

❖ Fotodegradación

En este proceso se producen modificaciones en la estructura de los polímeros como consecuencia de los fotones de la luz, los cuales permiten la degradación de los mismos en otros compuestos más simples.

Las reacciones provocadas por los fotones de la luz se clasifican en dos tipos: fotolíticas o fotoquímicas. Las primeras sólo se producen por acción de la luz, en cambio, las segundas ocurren como consecuencia de la acción conjunta de esta con otro agente, como por ejemplo podría ser el O₂ o la humedad. Las reacciones fotoquímicas son mucho más frecuentes que las fotolíticas, concretamente la fotooxidación, en esta se incluyen numerosas reacciones que influyen mayormente a los compuestos orgánicos, los cuales

provocan su oxidación. El hecho de que las reacciones fotoquímicas sean más frecuentes se debe a que para que ocurra una reacción fotolítica, el contenido energético de la radiación tiene que ser lo suficientemente alto para producir la rotura de los enlaces.

Por tanto, la fotodegradación representa el proceso de cambio que experimenta un polímero después de ser atacado con luz en los diferentes intervalos del espectro electromagnético (el ultravioleta (entre 280 y 400 nm), visible (entre 400 y 700 nm), rayos β , rayos X o rayos γ). El efecto de esta radiación se incrementa cuanto menor es su longitud de onda, debido a que el poder energético que tiene la radiación es mayor.

Normalmente, la mayor parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera, aunque, la radiación ultravioleta también consigue alcanzar la superficie terrestre. Esta radiación tiene la energía suficiente para provocar la rotura de ciertos tipos de enlaces covalentes y provocar así su degradación, como, por ejemplo, el polietileno, el PVC, el poliestireno, los poliésteres y el propileno. Estos se degradan cuando se les aplican longitudes de onda de 300, 310, 319, 325 y 370 nm, respectivamente (Viteri, 2018). Por ello, normalmente en su proceso de elaboración suelen añadirse una gran cantidad de aditivos para impedir su descomposición por fotodegradación.

En caso contrario, si lo que se quiere es elaborar un polímero que sea fácilmente degradable para facilitar su eliminación después de su uso, durante su procesado se suele incluir en su estructura grupos funcionales propensos a degradarse cuando son atacados por la radiación, como son los grupos carbonilo, peróxido o las insaturaciones.

❖ Degradación química

Representa únicamente los procesos en los que la degradación es producida por el contacto del polímero con productos químicos reactivos (bases, ácidos, gases reactivos, solventes etc). Los dos tipos de degradación química más comunes son la degradación oxidativa y la degradación hidrolítica, explicados a continuación.

❖ Degradación oxidativa

El proceso de degradación oxidativa se basa en el ataque del oxígeno activo sobre el polímero, cuya molécula da lugar a la formación de radicales libres en el polímero, los cuales provocan reacciones secundarias de degradación. Este tipo de degradación suele producirse junto con la degradación térmica.

Existen dos tipos de degradación oxidativa, por un lado, la termo-oxidación donde se produce la combinación de oxígeno con la temperatura y por el otro está la

fotooxidación donde se produce la combinación de oxígeno con la con la luz. (Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez, 2006).

El proceso está formado por varias etapas, como se muestra en la siguiente imagen:

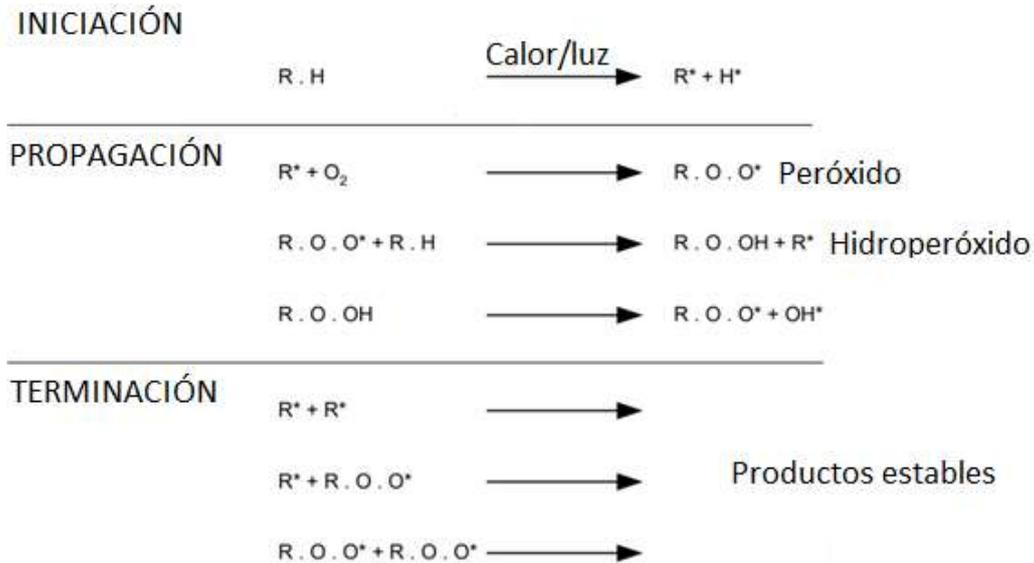


Ilustración 17 Degradación oxidativa.

La primera etapa (iniciación) se origina por una fuente de energía térmica o lumínica. En la segunda etapa (etapa de propagación) los radicales libres creados sufren sucesivos procesos de oxidación y debido a esto se desarrollan nuevos compuestos como los peróxidos e hidroperóxidos, ambos inestables. Por último, en la última etapa (etapa de terminación) las especies químicas formadas en la etapa anterior reaccionan entre sí originando compuestos estables.

Este tipo de degradación ha sido muy investigada en poliésteres y poliolefinas. A continuación, a modo de ejemplo se muestra un posible mecanismo de degradación que puede darse a lo largo del proceso de fabricación del poliéster.

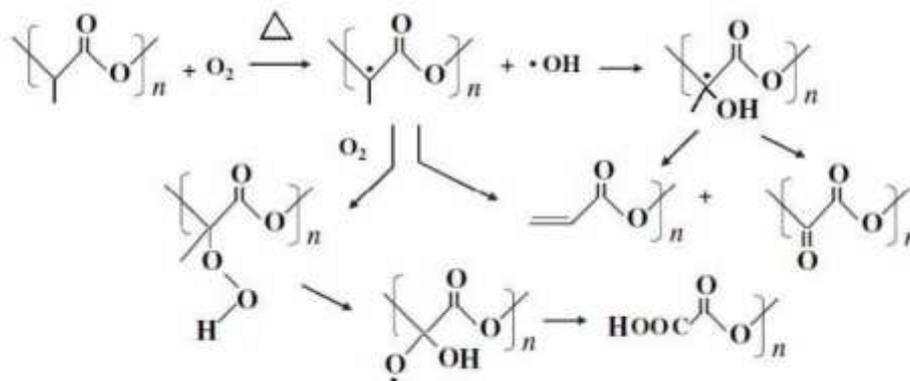


Ilustración 18 Degradación termooxidativa del poliéster. (Viteri, 2018)

❖ Degradación hidrolítica

Este tipo de degradación se produce cuando se establece el contacto entre un polímero con grupos funcionales hidrofílicos (hidroxilos, amida, ésteres y carbonatos) con agua. La introducción del agua en el interior de la matriz polimérica causa su inflamamiento, rotura de los puentes de hidrógeno intermoleculares, hidratación de las moléculas y por último provoca la hidrólisis de los enlaces inestables del polímero. La hidrólisis puede producirse tanto en los grupos de la cadena principal como en las ramificaciones laterales. Si ocurre en la cadena principal del polímero, este pasa a transformarse a oligómeros. Sin embargo, si la hidrólisis ocurre en las cadenas laterales, este proceso afecta a otras propiedades como por ejemplo a la solubilidad. Cabe destacar que, existe una serie de polímeros, los obtenidos a través de reacciones de condensación (poliésteres, policarbonatos, poliamidas y algunos poliuretanos) que son propensos a sufrir hidrólisis.

Por otro lado, el grado de cristalinidad de un polímero constituye un parámetro esencial dentro de la hidrólisis, ya que si un polímero es amorfo (la distribución de las cadenas que constituyen el polímero se realiza de manera aleatoria) el agua puede entrar en la matriz más fácilmente que si tiene una estructura muy cristalina.

A continuación, a modo de ejemplo se va a mostrar un diagrama de flujo de cómo podría ser el proceso de degradación hidrolítica de PET.

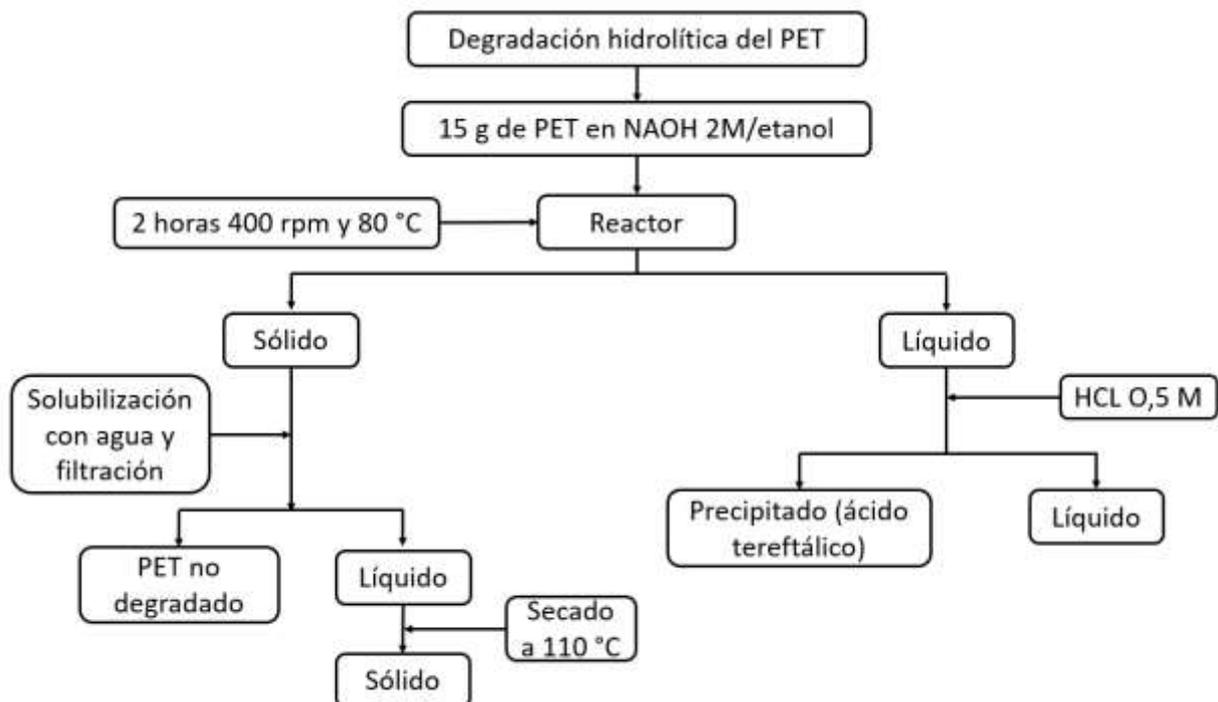


Ilustración 19 Degradación hidrolítica del PET. (Adaptación de (Alejandro Vásquez, Elbert Contreras, Andrés Felipe Sánchez, John Rober Muñoz, Alejandro Hoyos y Carmina Gartner.)

❖ **Degradación mecánica**

Este tipo de degradación se da como resultado a los esfuerzos a los que se somete el material ya que suelen ir acompañados de rotura de enlaces en la cadena principal (David Aradilla Zapata, Ramón Oliver Pujol y Francesc Estrany Coda, 2010).

❖ **Biodegradación y degradación enzimática**

En la actualidad se está apostando por la biodegradación debido a los problemas asociados a los plásticos obtenidos a partir de derivados del petróleo, carbono o gas. En la degradación biológica o biodegradación intervienen diferentes microorganismos (bacterias, hongos o levaduras), los cuales son capaces de degradar, transformar o acumular, de manera natural, gran cantidad compuestos (ligninas, almidón, celulosa, hemicelulosa, hidrocarburos, fármacos y metales (Peraza, 2017)). Este proceso de biodegradación puede producirse en presencia de oxígeno (aerobios) o en ausencia del mismo (anaerobios). Cuando el proceso es aerobio, sólo se producen compuestos finales como el agua, dióxido de carbono y biomasa, en cambio si el proceso es anaerobio además de estos compuestos se registran otros como metano y ácido sulfhídrico, cuyos compuestos son resultado de metabolismos metanogénicos y sulfidogénicos.

La biodegradación de un material puede ocurrir de manera parcial (donde se produce una alteración de la estructura química y como consecuencia se pierden algunas propiedades físicas del material), o total, donde tiene lugar la mineralización completa del material con la obtención de moléculas más sencillas como sales minerales, agua, CO₂ (en condiciones aerobias) o metano (en condiciones anaerobias). A continuación, se va a mostrar a modo de ejemplo un proceso de biodegradación de residuos oxo-biodegradables.



Ilustración 20 Proceso de biodegradación de residuos oxo-biodegradables.

Por tanto, la biodegradación se produce como consecuencia del ataque de los microorganismos a los diferentes polímeros provocando alteraciones en su estructura física y química. Estos microorganismos fabrican una gran cantidad de enzimas diferentes capaces de reaccionar con los diversos polímeros naturales y sintéticos.

Las enzimas son proteínas que catalizan las reacciones químicas en los seres vivos. Estas sustancias sin consumirse en una reacción aumentan notablemente su velocidad, por ello son de vital importancia en todas las reacciones bioquímicas. Todos los seres vivos necesitan enzimas determinadas para llevar a cabo las diferentes reacciones que tienen lugar en el cuerpo. Por ejemplo, en animales herbívoros es necesaria la presencia de celulasa en su organismo para que sean capaces de asimilar la celulosa presente en los vegetales.

A continuación, a modo de ejemplo se va a mostrar el mecanismo de degradación del PET mediante la bacteria *Ideonella*, en cuyo proceso participa la enzima PETasa.

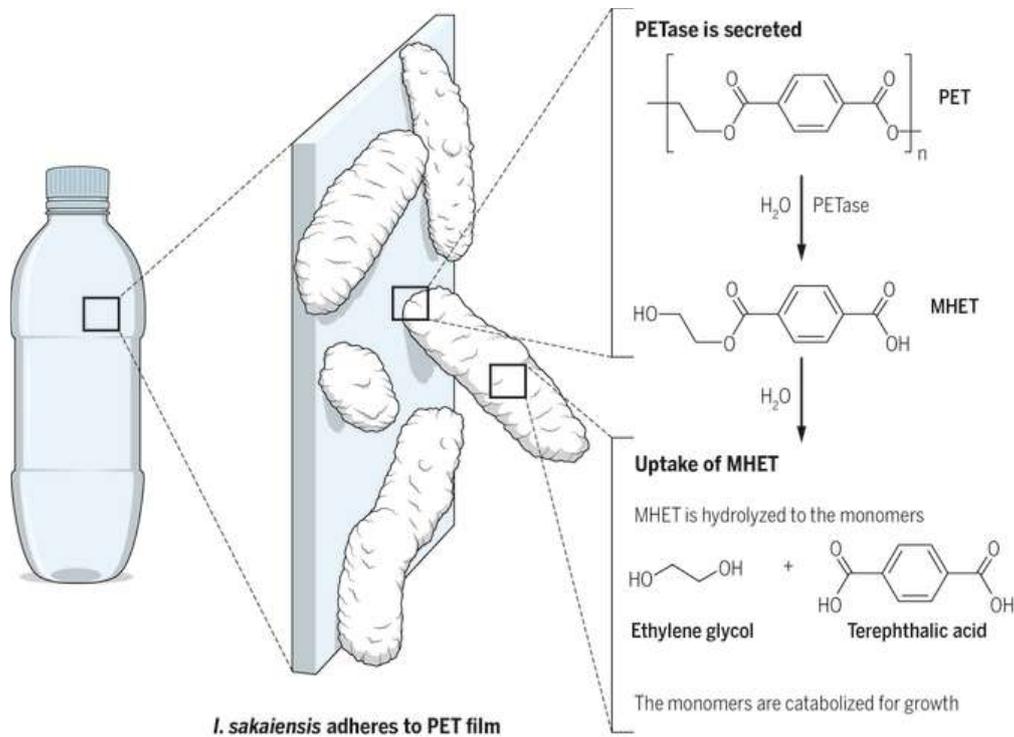


Ilustración 21 Degradación del PET mediante la bacteria *Ideonella*. (Falcotitlan, 2016)

Este mecanismo de degradación puede darse tanto en polímeros naturales como sintéticos. Los primeros son mucho más propensos a biodegradarse que los segundos. Un ejemplo muy usual de polímeros naturales es el mecanismo de biodegradación del almidón. En la biodegradación del almidón, las amilasas atacan los enlaces α -1,4 de la amilopectina y las glucosidasas atacan a los enlaces α -1,6.

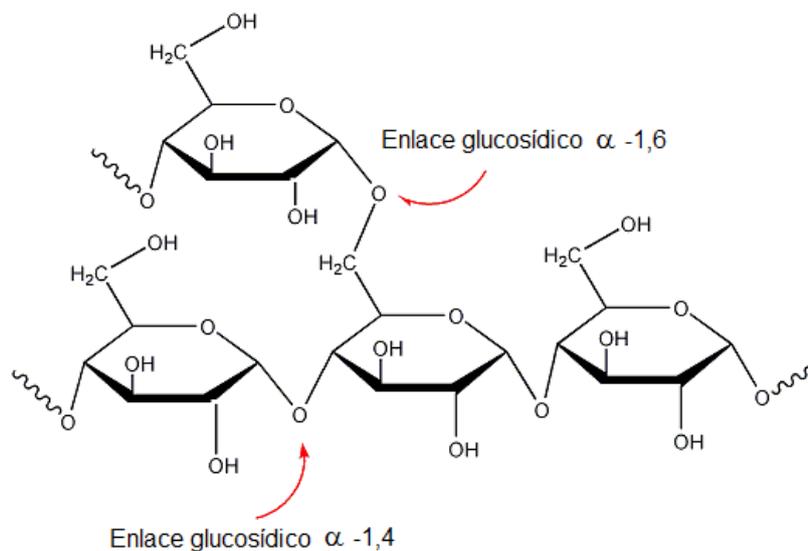


Ilustración 22 Estructura de la amilopectina. (Caicedo, 2011)

De los polímeros sintéticos, el polímero biodegradable más importante es el ácido poliláctico (PLA), obtenido a partir del almidón. En esta biodegradación primero se produce la hidrólisis de los enlaces éster del polímero y después tiene lugar la degradación enzimática. A modo de ejemplo, se muestra un esquema del proceso de obtención y posterior degradación del PLA.

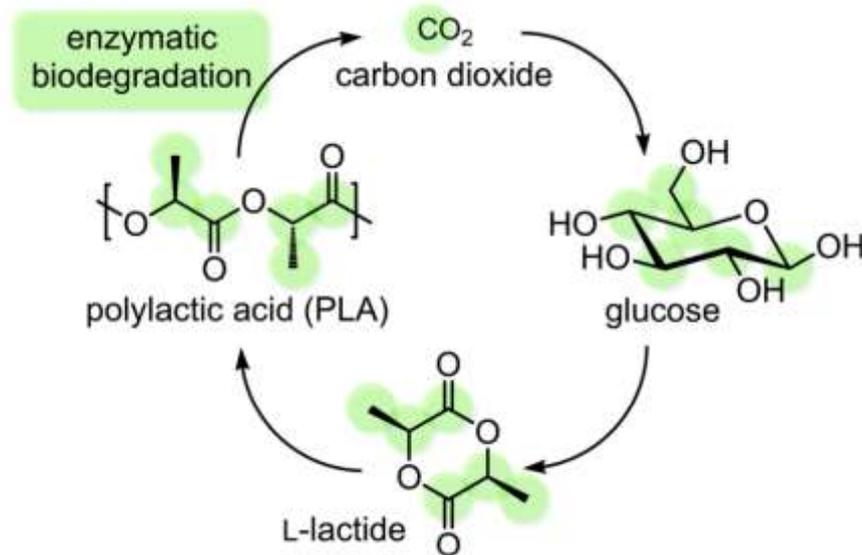


Ilustración 23 Proceso de degradación del PLA. (Viteri, 2018)

En la actualidad, están adquiriendo gran importancia los procesos poliméricos de degradación enzimática que usan diversas clases de redes interpenetradas (INP). Las IPN son combinaciones de dos polímeros, en forma de red, donde por lo menos uno de ellos está sintetizado y/o entrecruzado a otro polímero (Llamas, 2010). Por tanto, estas redes están compuestas por dos polímeros, que en principio son incompatibles, pero bajo unas condiciones específicas, el polímero lineal permanece enredado en la red del otro polímero. Un ejemplo podría ser la combinación de poliacrilamida y poliuretano con un pequeño porcentaje de celulosa, cuyo compuesto es usado para facilitar la acción enzimática. La degradación de este polímero se produce tanto por hidrólisis, en los enlaces uretano y urea de la cadena principal, como por enzimas como la papaína y la ureasa, las cuales pueden catalizar esta reacción de hidrólisis acelerando el proceso de degradación de la red polimérica.

2.1.2 Aplicaciones de polímeros biodegradables

Como se ha descrito en el apartado de la introducción, en los últimos años se ha investigado mucho en el desarrollo de nuevos polímeros más respetuosos con el medio ambiente. Estos materiales se pueden usar en innumerables industrias entre las que destacan:

❖ Polímeros empleados en la industria alimentaria

1. Aditivos alimentarios

En el apartado se va a hablar de los polímeros biodegradables más importantes usados en la industria alimentaria.

i. **Ácido algínico o alginato**

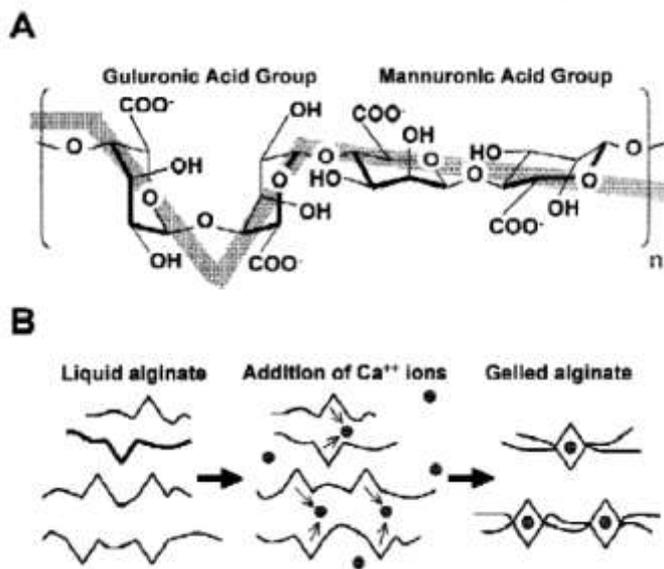


Ilustración 24 Estructura de alginato y mecanismo de reacción. (Díaz, 2017)

Los alginatos son polisacáridos compuestos por ácido D-manurónico y L-gulurónico, que se obtienen de la pared celular de las algas pardas. Normalmente se presenta como alginato de sodio, calcio o potasio. Su importancia en la industria alimentaria reside en su versatilidad de uso como agente de textura (espesante, aglutinante o estabilizador de

emulsiones). Su idoneidad como espesante ocurre como consecuencia de que al disolverlos en agua, incrementan la viscosidad de la disolución en la que se localizan, su capacidad como aglutinante se debe a su elevada capacidad de retención de agua, ya que estos compuestos pueden formar retículos poliméricos, los cuales tienen grupos hidrofílicos capaces de absorber gran cantidad de agua y por último su empleo como estabilizadores se debe a que los alginatos reducen la creación de cristales de hielo cuando se congelan (G.C. Avendaño-Romero, A.lópez-Malo y E.Palou, 2013).

ii. Colágeno

El colágeno es un polímero muy importante en la industria alimentaria, ya que contribuye a mejorar la salud de los huesos, las articulaciones y la piel. Además, es un polímero muy versátil a la hora de incluirlo en los diferentes productos alimenticios, como barras de pan, sopas, café, golosinas, tripa artificial para producir embutidos... etc, pero sin duda alguna su principal uso desde hace ya muchos años es en la fabricación de gelatinas y salsas, debido a su capacidad como estabilizante.

El colágeno se obtiene partir de pieles de animales (especialmente vaca y cerdo), el cual se somete a un tratamiento con una base y posteriormente con un ácido, consiguiendo así una masa de colágeno que puede transformarse por diferentes métodos. Este material también se puede obtener a partir de especies marinas (medusa).

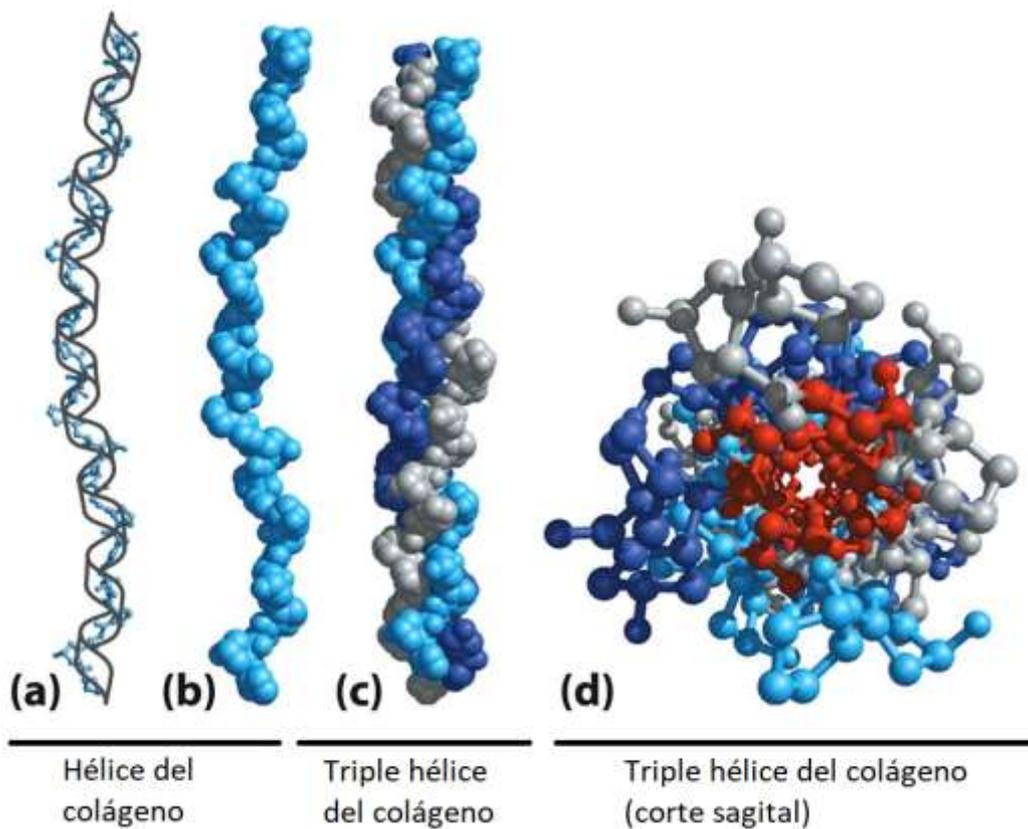


Ilustración 25 Colágeno- formación de triple hélice. (Jordi López, Sandra Kalil y Rosana Amaral Schiaffino., 2010)

iii. Almidón

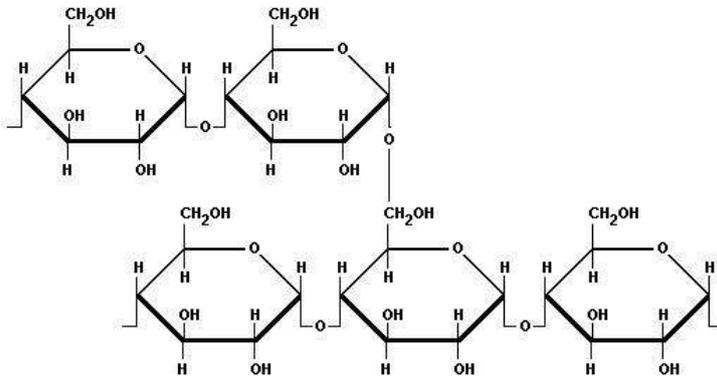


Ilustración 26 Estructura química del almidón. (EcuRed, 2020)

El almidón es el polisacárido de reserva natural predominante en la industria alimentaria. El proceso de obtención del almidón es relativamente económico, por ello es muy atractivo como sustituto de los plásticos basados en la

petroquímica. Está formado por la mezcla dos polímeros la amilosa y la amilopectina, constituidos por glucosa (Jose Ochoa Gómez, Tomás Roncal, Elena Díaz de Apodaca y Jesús Torrecilla., 2007). El almidón puede utilizarse como agente gelatinizante, como estabilizante y como espesante en salsas, sopas o productos de panadería. Además, también se emplea para elaborar pasta y fideos. Su capacidad como espesante y estabilizante se debe a que los gránulos de almidón tienen elevada capacidad de absorción de agua. Esta capacidad varía en función del origen del almidón y del tamaño de los gránulos.

2. Empaquetado

Esta aplicación constituye una de las aplicaciones fundamentales de los plásticos biodegradables. Hasta ahora, la mayor parte de los envases alimenticios se fabrican con polietileno y poliestireno, cuyos compuestos generan una gran repercusión a nivel medioambiental, como consecuencia de la elevada cantidad de residuos que producen. Estos residuos no se pueden reciclar y usar como envases de nuevo debido a que se contaminarían y su limpieza es muy difícil o casi inviable. Por esta razón, ha aumentado el uso de plásticos biodegradables en este campo. En la actualidad el consumo del 50% de los polímeros biodegradables en el mundo se destina a envases alimentarios (Paola Scarfato, Luciano Di Maio y Loredana Incarnato., 2015).

Los polímeros biodegradables más usados desde el punto de vista comercial son el almidón, el ácido poliláctico, los polihidroxialcanoatos y el quitosano, ya que no solo tienen las propiedades adecuadas, sino que también se pueden producir de manera barata.

En este caso, además de las diferentes características que debe cumplir un plástico para ser biodegradable según la normativa (especificada en apartados posteriores), debe de cumplir con las siguientes especificaciones:

- No perjudicar a las propiedades básicas de los productos.
- Tener propiedades barrera para el oxígeno, ya que si el oxígeno entra dentro del envase puede favorecer el crecimiento de microorganismos, como consecuencia de la oxidación de los alimentos.
- Tener propiedades barrera frente al vapor de agua, para impedir el cambio de humedad del alimento, y como consecuencia posible putrefacción del mismo.
- Ser impermeable al dióxido de carbono, ya que muchos productos se envasan con atmósfera inerte para impedir que dentro del envase proliferen microorganismos como mohos o levaduras.

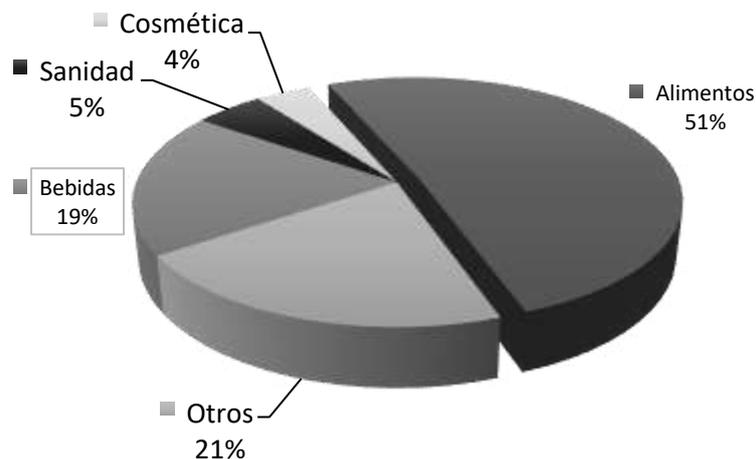


Ilustración 27 Aplicaciones de polímeros biodegradables dentro del campo del envasado.

Datos adquiridos de (David Aradilla Zapata, Ramón Oliver Pujol y Francesc Estrany Coda, 2010)

i. Almidón

El almidón es un polímero que se usa para la producción de envases de productos alimentarios. Este polímero se puede obtener fácilmente por extrusión, con lo que su producción y posterior transformación industrial es relativamente barata. Un ejemplo claro de uso de plásticos hechos de almidón son las bolsas biodegradables que se usan en la mayoría de los supermercados.

Sin embargo, este compuesto presenta un problema muy importante que reduce su campo de aplicación dentro de la industria alimentaria, ya que este compuesto no es

totalmente inerte y puede migrar y modificar el alimento. Para eso se han creado polímeros a partir de almidón y otros materiales, como los nanocomposites de almidón y arcilla, cuyos compuestos presentan buena resistencia mecánica y baja migración. (D. R. Lu, C. M. Xiao, S. J. Xu, 2009).

Por otro lado, también se han desarrollado polímeros que son una combinación de polímeros de almidón y polímeros extraídos del petróleo, con el objetivo de obtener materiales que se degraden de manera más rápida. Un ejemplo comercial de este tipo de materiales es la mezcla de polietileno de baja densidad (LDPE) con almidón, conocido comercialmente como Bioplast.

ii. Ácido poliláctico

El PLA de alto peso molecular se ha catalogado por la FDA como un material biocompatible y de baja toxicidad. Este material es apropiado para la fabricación de envases de alimentos, ya que tiene buena resistencia química a la mayoría de las grasas y una resistencia mecánica muy parecida a la del poliestireno.

El PLA amorfo, está constituido con alrededor de un 12% del enantiómero D, el cual se puede procesar fácilmente por extrusión. Este material se usa principalmente para la elaboración de envases de corta vida, como son las botellas de agua, ya que sus propiedades para mantener el producto son adecuadas (a temperatura ambiente es un material muy parecido al poliestireno o polietileno). De la misma manera, su índice de migración es bajo y los productos que pueden llegar a los diferentes alimentos provenientes de su degradación no son dañinos (ácido láctico). No obstante, las propiedades barrera frente al vapor de agua o al oxígeno no son muy buenas y es un polímero demasiado frágil, por ello se suele mezclar con otros polímeros para mejorar estas propiedades.

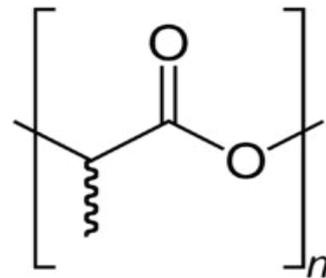


Ilustración 28 Estructura química del ácido poliláctico. (Textos científicos, 2020)

iii. Polihidroxialcanoatos

Los polihidroxialcanoatos, concretamente el PHB y el PHBV, tienen unos costes de producción relativamente bajos, lo que ha provocado que puedan ser usados como materiales para la producción de envases.

El PHB se usa para la producción de envases para productos de vida útil corta, como por ejemplo envases de mayonesa o carne. Esto es debido a que sus propiedades

barrera frente al vapor de agua y al oxígeno no son muy buenas y en un periodo de tiempo muy corto (entorno a los 10 días) se puede observar el crecimiento de microorganismos dentro del envase (Viteri, 2018).

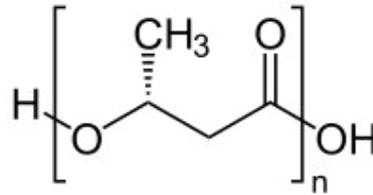


Ilustración 29 Estructura química del PHA. (Ana Carolina Lemos Delgado y Alexis Mina Cordoba., 2015)

iv. Quitosano para envases antimicrobianos

El quitosano es un polisacárido catiónico de origen natural, que contiene enlaces glucosídicos. Este compuesto se obtiene de la cáscara de los crustáceos y gambas. El carácter catiónico de este polímero le proporciona propiedades como, tiene elevada actividad antibacteriana, es biocompatible con el organismo y se puede procesar de manera fácil para obtener films.

El quitosano de alto peso molecular es un compuesto sumamente insoluble en agua, el cual solo puede disolverse en medio ácido. Un ejemplo podría ser el HTCC, usado para elaborar embalajes antimicrobianos debido a su facilidad de síntesis y su coste relativamente económico. En la actualidad el uso de este compuesto esta aun en desarrollo, pero se espera que sea muy usado en un futuro muy próximo.

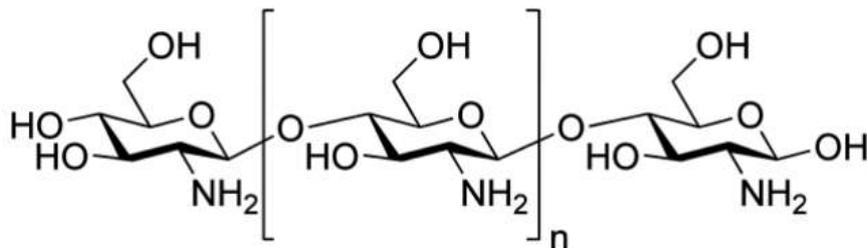


Ilustración 30 Estructura química del quitosano. (Zulay Mármol, Gisela Páez, Marisela Rincón, Karelén Araujo, Cateryna Aiello, Cintia Chandler y Edixon Gutiérrez, 2011)

❖ Industria médica

Una de las aplicaciones más importantes de los biopolímeros es en el campo de la medicina, donde desde hace ya miles de años se usaban polímeros biodegradables naturales como el colágeno. Sin embargo, el principal avance surgió a finales de los 60,

cuando comenzaron a usarse los polímeros biodegradables sintéticos, los cuales han abierto una puerta a la investigación en este campo.

Para asegurar que estos polímeros puedan ser usados de manera adecuada deben cumplir una serie de características básicas:

- En función del uso que se le vaya a dar deben tardar un periodo tiempo determinado en degradarse.
- No deben producir una respuesta inflamatoria cuando se introduzcan en el organismo.
- Deben tener unas propiedades mecánicas adecuadas a su uso.
- Que los polímeros a trasplantar puedan ser esterilizados sin ningún tipo de problema.
- Que los productos resultantes del proceso de degradación no sean tóxicos para el organismo receptor.

i. Polímeros empleados como suturas en cirugía

Dentro de este campo destaca el desarrollo de suturas absorbibles. Gracias a la creación de estos polímeros se evita tener que pasar por un quirófano para eliminar las suturas del organismo. No obstante, no todos los polímeros son apropiados para este uso. Para ello deben tener dos propiedades fundamentales:

- Tener buena resistencia a la elongación
- Degradarse en un periodo de tiempo relativamente corto.

Los polímeros más usados de este grupo son *ácido poliglicólico (PGA)*, *el ácido poliláctico (PLA)* y *la policaprolactona (PCL)*, aunque hoy en día se investigan más los copolímeros elaborados a partir de ellos, ya que se ha comprobado que estos copolímeros presentan mejores propiedades que los anteriores en solitario.

El PGA, que tiene tanto una temperatura de fusión (alrededor de 200°C) como una resistencia a la tensión muy elevada. Su degradación es relativamente rápida (primero por degradación hidrolítica y después por degradación enzimática). Del proceso de degradación se obtiene como subproducto ácido glicólico, un compuesto que no es dañino para el organismo ya que se puede eliminar en las células mediante el ciclo del ácido cítrico. No obstante, hay que tener cuidado con este compuesto ya que, si se produce un exceso de ácido glicólico, el órgano

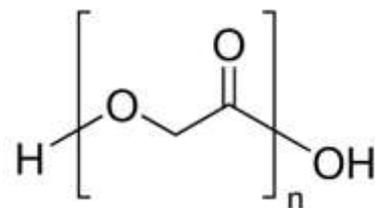


Ilustración 31 Estructura química del PGA.
(CymitQuimica.com, s.f.)

en el que se implanta la sutura normalmente responde a este compuesto de manera inflamatoria.

Debido a este problema, el PGA paso a segundo plano y se empezó a estudiar la posibilidad de usar PLA para fabricar suturas absorbibles, pero, se comprobó que, debido a la elevada cristalinidad de este polímero, los tiempos de degradación del mismo en el organismo serían muy elevados, en torno a 5 años, por lo que se descartó este polímero para este tipo de aplicación.

Posteriormente, se pasó al desarrollo de nuevos polímeros basados en los copolímeros de PGA y PLA, el más importante es el poli(láctico-co-glicólico), conocido como PLGA (ilustración 23). Este material ha adquirido gran importancia debido a que sus propiedades pueden adecuarse a medida. En concreto, su velocidad de degradación puede cambiar en función de la proporción de PLA y PGA que posea. En la actualidad existen diferentes productos comerciales que usan este compuesto para la fabricación de suturas. Destacan el *Vicryl* (con de 90% de PGA y 10% de PLA) y el *PuraSorb* (80% de PGA y 20% de PLA). El cambio de composición de dichos productos hace que este último posea una velocidad de absorción un poco mayor que el primero.

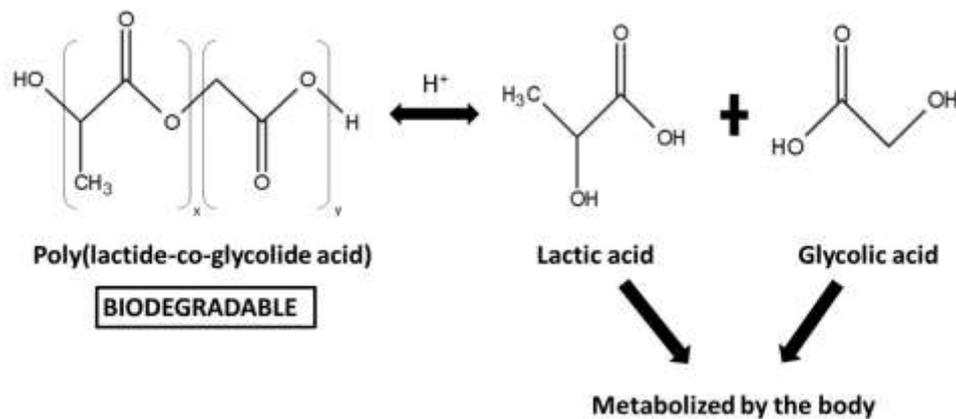


Ilustración 32 Estructura del PLGA. (Nanovexbiotech, 2014)

Por último, en relación a la policaprolactona (PCL) su uso es muy limitado en este campo ya que este material se degrada por hidrólisis en un periodo de tiempo relativamente largo (del orden de dos años) (Anexo C: Polímeros biodegradables con aplicaciones en suturas quirúrgicas, 2019), lo que hace que sea descartado para este uso. Sin embargo, este material es muy seguro ya que se reabsorbe completamente sin dejar ningún tipo de residuo en el organismo.

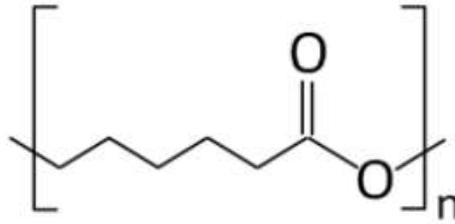


Ilustración 33 Estructura química del PCL. (Anexo C: Polímeros biodegradables con aplicaciones en suturas quirúrgicas, 2019)

ii. Aplicaciones de polímeros para la administración controlada de medicamentos.

La liberación controlada de medicamentos en el organismo constituye un factor muy importante dentro de la comunidad científica. El principal objetivo que tiene la misma consiste en incrementar el efecto que poseen los medicamentos en el organismo. Si se logra optimizar este proceso se impedirán muchos de los efectos secundarios que producen el consumo de los mismos.

Por ello, se están desarrollo nuevos polímeros orientados a cumplir este objetivo, cuyos compuestos deben de tener fundamentalmente dos características, la primera es que la matriz polimérica que posee el principio activo debe ser biodegradable para que cuando dicho medicamento haya cumplido su función, esta se eliminé del organismo y la segunda es que el polímero debe ser biocompatible con el organismo.

Dentro de esta aplicación, en la actualidad han adquirido mucha importancia los polianhídridos que, debido a su baja estabilidad hidrolítica y su naturaleza hidrofóbica, hace que estos compuestos se degraden muy rápidamente. Un ejemplo claro es el PCPP-SA, cuyo polímero se usa en quimioterapia para combatir al cáncer cerebral (Alba, 2016).

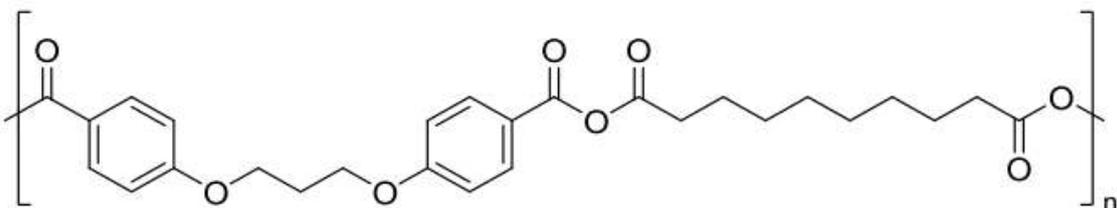


Ilustración 34 Estructura química del PCPP-SA . (Alba, 2016)

Sin embargo, los más importantes para esta aplicación son los poliésteres, especialmente el PLA o la PCL.

En relación al PLA, suele usarse el ácido poli-L-láctico (PDLLA) ya que su velocidad de degradación es muy elevada como consecuencia de que es un polímero amorfo. Del proceso de degradación se obtiene como subproducto ácido láctico, cuyo compuesto se transforma en CO₂ y agua a través del ciclo del ácido cítrico. Este material presenta una disminución en su masa cuando pasan entre 12 y 17 días y pierde sus propiedades mecánicas en un periodo de tiempo próximo a un mes (Bret D. Ulery, Lakshmi S. Nair and Cato T. Laurencin., 2012).

Por otro lado, en relación a la PCL, como ya se ha explicado en el apartado anterior tiene un periodo tiempo de degradación muy elevado (del orden de dos años), por ello se usa para la elaborar fármacos a largo plazo como la liberación de anticonceptivos o ciclosporinas (Diana Ramos Picos, Martha Gómez Carril, Dianelis Fernández Mena y Leopoldo Núñez, 2000).

iii. Polímeros empleados en ingeniería de tejidos.

Dentro del área de la ingeniería de tejidos, desde hace ya mucho tiempo, se usan polímeros naturales como el colágeno. El objetivo de estos polímeros es sustituir parcial o totalmente los tejidos deteriorados en el organismo. En este tipo de procedimiento se usa tanto en polímeros de origen natural como de origen sintético (Julio San Román, Alberto Gallardo, Blanca Vázquez y Antonio López Bravo, 2000).

Al igual que en el caso anterior los polímeros más usados son el PLA, el PGA y el PLGA. Los dos primeros se utilizan como matrices para células, es decir, su función consiste en regenerar los diferentes tejidos y el último se usa en la impresión en 3D, cuya aplicación ha permitido obtener grandes avances dentro de este campo (Piergiorgio Gentile, Valetia Chiono, Irene Carmagnola y Paul V Hatton, 2015).

iv. Polímeros empleados para la fabricación de membranas de diálisis

Estas membranas están fabricadas con diferentes tipos de polímeros como la celulosa, celofanes y polietilenglicol-metacrilato. Las mismas deben presentar unos requerimientos específicos, ya que tienen que ser capaces de eliminar todos los productos metabólicos de desecho (sodio, urea, cloruro, potasio, bicarbonato, ácido úrico, glucosa y creatinina) a una velocidad semejante a la fisiológica de un riñón natural (Lizarbe, 2007).

En la actualidad se ha investigado mucho para mejorar estas membranas a través de reticulaciones, copolimerización y soporte mediante fibras de otros polímeros como

por ejemplo el Nylon. De la misma manera se están utilizando membranas compuestas a partir de otros polímeros como el polietilenglicol (polímero formado por moléculas de óxido de etileno y agua) y polietileno tereftalato, cuyas membranas pueden filtrar selectivamente gracias a los componentes hidrofílicos e hidrofóbicos que poseen (Gabriela Polo Aguilar y José Iván Estrada Quintana, 2010).

2.2 Compostabilidad

El término “*compostable*” hace referencia al proceso de degradación que sufre un material tras ser atacado por los diferentes microorganismos, produciendo biomasa, dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos en un periodo de tiempo relativamente corto y bajo unas condiciones específicas (Sánchez, 2019).

Así, el compostaje se basa en el tratamiento aeróbico de las partes biodegradables de los residuos, gracias al trabajo realizado por determinados microorganismos y bajo condiciones específicas, produciendo compuestos más respetuosos con el medio ambiente (Europea D. , 1994).

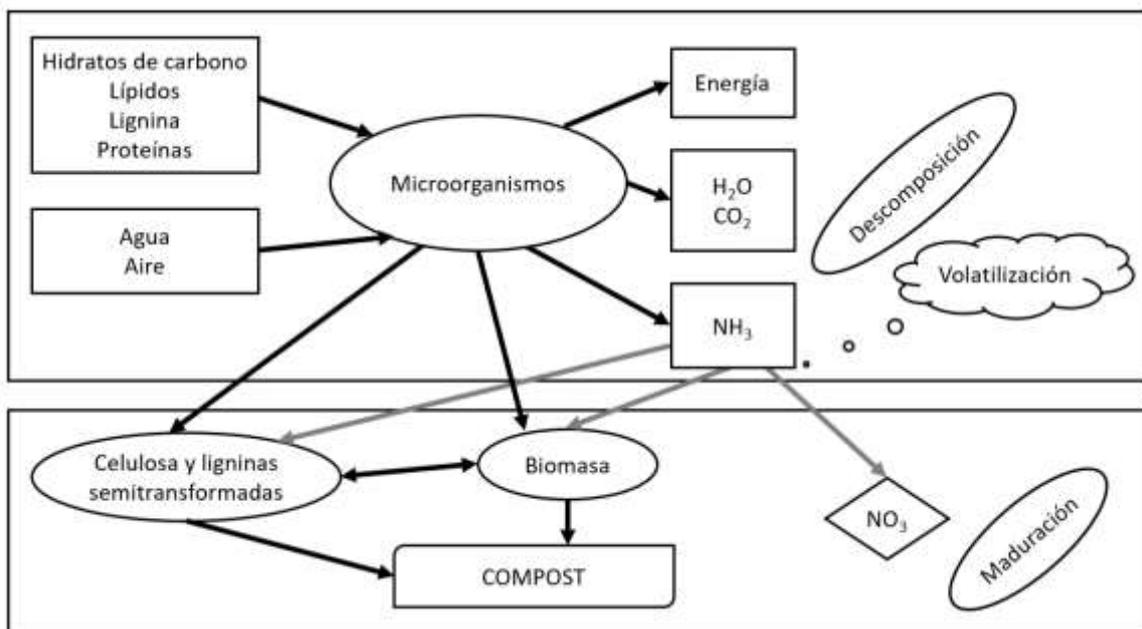


Ilustración 35 Esquema básico del proceso de compostaje.

Del proceso de compostaje tras la transformación de la materia orgánica se obtiene el compost. El compost representa un abono natural, cuyo material es óptimo para ser usado como fertilizante, ya que contiene muchas sustancias orgánicas útiles para el suelo. La aportación de sustancias orgánicas mejora la estructura del terreno y la biodisponibilidad de nutrientes (compuestos del fósforo y del nitrógeno).

Por ello, muchos investigadores estiman que el uso de un compost de calidad incrementaría la fertilidad del suelo ayudando a mejorar la estabilidad estructural del mismo, la capacidad de intercambio catiónico y la población microbiana encargada de mineralizar la materia orgánica. Además, un compost de calidad reduciría el actual problema de desertización que tenemos en España, ya que dos terceras partes de la superficie española presentan a este problema, siendo el riesgo muy elevado en determinadas áreas del territorio como las Islas Canarias, Murcia, Andalucía y la Comunidad Valenciana.



Ilustración 36 Porcentaje de superficie con riesgo de desertización en España. (Instituto Geográfico Nacional., 2020)

Los polímeros compostables pueden dividirse según la fuente de origen o el método de su preparación, como se muestra en la imagen siguiente:

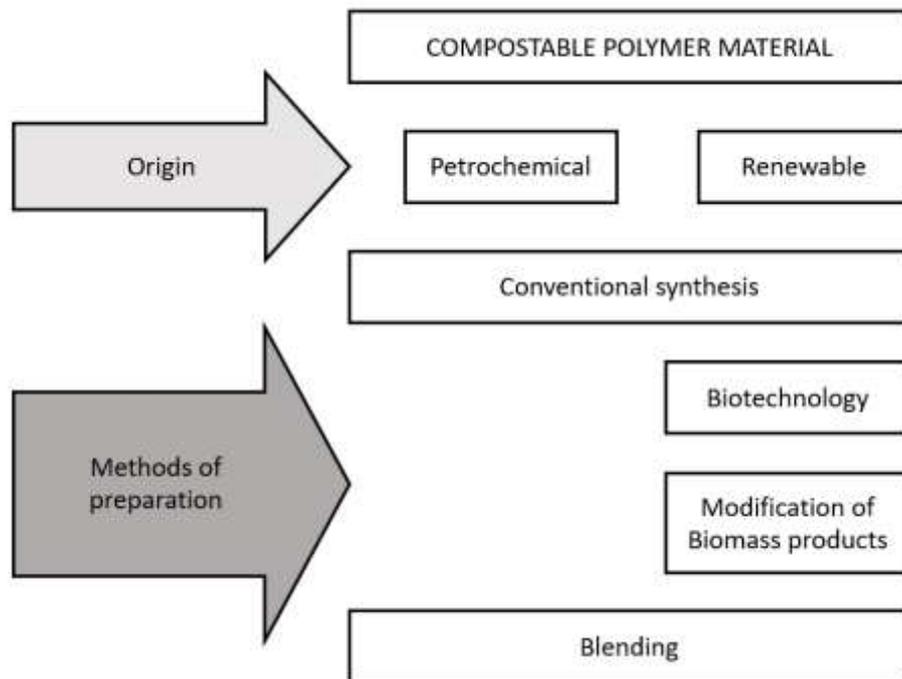


Ilustración 37 Clasificación de los polímeros compostables. (Adaptación de (Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics, 2012)

2.2.1 Etapas del proceso compostaje

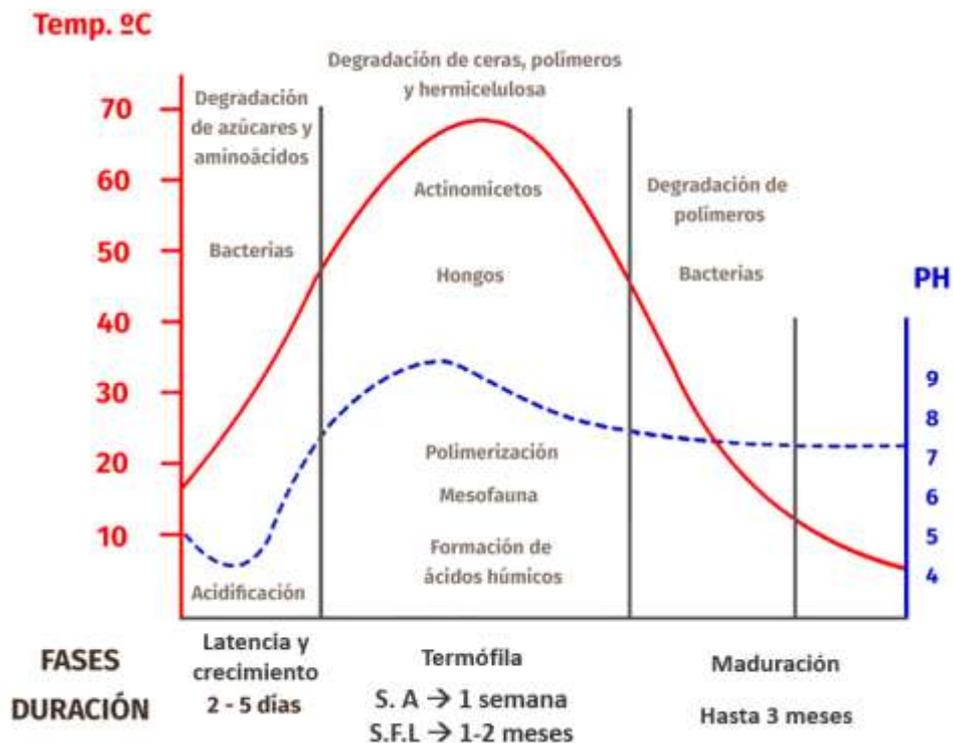


Ilustración 38 Etapas del proceso de compostaje.

Como se muestra en esta imagen el proceso de compostaje se divide en tres etapas:

❖ **Fase de latencia y crecimiento**

Constituye el proceso de adaptación de los diferentes microorganismos al nuevo medio y la fase de iniciación del proceso de colonización de los distintos residuos plásticos. En esta fase se produce la degradación de los elementos más biodegradables por acción de las bacterias mesófilas (bacterias que descomponen la materia orgánica a temperaturas entre 30 y 40 °C (EcuRed, 2020)). Este proceso suele durar entre dos y cinco días, dependiendo tanto del tipo de residuo como del microorganismo y durante el mismo se observa el incremento paulatino de la temperatura como consecuencia de que la pila de residuos se empieza a calentar provocando la difusión de vapor de agua por la parte superior de la materia vegetal.

❖ **Fase termófila**

En función del material de partida y las condiciones del medio, esta fase puede durar una semana, en sistemas acelerados o entre uno o dos meses si se trata de una fermentación lenta.

Debido a la fuerte actividad bacteriana y al incremento de temperatura en la pila de residuos, aparece un nuevo tipo de microorganismos, los microorganismos termófilos (hongos y bacterias), cuyos microorganismos descomponen la materia orgánica a temperaturas que oscilan entre los 60 y 70 °C (Villanueva, 2016). Las altas temperaturas de esta fase aseguran que se produzca la eliminación de gérmenes, semillas o larvas. Con el paso del tiempo, cuando pasan alrededor de dos meses la actividad biológica se reduce y el medio se estabiliza.

❖ **Fase de maduración**

Es la fase de fermentación lenta, pudiendo llegar a durar hasta 3 meses, donde se produce la degradación de la materia orgánica menos biodegradable, es decir, se produce la degradación de la materia orgánica más resistente. La temperatura de la pila de residuos va reduciéndose paulatinamente al igual que ocurre con la actividad bacteriana, momento en el cual la pila de residuos se encuentra colonizada por una gran diversidad de microorganismos, los cuales ayudan a que se produzca la degradación de las partes más resistentes del residuo.

2.2.2 Parámetros de seguimiento en el proceso de compostaje

i. Oxígeno

El oxígeno es imprescindible en el proceso de compostaje, ya que este elemento es el más se consume, como consecuencia de que los microorganismos que participan en este proceso son aerobios y necesitan del mismo para poder sobrevivir. En situaciones donde hay ausencia de oxígeno los microorganismos aerobios son sustituidos por anaerobios, cuyos microorganismos ralentizan el proceso y además generan gases contaminantes como metano (CH_4) o sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Werner Bidlingmaier, Verena Grauenhorst, Markus Schlosser and Joachim Müsken, 2007). En caso contrario, si hay demasiada cantidad de oxígeno se puede producir el enfriamiento de la masa y conseguir una desecación muy elevada, disminuyendo así la actividad metabólica de los diferentes microorganismos (Nengwu Zhu, Changyan Deng, Yuanzhu Xiong and Huiyue Qian, 2005).

El consumo de oxígeno varía dependiendo de la actividad microbiana y la etapa del proceso en la que se encuentre. En la primera fase del proceso la velocidad de fermentación de la materia orgánica es elevada y por ello la cantidad de oxígeno que se necesita es mayor. En la segunda y tercera fase la actividad de los microorganismos disminuye y como consecuencia el consumo de oxígeno se reduce. Cabe destacar que, aunque el sistema de aireación sea muy bueno, siguen existiendo zonas donde no hay oxígeno formándose microambientes anaerobios.

ii. Temperatura

El proceso de descomposición aeróbico es exotérmico, es decir, durante dicho proceso se libera energía en forma de calor. La temperatura se considera un parámetro de control dentro del proceso de compostaje, ya que indica si la actividad microbiana funciona de manera correcta. Al principio, todo el material se encuentra a la misma temperatura, pero con el tiempo al desarrollarse los diferentes microorganismos se produce calor y consecuentemente un aumento de la temperatura. La medición de la temperatura es muy sencilla y rápida, gracias a la ayuda de termómetros medidores de la misma. Además, numerosos estudios muestran como pequeñas variaciones en la temperatura afectan de manera muy directa a la actividad microbiana (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.).

Dependiendo de la fase en la que se encuentre el proceso la temperatura irá cambiando como se ha explicado en el apartado anterior, ya que cada especie de microorganismos tiene un rango de temperaturas óptimo, donde su actividad metabólica es mayor. Para microorganismos mesófilos el rango de temperaturas óptimo va desde los 15 °C a los 40 °C y para microorganismos termófilos desde los 40 °C a los 70 °C (D. J. Suler and M. S. Finstein, 1976). Se dice que el proceso de compostaje finaliza cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial.

iii. pH

El pH es un parámetro que influye de manera directa en el proceso de compostaje debido a su acción sobre los procesos microbianos. El método de medida del pH se realiza en el laboratorio sobre un extracto acuoso, donde los resultados obtenidos del mismo se consideran una aproximación al pH obtenido “in situ” (Cecilia Sundberg, Sven Smars and Hakan Jönsson., 2004). Además, gracias a la medida del pH se puede controlar la cantidad de oxígeno (aireación) que se necesita, ya que, si en algún momento se forman condiciones anaerobias, se liberarán ácidos orgánicos que provocarán una reducción del pH.

Al igual que la temperatura en función de la fase en la que nos encontremos habrá un valor de pH diferente. En la primera fase, se observa una reducción del pH hasta valores ácidos (4-6) como consecuencia de la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más débil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Esta bajada de pH normalmente se produce como consecuencia de que existen pequeñas áreas anaerobias. En la segunda fase, se produce una subida de pH hasta valores básicos (8-10), como consecuencia a la pérdida de los ácidos orgánicos y la formación de amoníaco. Por último, en la tercera fase del proceso el pH desciende a valores muy cercanos a la neutralidad (7), debido a la formación de compuestos húmicos, cuyos compuestos poseen propiedades tampón (Miguel Ángel Sánchez Monedero, Asunción Roig, Concepción Paredes y María Pilar Bernal., 2001).

Un proceso de compostaje ideal es el que conduce a productos finales con un valor de pH entre 7 y 8, ya que valores muy bajos de pH indican atmósferas anaerobias y por tanto que el producto aún no está maduro y valores muy elevados favorecen la formación de amonio, cuyo compuesto afecta muy gravemente a la actividad y desarrollo de los

diferentes microorganismos (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.).

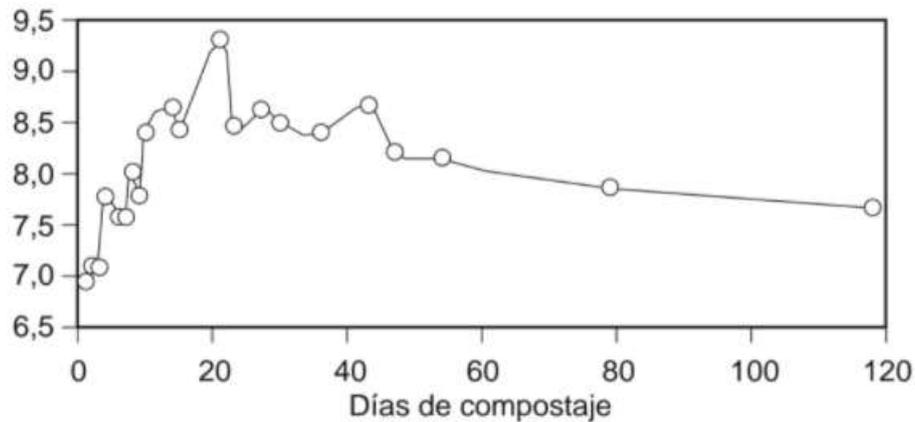


Ilustración 39 Evolución del pH en el proceso de compostaje. (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008)

iv. Humedad

El agua en el proceso de compostaje es esencial para el desarrollo de las diferentes actividades de los microorganismos, ya que es el medio de transporte para las sustancias solubles (alimento) y de productos de desecho de las reacciones que se forman en dicho proceso.

Para medir la humedad es necesario conocer la porosidad de los sustratos a compostar o su espacio libre entre partículas (parámetro que se explicará a continuación), ya que se debe asegurar que el oxígeno puede circular a lo largo de todo el material a compostar y así evitar crear zonas anaerobias. Además, la humedad debe permitir la circulación de los gases producidos en las diferentes reacciones que tengan lugar (Fumihito Miyatake and Kazunori Iwabuchi., 2006).

La humedad óptima para el desarrollo microbiano está en el intervalo entre 50-70%, ya que una humedad por debajo del 30% hace que la actividad biológica de los microorganismos decaiga drásticamente y valores de humedad por encima del 70% hacen que el aire en los espacios libres entre partículas se desplace provocando la creación de zonas anaerobias, como consecuencia de la reducción de oxígeno en las mismas (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.).

v. Espacio de aire libre

Este parámetro surge como consecuencia de la necesidad de crear un valor que dé una idea relativa de la cantidad de agua y aire en la masa del compostaje. Por ello Shulze en el año 1962, usa por primera vez el concepto de espacio de aire libre (FAS), cuyo concepto relaciona los contenidos de humedad (H), densidad real (Dr), densidad aparente (Da) y la porosidad (P). Este parámetro se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$FAS = P \left(1 - \frac{H}{100} \right) \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

- $P = \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right)$
- FAS, H y P se miden en % y Da y Dr en g/cm³.

En el año 1973, Jeris y Regan, realizaron diferentes estudios con numerosos residuos y establecieron que el proceso de compostaje se producía de manera más rápida cuando se trabajaba con valores de FAS entre el 30-35 %, independientemente de la naturaleza del residuo a tratar (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.). Además, se comprobó que cuando humedad es muy elevada el valor del FAS disminuye y el producto obtenido se compacta. Por el contrario, cuando la humedad es muy baja los espacios libres entre partículas serán ocupados por aire, aumentando la densidad aparente y consecuentemente el valor del FAS.

2.2.3 Parámetros relativos a la naturaleza del residuo

i. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es un parámetro esencial en el proceso del compostaje, ya que cuanto más grande sea la superficie de contacto expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, con mayor rapidez se producirán las reacciones. Por tanto, cuanto menor sea el tamaño de partícula mayor será la degradación de los diferentes materiales como consecuencia de una mayor accesibilidad de los microorganismos. No obstante, un tamaño de partícula muy fino disminuye el espacio entre partículas, reduciendo la cantidad de oxígeno entre las mismas (posibilidad de aparición zonas anaerobias), provocando la ralentización del proceso de compostaje (Haug, 1993). Además, un tamaño de partícula muy fino también incrementa la compactación del material.

Según distintos autores, las dimensiones óptimas de tamaño de partícula son:

- Partículas en un rango entre 1-5 cm (Haug, 1993).
- Partículas en un rango entre 2-5 cm (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.)

ii. Nutrientes

Los nutrientes en los diferentes sustratos a compostar son esenciales porque pueden limitar o favorecer el desarrollo de los microorganismos, además, según los elementos que formen esos nutrientes el producto final será usado para una aplicación u otra.

Normalmente los elementos que componen los nutrientes son el C, N y P, cuyos elementos son imprescindibles para el desarrollo de los microorganismos. El carbono se necesita para la síntesis celular en la creación del protoplasma, además, se usa para formar lípidos, grasas y carbohidratos. Del mismo modo, este elemento se oxida durante el metabolismo para producir energía y CO₂. Este elemento debe estar presente en una cantidad elevada como consecuencia de que constituye el 50% de las células de los organismos y el 25 % del CO₂. Por otro lado, el nitrógeno es esencial para realizar la reproducción celular debido de la naturaleza proteica del protoplasma, Además, se ha comprobado que la calidad del compost se relaciona directamente con la cantidad de N que contiene. Por último, el fosforo es imprescindible porque se usa para formar compuestos ricos energéticamente, por tanto, es necesario porque participa en el metabolismo microbiano (Fuentes, 2015).

Existen otros nutrientes que se usan en cantidades menores, normalmente conocidos como micronutrientes, que también tienen un papel muy importante para la síntesis de enzimas, el metabolismo y los mecanismos de transporte intra y extra celular (Fumihito Miyatake and Kazunori Iwabuchi, 2006). Algunos micronutrientes son: Ca, Mg, Cu, Cl, Bo, Fe, Se, Na, Mn, Zn y Mo. Cabe destacar, que la cantidad de estos elementos debe estar limitada ya que en concentraciones superiores a las necesarias pueden ser tóxicos para los diferentes microorganismos.

iii. Relaciones C/N

Para un proceso de compostaje óptimo en el que se aproveche la mayor cantidad de C y N, la relación de C/N del material a compostar debe ser correcta. Los

microorganismos suelen usar 30 partes de C por cada N, por ello se considera que el rango de C/N óptimo para el compostaje teóricamente está entre 25-35 (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008).

La relación C/N es un parámetro esencial en el proceso de compostaje ya que afecta tanto a la velocidad como a la pérdida de amonio del proceso. Si el valor de la relación de carbono nitrógeno es superior a 40 la actividad biológica se reduce y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono, lo que provocaría una ralentización del proceso, como consecuencia de la ausencia de nitrógeno para la síntesis proteica de los diferentes microorganismos. Cuando estos microorganismos mueren el nitrógeno contenido en su biomasa se recicla y consecuentemente la relación C/N disminuye. Por otro lado, si la relación C/N es muy baja (18-19) el proceso de compostaje es muy rápido como consecuencia del crecimiento acelerado de los microorganismos. Sin embargo, esto provoca un agotamiento de las reservas de oxígeno, al mismo tiempo que libera el exceso de nitrógeno en forma amoniacal, produciendo malos olores y desperdiciando N, elemento esencial como nutriente. Por ello es aconsejable que al terminar el proceso de compostaje la relación C/N sea inferior a 20/1. A continuación, se muestra una imagen representativa de como varía la relación C/N durante las diferentes fases del proceso de compostaje.

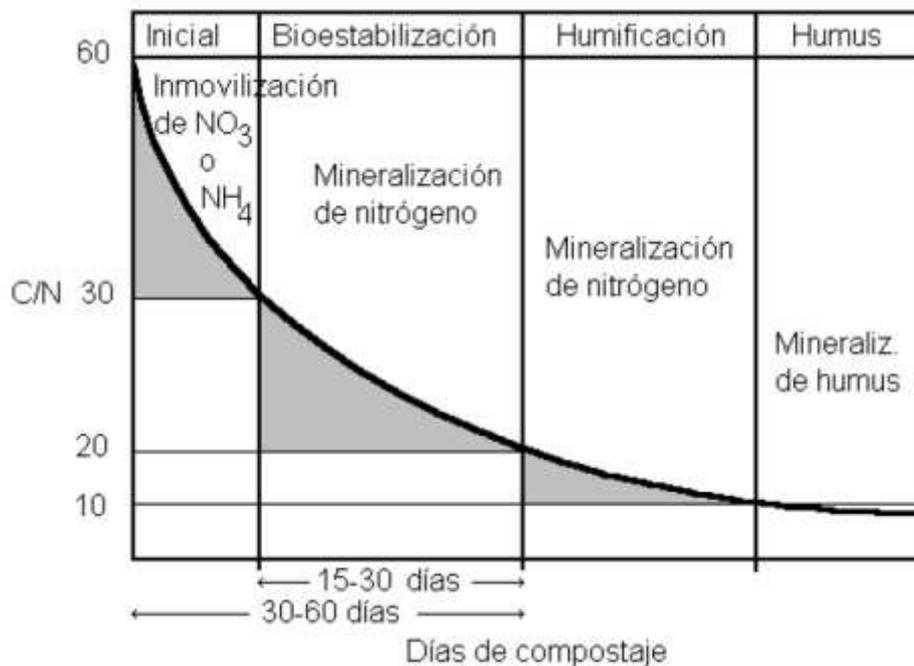


Ilustración 40 Evolución característica de la relación C/N durante el proceso de compostaje. (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.)

iv. Materia orgánica

La cantidad de materia orgánica es un parámetro fundamental para determinar la calidad del compost. La materia orgánica es biotransformada mediante reacciones de oxidación-reducción catalizadas por enzimas. Estas enzimas catalizan la hidrólisis de los polímeros más abundantes de origen vegetal y animal que no pueden pasar a través de las membranas de los microorganismos. Dichos microorganismos normalmente usan nutrientes solubles en agua, por lo que los polímeros que no tengan esta característica serán difíciles de biodegradar.

Durante el proceso de compostaje la cantidad de materia orgánica disminuye como consecuencia a la mineralización de la misma y la pérdida de carbono en forma de CO_2 . Estas pérdidas pueden llegar a alcanzar hasta el 20% en peso de la masa compostada (Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan.). La disminución de la materia orgánica se produce en dos fases. En la primera fase se produce una disminución de los carbohidratos, donde se produce la rotura de las cadenas más largas en otras más cortas dando lugar a compuestos más simples. Dichos compuestos se unen con otros formando los llamados compuestos húmicos. Por otro lado, en la segunda fase, los compuestos más resistentes (ligninas) se van degradando y transformando en compuestos húmicos (U.Tomati, E.Galli and E.Madejon., 2000). Algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son usados por los microorganismos para desarrollar sus tejidos y otros son transformados en CO_2 y agua.

La velocidad de transformación de la materia orgánica varía en función de su naturaleza, de los microorganismos presentes en el medio y de las condiciones físico-químicas del proceso (pH, temperatura, humedad y cantidad de oxígeno).

Las pérdidas de peso debido tanto a la mineralización de la materia orgánica como a las de otros nutrientes durante el proceso de compostaje se pueden determinar mediante un balance de materia. En la ilustración siguiente se muestra un esquema del balance de materia del proceso de compostaje.

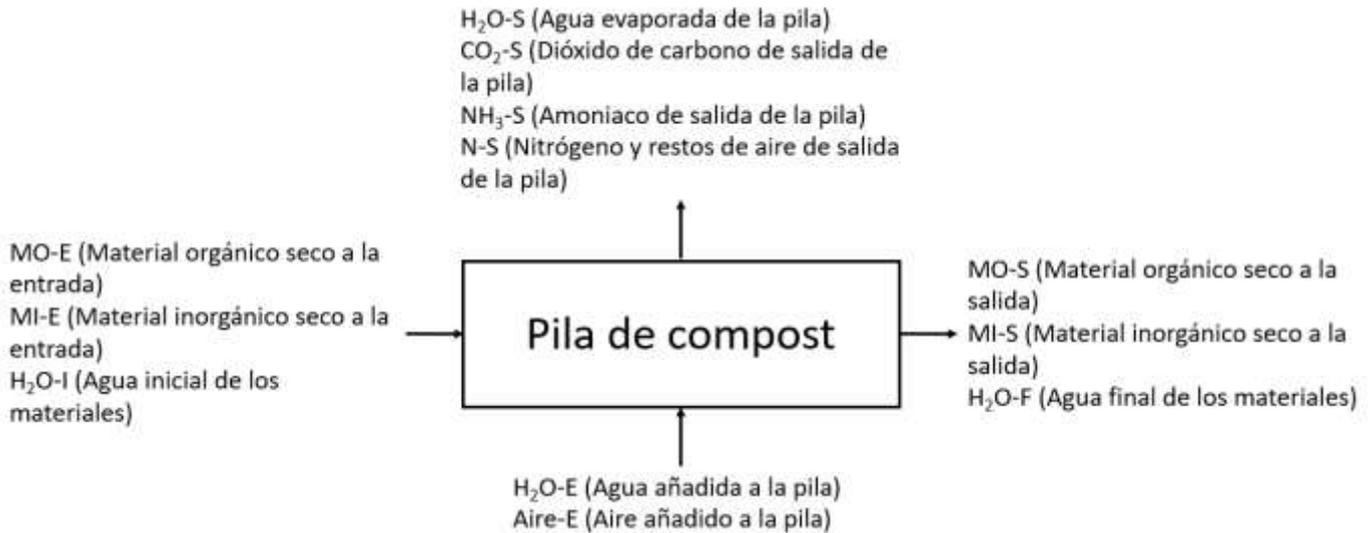


Ilustración 41 Esquema del balance de materia del proceso de compostaje.

El cual se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$MO - E + MI - E + H_2O - I + H_2O - E + Aire - E = H_2O - S + CO_2 - S + NH_3 - S + N - S + MO - S + MI - S + H_2O - F \quad \text{c.3}$$

Donde los valores del H_2O-E , la masa total de entrada ($MO-E+MI-E+H_2O-I$) y la masa total de salida ($MO-S+ MI-S+H_2O-F$) son conocidos y el resto de valores ($Aire-E$, H_2O-S , CO_2-S y NH_3-S) se pueden obtener a partir de las composiciones elementales a la entrada y a la salida del producto.

Para averiguar la cantidad de producto final ($MO-S$ y $MI-S$) se necesita conocer la biodegradabilidad de la materia orgánica inicial. La biodegradabilidad muestra la cantidad de materia orgánica que puede degradarse en una mezcla o compuesto determinado. Esta puede determinarse mediante un balance de materia. Dentro de este balance se tiene que tener en cuenta que la cantidad de cenizas se mantiene constante a lo largo de todo proceso de compostaje. Así, se define un coeficiente de degradación k_b a partir de la concentración de cenizas o de la materia orgánica al inicio y al final del compostaje. Dicho parámetro se expresa a partir de la siguiente ecuación (Haug, 1993):

$$K_b = \frac{[(C_f - C_i)100]}{C_f(100 - C_i)} \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

- C_i y C_f hacen referencia a los porcentajes de cenizas al inicio y al final del proceso de compostaje.

Esta ecuación también se puede expresar en función de la materia orgánica en vez del porcentaje de cenizas de la siguiente forma:

$$K_b = \frac{[(MO_i - MO_f)100]}{MO_i(100 - MO_f)} \quad \text{Ec.5}$$

v. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de un material hace referencia a la capacidad que tiene el mismo de conducir la electricidad. Este parámetro varía en función de la naturaleza y composición del material, es decir, está determinada por su concentración de sales y la presencia de iones nitrato y amonio que presente durante el proceso. Normalmente este parámetro es más grande conforme va desarrollándose el proceso de compostaje como consecuencia del aumento de la concentración de nutrientes, no obstante, algunas veces puede disminuir debido al exceso de lixiviación de la masa (M. A. Sánchez Monedero, A. Roig, C. Paredes y M. P. Bernal, 2001).

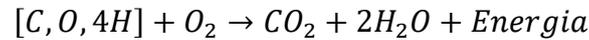
Es imprescindible conocer y controlar la cantidad de sales de un compost. Cuyo valor debe ser proporcional a la concentración de sales del suelo en el que se vaya a añadir y al tipo de cultivo, ya que un exceso de sales puede provocar que los cultivos no se desarrollen de manera adecuada, debido a que esta impide la absorción de agua a través de las raíces de los mismos.

2.2.4 Reacciones más importantes producidas durante el proceso de compostaje

Durante el proceso de compostaje suelen aparecer diversas reacciones como consecuencia de las condiciones del mismo compost. Por ello, a continuación, se va a explicar de manera simplificada las reacciones más importantes que tienen lugar durante el compostaje. Por un lado, se encuentran las reacciones producidas durante la respiración celular y la fermentación, cuyos procesos son imprescindibles para que los diferentes microorganismos heterótrofos (levaduras, hongos y bacterias) presentes en el compost tengan la energía suficiente para poder sintetizar el nuevo material celular. Por otro lado, se encuentran las reacciones de nitrificación y desnitrificación, cuyos procesos son esenciales para eliminar el nitrógeno de los diferentes residuos.

❖ Respiración celular

La respiración celular puede realizarse en presencia de O₂ (aerobia) o en ausencia del mismo (anaerobia). La forma más simple de respiración celular aerobia se puede expresar de la siguiente forma:



Esta reacción es imprescindible para la realización de la actividad microbiana en presencia de oxígeno y producirá la energía suficiente para las diferentes reacciones metabólicas, desarrollando nueva biomasa y generando nuevos subproductos que servirán de punto de partida para las reacciones posteriores. Estos microorganismos usaran fundamentalmente oxígeno como agente oxidante.

Por otro lado, en relación a la respiración celular anaerobia no se usará O₂ y por tanto se emplearán otros aceptores de electrones para obtener la energía, como son los sulfatos (SO₄⁻²), los nitratos (NO₃⁻) y los carbonatos (CO₃⁻²). El empleo de estos aceptores de electrones normalmente producirá menor energía (debido a los menores potenciales de reducción), productos olorosos, y compuestos indeseables como el metano (CH₄), ácido sulfhídrico (H₂S) y amoníaco (NH₃) (Villanueva, 2016).

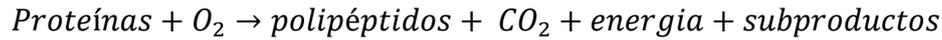
En el compostaje es preferible la respiración aerobia a la anaerobia, ya que de este proceso se obtiene mayor cantidad de energía, es más eficiente y no produce tanta cantidad de compuestos olorosos. (Service, 2000).

❖ Fermentación metabólica

Representa el proceso más simple para producir energía, ya que no necesita oxígeno, pero también es el proceso menos eficiente. La mayor parte de los productos obtenidos son productos finales y no sustituyentes celulares.

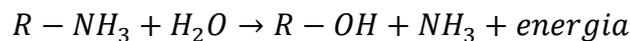
La energía producida mediante este proceso es bastante menor que la obtenida en la respiración celular y el aceptor final de electrones es una molecular orgánica, normalmente piruvato (H₃C-CO-COOH) o acetaldehído (CHO-CH₃).

Los compuestos orgánicos nitrogenados de los residuos a compostar serán degradados por oxidación enzimática en cadenas amínicas más pequeñas que puedan ser sintetizadas por los microorganismos o degradadas en productos más sencillos, como se muestra en la siguiente expresión:

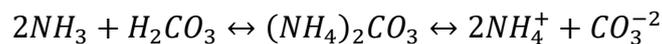


Los polipéptidos, pueden degradarse en elementos más simples como son oligoelemento y posteriormente en aminoácidos.

Los productos obtenidos de la digestión de proteínas y de las cadenas peptídicas sólo se usarán para la síntesis de material celular nuevo en caso de disponer de suficiente carbono. Si no fuese así, porque no se dispone de suficiente carbono o por tener exceso de nitrógeno, las aminas resultantes acabarían dando lugar a un proceso de amonificación como el siguiente:

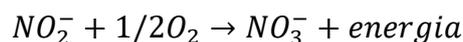
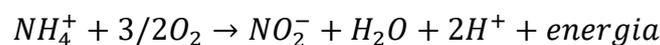


Cuyo proceso siempre se desplazará al equilibrio, cuando consiga tener una temperatura y pH adecuado.

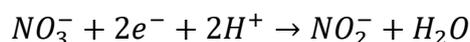


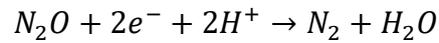
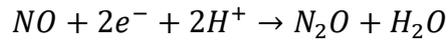
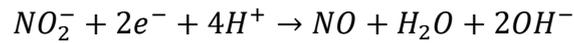
Si el proceso se produce en condiciones ácidas se favorecerá la formación de amonio (NH_4^+), en cambio si se produce en condiciones básicas se favorecerá la formación de amoníaco (NH_3). Por otro lado, un aumento de temperatura también favorecerá la formación de amoníaco.

Otra de las reacciones más importantes involucradas en el proceso de compostaje son las reacciones de nitrificación y desnitrificación. En relación a las reacciones de nitrificación, se producen en el proceso de curado, donde tiene lugar la transformación de los nitritos (NO_2^-), compuestos tóxicos, en nitratos (NO_3^-) (Ing. Daniel Sztern, MGA, Lic. Miguel A. Pravia, Oficina de Planeamiento y Presupuesto y Unidad de Desarrollo Municipal), como se muestra en las siguientes expresiones:



Por otro lado, están las reacciones de desnitrificación, donde diversos microorganismos aerobios pueden adaptarse a medios anaerobios en caso de no disponer de O_2 y realizar la respiración celular anaerobia usando los nitratos, como se muestra a continuación:





2.2.5 Sistemas de compostaje industrial: Pila y túnel

En la actualidad hay diferentes métodos de compostaje industrial, los cuales se diferencian en parámetros como la forma en la que se coloca el residuo, el movimiento del mismo o el nivel de aislamiento, cuyos parámetros deben ajustarse en función de las necesidades del producto, para darle la calidad precisa a su uso. Cabe destacar, que el compost obtenido en el proceso de compostaje también depende de las características físicas-químicas del residuo inicial y de los parámetros usados a lo largo del proceso, como se ha explicado en el apartado anterior.

En función de la movilidad del residuo se usan o bien sistemas estáticos o sistemas dinámicos. En los primeros, los residuos a compostar se almacenan y se mantienen en reposo, de manera que la aireación es natural, es decir, se produce como consecuencia del movimiento natural del aire debido a la difusión molecular, al viento y/o a la convección térmica (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008). La mayor parte de los sistemas de compostaje pasivos necesitan una agitación periódica del material para controlar la temperatura y el restablecimiento del espacio poroso facilitando los procesos de convección y difusión.

Por otro lado, en los procesos de aireación forzosa, el aire se introduce gracias a la ayuda ventiladores, soplantes o mediante la aspiración del aire que pasa por el material a compostar. La circulación del aire suele ser más eficaz cuando se trabaja a presión negativa debido que la pérdida de presión es favorable, pero esto provoca la obstrucción de los conductos de aireación. En estos sistemas, el aire se introduce de manera continua, en la que el flujo varía en función de la fase en la que se encuentre el proceso.

Dependiendo de la forma física del material se establecen tres tipos de sistemas de compostaje; en pilas (línea de sección triangular), trincheras (línea de sección cuadrangular y encajada entre dos tabiques de hormigón) y mesetas (línea de sección trapezoidal). Por otro lado, en función del nivel de aislamiento del material se fijan tres tipos de sistemas; El primero de ellos son los sistemas abiertos, en los cuales el proceso de compostaje se realiza al aire libre, donde los residuos se depositan en forma de

montones o pilas encima de un suelo de hormigón habilitado con arquetas para la recogida de lixiviados. Es el sistema más barato y antiguo que existe, sin embargo, al estar expuesto a las condiciones ambientales de la zona, su control es bastante complicado. Dentro de estos sistemas se distinguen dos tipos: los de pila móvil (volteo mecánico del material permite la oxigenación) y los de pila estática (sin volteo mecánico del material, la oxigenación se hace soplando aire, por succión o mezcla de ambos). En segundo lugar, se encuentran los sistemas semicerrados, en los cuales el proceso de compostaje se realiza en grandes naves cerradas que disponen de sistemas de extracción y depuración de gases internos mediante una red de tuberías instaladas en la parte superior de dichas naves, que trasladan el aire contaminado de gases y partículas hasta un biofiltro. Este sistema permite controlar mejor el proceso gracias a que se puede medir y ajustar la temperatura, la humedad y la aireación dentro de la nave. En tercer lugar, están los sistemas cerrados, en los que los residuos a compostar no se encuentran en contacto con el exterior. Estos sistemas son los que mayor control de las condiciones del proceso tienen (humedad, temperatura, pH y aire tanto de entrada como de salida del sistema), gracias a la ayuda de un sistema de sondas colocadas en puntos específicos del sistema. Además, los lixiviados y gases contaminantes son recogidos, recirculados y/o tratados para su descontaminación y los tiempos del proceso de compostaje se acortan de manera considerable. Sin embargo, presentan una serie de inconvenientes como son tiene elevados costes de inversión, mantenimiento y energéticos, e implican el empleo de un reactor o digestor que puede ser horizontal o vertical, donde se realiza la primera fase del proceso para posteriormente dejar madurar el material en el exterior del reactor. Dentro de estos sistemas se distinguen tres tipos: sistemas dinámicos (volteo del material), estáticos (sin volteo del material) y reactores horizontales, verticales y en túnel. En este sistema los lixiviados y gases contaminantes son recogidos, recirculados y/o tratados para su descontaminación.

Por tanto, se puede decir que la diferencia fundamental de los diferentes sistemas de compostaje que existen en la actualidad es el tiempo que dura el tratamiento, el equipamiento y la mano de obra necesaria para la realización del mismo.

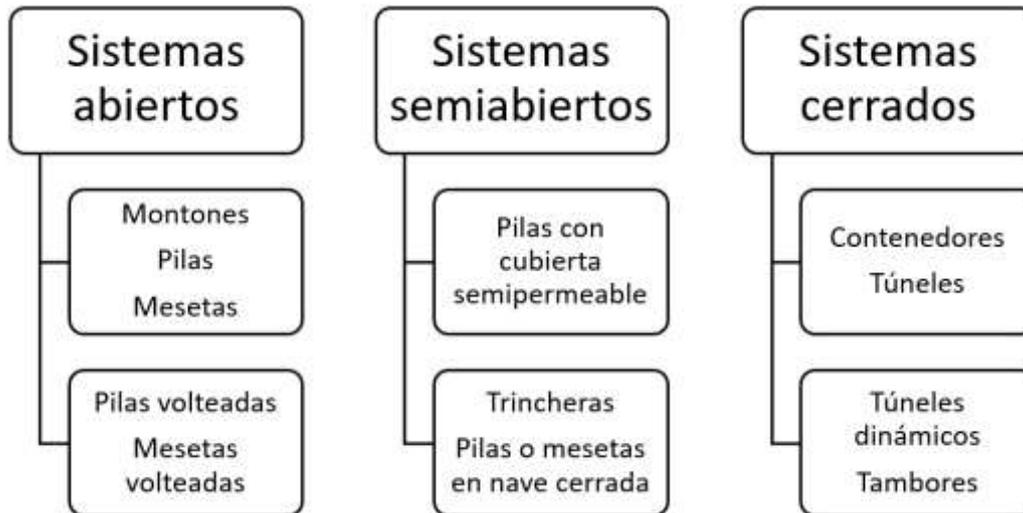


Ilustración 42 Sistemas de compostaje.

A continuación, a modo de ejemplo se desarrolla de manera más detallada los dos sistemas de compostaje más usados en España y en Europa, que son compostaje mediante pila volteada y compostaje en túnel estático.

i. Compostaje en pila volteada

Este tipo de sistema de compostaje es el más usado tanto en España como en Europa. Esta tecnología es relativamente sencilla y barata, sin embargo, se necesitan grandes espacios para poder mover la masa durante los volteos. Para poder realizar el volteo de la masa se usan máquinas volteadoras específicas diseñadas para ello o gracias a la ayuda de palas cargadoras.

El residuo a compostar se coloca en pilas de sección triangular. La amplitud y altura de la pila varía en función del tamaño de partícula para impedir que se produzcan apelmazamientos de la masa del material y tener un valor de FAS adecuado para el tratamiento. Normalmente, las pilas suelen tener una altura entre 2-2,5 m, una base de 3-4 m y una longitud de 15-20 m (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008). Además, en algunos casos para mantener la porosidad se necesita añadir un material estructurante, normalmente se usan materiales celulósicos.

Las plantas presentan programas de volteos periódicos adaptados en función de la fase de compostaje en la que se encuentre, garantizando así niveles de humedad, temperatura y oxigenación adecuadas.

Las ventajas y desventajas de este sistema están asociadas al volteo periódico. En relación a las ventajas se obtiene una mayor homogenización del material, lo que favorece a la disminución del tamaño de partícula y al volumen de la masa total. Al mismo tiempo, que garantiza una higienización de la masa del material como consecuencia de que el material se hace pasar por la zona central de la pila, donde la degradación es mayor debido a que en el centro las temperaturas son más elevadas. Los volteos también pueden influir de manera positiva sobre la estructura física de la mezcla y las condiciones de aireación, aumentando su porosidad en aquellos sistemas en los que la ventilación forzada no es eficaz debido a la mala distribución de aire dentro de la masa. Por otro lado, en relación a las desventajas, al estar sujetos a una aireación periódica, no mantienen un nivel de oxigenación constante por lo que el proceso se desarrolla más lentamente, pudiendo llegar a durar hasta 100-120 días para alcanzar niveles de estabilización adecuados. Además, se considera menos efectivo que los sistemas de pila estática en lo que se refiere a la eliminación de patógenos como consecuencia a la reinoculación durante el volteo de aquellos microorganismos situados en zonas no sometidos a temperaturas elevadas.



Ilustración 43 Sistema de compostaje en pila volteada.

(Tortosa, 2015)

ii. Túneles estáticos

Los túneles estáticos, normalmente fabricados con hormigón, son contenedores cerrados con ventilación controlada y programas de medición (temperatura, pH, humedad y oxigenación), que puede tener sistemas de mezcla interna. Estos contenedores tienen una anchura de 4-5 m, una altura de 3 m y un fondo de 20-30 m (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008). Estos sistemas poseen una red de aireación forzosa, la cual está formada por un conjunto de tubos bajo el suelo a través de los cuales se insufla aire a sobrepresión. Además, el suelo está formado por conductos distribuidos a lo largo del contenedor por donde sale el aire. Este aire se recircula de manera continua para mantener la temperatura del material en todo el sistema. También presenta una red de aspersores en la parte superior de los contenedores donde normalmente se recirculan los lixiviados permitiendo reutilizar los residuos del proceso, disminuyendo así la de gestión posterior de los mismos.

El túnel o contenedor suele llenarse hasta dos tercios de la altura del mismo y en él se realiza la fase bio-oxidativa del proceso en la que el control de la temperatura, las necesidades de oxígeno, regado y regeneración de gases son más minuciosas y constantes. Esta fase dura entre 2 o 6 semanas (Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero, 2008). Cuando transcurre este tiempo, se procede a pasar a la siguiente fase (fase de maduración), la cual dura, si se realiza en una pila entre 2-4 meses, manteniendo los riegos y volteos, pero si se realiza en otro túnel suele durar 2 semanas.

Este sistema permite un elevado control de los parámetros de seguimiento del proceso de compostaje gracias que disponen de un software que permite medir de manera automática dichos parámetros. Esto facilita la realización del proceso de compostaje ya que si ocurriera algún problema sería muy sencillo realizar correcciones de manera manual.

Por tanto, estos sistemas presentan la ventaja principal de que el tiempo de realización del proceso de compostaje se ve reducido notablemente, característica muy importante cuando se tienen que tratar grandes cantidades de residuos. Además, el hecho de ser un sistema estático y la automatización que tiene permite controlar y tratar de manera más eficiente los gases contaminantes y los lixiviados formados. Por otro lado, en relación a las desventajas que presenta este sistema, es que es un sistema muy costoso,

ya que el nivel de automatización que presenta requiere elevadas inversiones de mantenimiento.



**Ilustración 44 Sistema de compostaje en túnel.
(Tortosa, 2015)**

3. OBJETIVOS DEL PRESENTE TFM

El principal objetivo de este trabajo es el estudio de la biodegradabilidad y compostabilidad de los diferentes tipos de plásticos. Además, de organizar la normativa de manera clara para ayudar a los consumidores y la población en general a entender mejor dichos conceptos e incentivar a los mismos a usar compuestos biodegradables y evitar en la medida de lo posible usar plásticos de un solo uso, ya que como se ha desarrollado en el apartado de la introducción dichos compuestos son perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Por último, se van a mostrar los distintos organismos certificadores de plásticos biodegradables y compostables que existen en la actualidad para determinar cuantitativamente la biodegradabilidad y la compostabilidad de dichos materiales y garantizar que dichos productos cumplen con la normativa vigente y poseen unas características de calidad adecuadas.

4. ESTRUCTURACIÓN DE LA NORMATIVA RELATIVA A PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y COMPOSTABLES

Debido a la gran cantidad de plástico existente en nuestro entorno y a sus efectos nocivos, se han buscado soluciones para diseñar y caracterizar plásticos biodegradables y compostables.

En la actualidad la mayor parte de los plásticos considerados como biodegradables sólo se degradan en condiciones determinadas y muy difícilmente se pueden encontrar en el medio natural. Además, la biodegradación en el medio marino es especialmente complicada y casi inviable. Del mismo modo, los plásticos compostables no son necesariamente adecuados para la producción doméstica de compost. Por ejemplo, no todos los plásticos son apropiados para usarse como compost, ya que, si se mezclan plásticos compostables y plásticos convencionales en el proceso de reciclado, esto puede afectar tanto a la calidad de los materiales reciclados como del compost. Por ello, es esencial la existencia de un sistema de recogida selectiva de residuos orgánicos que funcione adecuadamente.

Es importante garantizar que los ciudadanos cuenten con la información necesaria de manera clara y establecer campañas de concienciación en la que los plásticos biodegradables no se muestren como una solución a la generación de residuos sino como un fin a cumplir. Esto se puede alcanzar definiendo qué plásticos pueden ser etiquetados como «biodegradables» o «compostables» y qué tratamientos se les puede aplicar después de su uso. Deberán localizarse aplicaciones con claros beneficios medioambientales y, en estos casos, la Comisión Europea establecerá medidas destinadas a impulsar la innovación. Para establecer una adecuada clasificación e impedir falsas declaraciones medioambientales, la Comisión expondrá normas armonizadas para la definición y el etiquetado de los plásticos biodegradables y compostables. Además, llevará a cabo evaluaciones sobre la vida útil de los diferentes materiales para determinar las condiciones en las que la utilización de plásticos biodegradables o compostables es beneficiosa.

Por último, algunos materiales que tienen propiedades de biodegradabilidad, como por ejemplo los plásticos «oxodegradables», se ha demostrado que no presentan ninguna ventaja medioambiental con respecto a los plásticos convencionales. Además, su rápida desintegración en fragmentos diminutos se ha convertido en un motivo de preocupación. Por ello, en el año 2018, la Comisión inició los trámites para limitar el uso

de los oxoplásticos en la UE (Europa C. , Real Decreto 293/2018, de 18 de mayo, sobre reducción del consumo de bolsas de plástico y por el que crea el registro de productores., 2018).

4.1 Organización de la normativa

A continuación, se va a enumerar toda la normativa relativa a plásticos biodegradables y compostables que existe en la actualidad en España y a nivel europeo. Esta recopilación es de utilidad para todos aquellos agentes interesados en biodegradabilidad y compostabilidad de plásticos. Primero se va a mostrar la normativa a nivel estatal y a continuación a nivel europeo.

Antes de mostrar la normativa se debe aclarar que, a nivel nacional, la asociación española de normalización y certificación (AENOR), es quien se encarga de realizar las tareas de normalización, certificación y elaboración de normas españolas. Esta entidad utiliza una serie de codificaciones para presentar las normas. A continuación, se van a mostrar las codificaciones usadas en el ámbito de biodegradabilidad/compostabilidad de plásticos del presente documento.

- **UNE-EN:** norma EN traducida al ámbito español.
- **UNE-EN ISO:** norma EN ISO traducida al ámbito español.
- **UNE-CEN/TR:** Informe Técnico adoptado por CEN/CENELEC que contiene información no adecuada para su publicación en una Norma Europea o una Especificación Técnica (antiguos CR).

❖ **A NIVEL ESTATAL**

- i. UNE-EN 13432: 2001 Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.
- ii. UNE-EN 14045:2003 Envases y embalajes. Evaluación de la desintegración de los materiales de envases y embalajes en los análisis prácticos orientados bajo condiciones definidas de formación de compost.
- iii. UNE-EN 14046:2003 Envases y embalajes. Evaluación de la biodegradabilidad aeróbica última y de la desintegración de los materiales de

- envase y de embalaje bajo condiciones controladas de formación de compost. Método mediante el análisis del CO₂ liberado.
- iv. UNE-EN 14047:2003 Envases y embalajes. Determinación de la biodegradabilidad aeróbica última de los materiales de envases y embalajes en medio acuoso. Método mediante el análisis del CO₂ liberado.
 - v. UNE-EN 14048:2003 Envases y embalajes. Determinación de la biodegradabilidad aeróbica última de los materiales de envases y embalajes en un medio acuoso. Método mediante la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado.
 - vi. UNE-EN ISO 14851:2005 Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de los materiales plásticos en medio acuoso, Método según la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado (ISO 14841:1999).
 - vii. UNE-EN ISO 14852:2005 Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en medio acuoso. Método según el análisis de dióxido de carbono generado (ISO 14852:1999).
 - viii. UNE-EN ISO 14855:2005 Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final y desintegración de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado (ISO 14855:1999).
 - ix. UNE-EN ISO 17556:2005 Plásticos. Determinación de la biodegradabilidad aeróbica última en el suelo mediante la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro o bien mediante la cantidad de dióxido de carbono generada (ISO 17556:2003).
 - x. UNE-EN 13432: 2001; UNE-EN 13432:2001/AC: 2005 Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.
 - xi. UNE-EN 14806:2006 Envases y embalajes. Evaluación preliminar de la desintegración de los materiales de envases y embalajes bajo condiciones simuladas de compostaje en un ensayo a escala laboratorio.
 - xii. UNE-EN ISO 20200:2006 Plásticos. Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un laboratorio (ISO 14852:1999).

- xiii. UNE-EN ISO 20200:2006 Plásticos. Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un laboratorio (ISO 20200:2004).
- xiv. UNE-EN 14995:2007 Plásticos. Evaluación de la compostabilidad. Programa de ensayo y especificaciones.
- xv. UNE-CEN/TR 15351:2008 Plásticos. Guía terminológica en el campo de los plásticos y polímeros degradables y biodegradables.
- xvi. UNE-EN ISO 14855-1:2008/AC: 2010 Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado. Parte 1: Método general. (ISO 14855-1:2005).
- xvii. UNE-EN ISO 14855-2:2010 Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado. Parte 2: Medición gravimétrica del dióxido de carbono liberado en un ensayo de laboratorio. (ISO 14855-2:2007, incluyendo Cor 1:2009).
- xviii. UNE-CEN/TR 15932:2010 Plásticos. Recomendación para la terminología y la caracterización de biopolímeros y bioplásticos.
- xix. UNE-EN ISO 14853:2018 Plásticos. Determinación de la biodegradabilidad anaerobia final de los materiales plásticos en medio acuoso. Método por medición de la producción de biogás. (ISO 14853:2016).

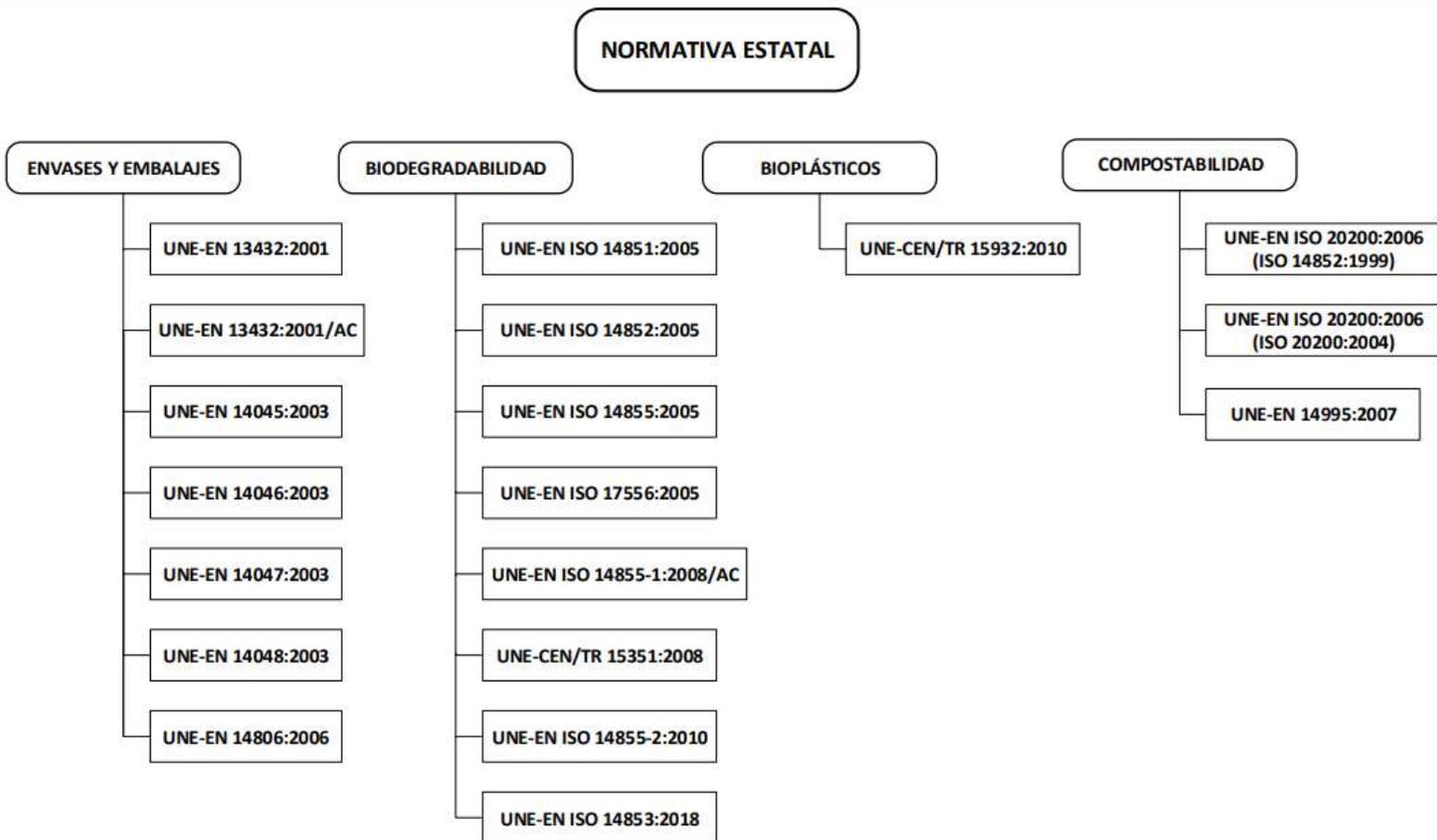


Ilustración 45 Esquema representativo de la normativa estatal.

❖ **A NIVEL EUROPEO**

- i. EN 14047:2002 Packaging - Determination of the ultimate aerobic biodegradability of packaging materials in an aqueous medium Method by analysis of evolved carbon dioxide
- ii. EN 14048:2002 Packaging - Determination of the ultimate aerobic biodegradability of packaging materials in an aqueous medium - Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer
- iii. ISO 16929: 2002 Plastics- determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot- scale test.
- iv. EN 14045:2003 Packaging - Evaluation of the disintegration of packaging materials in practical oriented tests under defined composting conditions.
- v. EN 14046:2003 Packaging - Evaluation of the ultimate aerobic biodegradability of packaging materials under controlled composting conditions - Method by analysis of released carbon dioxide.

- vi. EN ISO 14851:2004 Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium - Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer (ISO 14851:1999).
- vii. EN ISO 14852:2004 Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium - Method by analysis of evolved carbon dioxide (ISO 14852:1999)
- viii. EN ISO 14855:2004 Determination of the ultimate aerobic biodegradability and disintegration of plastic materials under controlled Composting conditions-method by analysis of evolved carbon dioxide (ISO 14855:1999).
- ix. EN ISO 17556:2004 Plastics - Determination of the ultimate aerobic biodegradability in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved.
- x. EN ISO 20200:2005 Plastics - determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions in a laboratory scale test (ISO 20200:2004).
- xi. EN 13432:2000/AC 2005 Packaging - Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging.
- xii. EN 14806:2005 Packaging - Preliminary evaluation of the disintegration of packaging materials under simulated composting conditions in a laboratory-scale test.
- xiii. EN 14995:2006 Plastics - Evaluation of compostability - Test scheme and specifications
- xiv. CEN/TR 15351:2006 Plastics - Guide for vocabulary in the field of degradable and biodegradable polymers and plastic items.
- xv. EN ISO 14855 - 1:2007 Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions - Method by analysis of evolved carbon dioxide - Part 1: General method (ISO 14855-1:2005).
- xvi. EN ISO 14855 - 2:2009 Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions – Method by analysis of evolved carbon dioxide - Part 2: Gravimetric measurement of carbon dioxide evolved in a laboratory-scale test (ISO 14855-2:2007, including Cor 1:2009).

- xvii. CEN/TR 15822: 2009 Plastics - Biodegradable plastics in or on soil - Recovery, disposal and related environmental issues.
- xviii. CEN/TR 15932:2010 Plastics - Recommendation for terminology and characterisation of biopolymers and Bioplastics
- xix. ISO 17088:2012 Specifications for compostable Plastics.
- xx. ISO 16929:2019 Plastics -- Determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test.

NORMATIVA EUROPEA

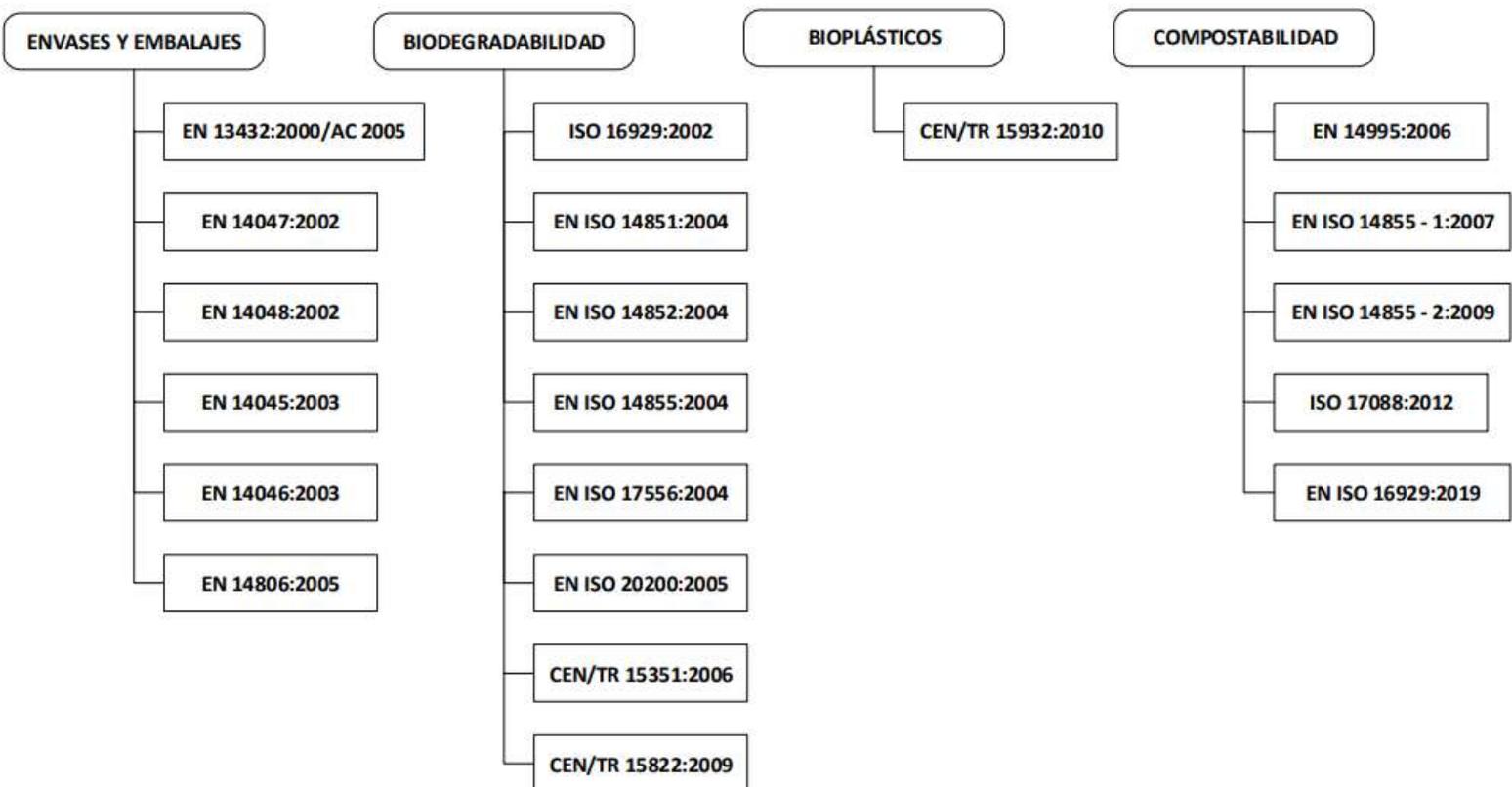


Ilustración 46 Esquema representativo de la normativa europea.

Como se muestra en este apartado, existen diferentes normativas. Dentro de las mismas, destacan dos de ellas, las cuales son más generales y a partir de las mismas se definen los requisitos que necesita un plástico para ser biodegradable o compostable.

Según establece la norma EN 13432, un material se define como “biodegradable” si posee las siguientes características:

- ❖ La proporción total de constituyentes orgánicos sin determinar la biodegradabilidad no debe exceder el 5%.

- ❖ El periodo de aplicación de un ensayo de biodegradación aerobia no deber exceder más de 6 meses.
- ❖ Para el material objeto de ensayo el porcentaje de biodegradación ha de ser al menos de un 90% en total o de un 90% de la degradación máxima de una sustancia referencia adecuada después de que se estabilicen ambos, tanto el material de ensayo como la sustancia de referencia.
- ❖ El periodo de aplicación de un ensayo de biodegradación anaerobia deber durar como máximo 2 meses.
- ❖ El porcentaje de biodegradación basado en la producción de biogás debe ser igual o superior al 50% del valor teórico del material de ensayo.

Según la norma EN 13432 y 14995, un material para ser definido como “compostable” debe poseer las todas las características mostradas para un material biodegradable más las siguientes:

- ❖ En seis meses, su degradación debe de ser como mínimo del 90%, cuando es sometido a una atmosfera que contiene una elevada cantidad de CO₂. Estos valores deben de acreditarse en base al método estándar EN 14046.
- ❖ El material no debe tener efectos negativos sobre el proceso de compostaje.
- ❖ En tres meses, la masa del material a compostar debe de estar formada por fragmentos de tamaño menor a 2 mm, si encuentra en contacto con materiales orgánicos. Estos valores deben acreditarse usando el método estándar EN 14045.
- ❖ El valor de pH del compost debe de estar dentro límites establecidos (7-8).
- ❖ Los materiales plásticos deben contener un mínimo del 50 % en solidos volátiles lo que excluye en gran parte a los materiales inertes.
- ❖ La concentración de cualquier sustancia incluida en la siguiente tabla, presente en los materiales plásticos, no debe exceder los valores mostrados en la misma:

Tabla 5 Contenido máximo de metales y otras sustancias tóxicas en los materiales plásticos.(Datos adquiridos de (UNE-EN 14995. Plásticos. Evaluación de la compostabilidad. Programa de ensayo y especificaciones., 2007))

Elemento	mg/kg en la sustancia seca
Zn	150,0
Cu	50,0
Ni	25,0
Cd	0,5

Elemento	mg/kg en la sustancia seca
Pb	50,0
Hg	0,5
Cr	50,0
Mo	1,0
Se	0,75
As	5,0
F	100,0

5. DISTINTOS ORGANISMOS CERTIFICADORES DE PRODUCTOS PLÁSTICOS BIODEGRADABLES Y COMPOSTABLES

A partir de finales de los años 80 se incluyó el término plástico biodegradable, como consecuencia de la necesidad que existía de establecer un sistema de verificación para aquellos materiales que aparecían en el mercado con la etiqueta de “biodegradable” o “compostable”. En la actualidad, se han desarrollado diferentes organismos certificadores, que cuentan con un equipo de expertos científicos para determinar cuantitativamente la biodegradabilidad y la compostabilidad de dichos materiales como se muestra en los apartados siguientes.

5.1 Productos plásticos biodegradables

5.1.1 Certificación de productos plásticos biodegradables

De acuerdo con las normativas europeas sobre la biodegradabilidad de plástico (principalmente ISO 17556 y la EN 14987), se ha impulsado el sistema de certificación OK Biodegradable, que determina el tiempo necesario para que se produzca la descomposición de los diferentes productos plásticos, la capacidad de descomposición de los mismos en el medio natural, su ecotoxicidad y su contenido en materiales pesados.

5.1.2 Armonización de la certificación

La Asociación Europea de Bioplásticos fomenta la utilización de la certificación de producto y en concreto de un único distintivo de calidad para Europa. Esta asociación coopera con organizaciones líderes en Japón, Australia y EE.UU, donde se han

establecido convenios de colaboración con asociaciones como la BPI, la ABA y la JBPA sobre el reconocimiento de laboratorios de ensayo y certificaciones. Este acercamiento pretende facilitar el comercio de productos a nivel mundial.

5.1.3 Organismos de certificación en Europa

En la siguiente tabla se muestran los organismos certificadores más importantes de Europa:

Tabla 6 Principales organismos certificadores de plásticos biodegradables en Europa.(Datos adquiridos de (OWS, 2020))

País	Organización
España, Italia, Francia, Austria y Bélgica	TÜV Austria Belgium
Alemania/Suiza	DIN Certco
Toda Europa	European Bioplastics

5.1.4 Etiquetado

Los principales sellos de garantía que muestran que un producto, envase o envoltorio es biodegradable en la Unión Europea (UE), los imparte la entidad certificadora TÜV Austria, cuya entidad certifica la biodegradabilidad en el medio marino, agua dulce y suelo de la siguiente manera (Martín, 2019):

- ❖ OK Biodegradable Marine: Cuando el 90% de la masa del producto se degrada a través de procesos biológicos como máximo en 6 meses en los distintos mares y océanos.
- ❖ OK Biodegradable Water: Cuando el 90% del material se degrada en aguas dulces en un periodo de tiempo de hasta 56 días.
- ❖ OK Biodegradable: Cuando los productos biodegradables se desintegran en un 90% en un periodo de tiempo inferior a 2 años.



Ilustración 47 Etiquetas de certificación. (Enestadocrudo, 2020)

5.2 Productos plásticos compostables

5.2.1 Certificación de productos plásticos compostables

La certificación une los ensayos normalizados EN 13432 / EN 14995 con el distintivo de calidad que permite la identificación y la correcta gestión de los productos

plásticos compostables en los diferentes mercados. Este distintivo avala que el producto en cuestión puede ser compostado. La etiqueta de calidad del producto certifica que no sólo el plástico es compostable, sino que además el resto de los componentes del producto también lo son (etiquetas, tintas, etc). El distintivo de compostabilidad, comúnmente conocido como arbolito, solo puede ser usado para productos certificados. Tanto la etiqueta como el número de certificación grabado sobre el producto permiten localizar al fabricante. Por último, cabe destacar que los productos ensayados deben ser los mismos que los comercializados en los mercados.



Ilustración 48 Proceso de certificación de un producto compostable.

El programa de certificación de los productos plásticos compostables está constituido por expertos especialistas en la gestión de residuos, en el reciclado de los productos y en la calidad del compost. A continuación, se muestran los diferentes expertos que existen en a nivel europeo:

- ❖ Industrieverband Kunststoffverpackungen (Asociación del embalaje plástico).
- ❖ Bundesgütegemeinschaft Kompost (Asociación alemana para el aseguramiento de la calidad del compost).
- ❖ European Bioplastics.
- ❖ Bundesverband der deutschen Entsorgungswirtschaft (Asociación de las industrias de gestión de residuos de Alemania).
- ❖ Bundesvereinigung der kommunalen Spitzenverbände (Asociación alemana de ciudades y municipios).
- ❖ Deutscher Bauernverband (Asociación de agricultores alemanes).

- ❖ Bundesverband Humus- und Erdenwirtschaft e.V. (Asociación alemana para el aprovechamiento del suelo).

5.2.2 Armonización de la certificación

La Asociación Europea de Bioplásticos fomenta la utilización de la certificación de producto y en concreto de un único distintivo de calidad para Europa. Esta asociación coopera con organizaciones líderes en Asia y EE.UU, dentro del marco de la International Compostable Product Certification Network. Se han establecido convenios de colaboración con BPI, BMG y BPS sobre el reconocimiento de laboratorios de ensayo y certificaciones. Este acercamiento posibilita el comercio de productos compostables a nivel mundial.

5.2.3 Organismos de certificación en Europa

En la siguiente tabla se muestran los principales organismos certificadores de Europa:

Tabla 7 Principales organismos certificadores de plásticos compostables en Europa. (Datos adquiridos de (Guillebon, 2011))

País	Organización
Alemania/Suiza	DIN Certco
Reino Unido	UK Composting Association
Holanda	Keurmerkinstituut
Polonia	COBRO
España, Italia, Francia, Austria y Bélgica	TÜV Austria Belgium

5.2.4 Etiquetado

En España, Italia, Francia, Austria y Bélgica se usa el sello OK Compost de la misma certificadora que los productos biodegradables. Algunos materiales no requieren temperaturas tan elevadas y en lugar de tratarse en plantas de compostaje pueden tratarse en casa o en compostadores comunitarios, como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 49 Etiqueta OK Compost. (Enestadocrudo, 2020)

En relación al OK Compost industrial, los productos compostables pueden tratarse en plantas de compostaje industrial en las que se establecen unas condiciones óptimas y

constantes para que se produzca la biodegradabilidad de los diferentes residuos. Cuando un residuo puede ser biodegradado en un 90% de su masa total en un periodo de tiempo inferior a 6 meses, el porcentaje de sólidos volátiles es superior al 50%, la concentración de metales pesados es inferior a los valores mostrados en la tabla 4, cumple con los estándares europeos de ecotoxicidad y durante la desintegración de los residuos no existen fragmentos de un tamaño superior a 2 mm tras haber pasado 12 semanas, entonces se le otorga el sello certificador de OK Compost industrial.

Por otro lado, el OK Compost Home, hace referencia a los residuos compostables que cumplen los criterios anteriores de compostabilidad, pero, en este caso los residuos no necesitan temperaturas muy elevadas o condiciones muy estrictas para degradarse rápidamente mediante el compostaje. En estos casos, se le otorga el sello OK Compost Home, cuyo sello indica que estos productos pueden ser tratados en casa o en compostadores comunitarios.

Por último, quiero mostrar otro organismo certificador, la organización belga VICOTTE, cuya entidad está acreditada para llevar a cabo los ensayos que certifican si un producto es compostable industrialmente o sirve para compostaje casero (suelo). Esta certificación usa un rating en base a un sistema de 4 estrellas para señalar el contenido de carbono renovable de un material de envase, de una fibra o de un producto acabado. Esta certificación se usa como indicador de sostenibilidad de un producto de cara al consumidor, para mostrarle a dicho consumidor el porcentaje real de sustitución de fuentes fósiles.



Ilustración 50 Etiquetas de los distintos grados de compostabilidad de un material según OK Biobased. (Guillebon, 2011)

6. ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD/ COMPOSTABILIDAD DEL PLA EN BASE A LA BIBLIOGRAFÍA

El poli (ácido láctico) o ácido poliláctico (PLA) hace referencia a un poliéster alifático termoplástico derivado de recursos renovables como el almidón, la tapioca o la caña de azúcar (Hermida, 2017). Debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad y

propiedades de barrera, este material se ha usado en una amplia gama de aplicaciones ya que puede presentarse como material amorfo o cristalino, gracias a la manipulación de las mezclas de sus isómeros D(-) y L(+), sus pesos moleculares y su copolimerización. Sin embargo, cabe decir que, su biodegradabilidad, sólo se produce bajo condiciones controladas de temperatura, humedad, pH y oxígeno y este material es difícilmente reciclable.

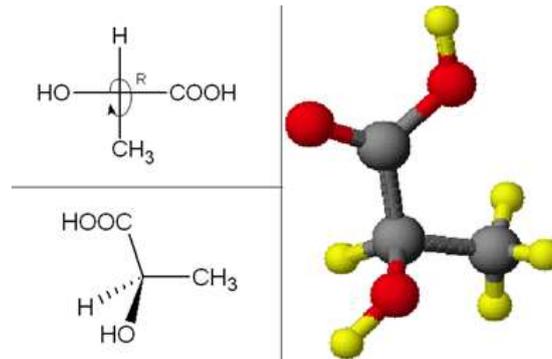


Ilustración 51 Ácido láctico con sus isómeros D (-) y L (+). (Textos científicos, 2020)

6.1 Obtención del ácido láctico

La obtención de ácido láctico comienza con el proceso de extracción de almidón de la biomasa. Normalmente en dicho proceso se usan como sustratos sacarosa procedente de la caña de azúcar, dextrosa de almidón hidrolizado y lactosa de lactosuero. Los sustratos más empleados son la glucosa y la sacarosa refinada (Textos científicos, 2020).

La extracción del almidón de los productos no refinados se efectúa con un molido húmedo, donde el almidón se convierte en azúcar a través del proceso de hidrólisis enzimática. Después de este proceso, se produce la fermentación bacteriana del licor azucarado en condiciones anaerobias, ya que en presencia de oxígeno se favorecería la formación de CO₂ y los microorganismos que llevan a cabo este proceso no presentan actividad cuando la concentración de oxígeno es muy elevada.

La fermentación, puede ser de dos tipos en función del tipo de microorganismo usado:

- ❖ **Homofermentativa:** Tiene lugar cuando por cada mol de glucosa se obtienen dos moles de ácido láctico (Waldir Estela, Mojmír Rychtera, Karel Melzoch, Elena Quillama y Erida Egoavil, 2007). Su rendimiento está entorno al 85% (Hermida, 2017).
- ❖ **Heterofermentativa:** Se produce cuando por cada mol de glucosa se obtiene un mol de ácido láctico, un mol de etanol y un mol de CO₂. La glucosa se rompe

para dar C₅ y CO₂. Dicho C₅ se divide en dos moléculas (C₂ y C₃), donde el primero es precursor del etanol y el segundo del ácido láctico (Waldir Estela, Mojmír Rychtera, Karel Melzoch, Elena Quillama y Erida Egoavil, 2007). Tiene un rendimiento en torno al 50% (Hermida, 2017).

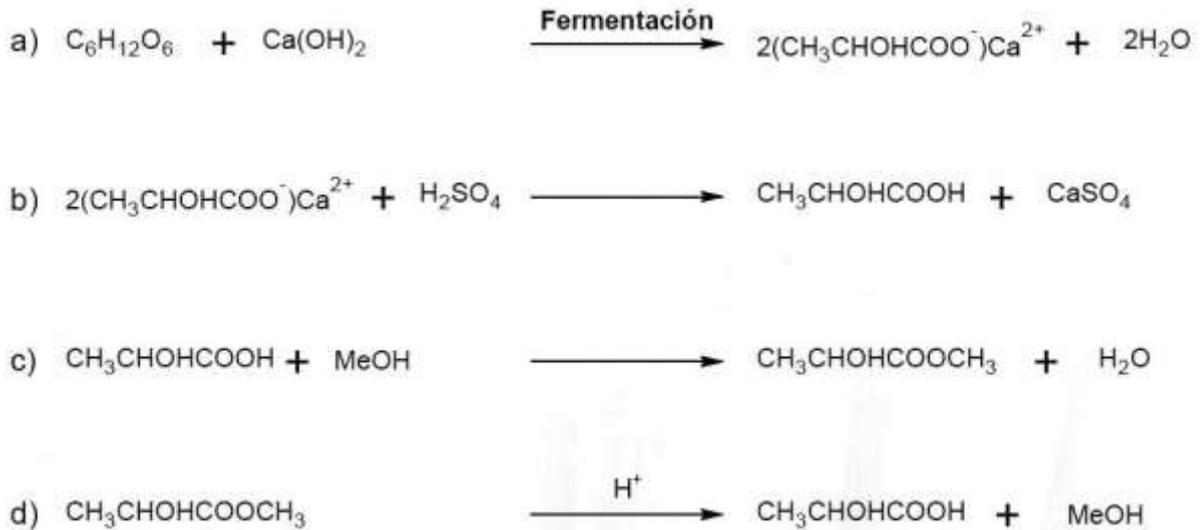


Ilustración 52 Estadios de la producción de ácido láctico mediante fermentación bacteriológica. (Tecnología de los plásticos, 2011)

En los procesos comerciales de producción de ácido láctico normalmente se utilizan bacterias termófilas, de fermentación rápida, que permiten que el uso de sustratos baratos, con una mínima adición de nutrientes y a temperaturas relativamente bajas desde 45 a 62 °C (Textos científicos, 2020). Las más usadas se muestran en la imagen siguiente:

- | | | |
|-------------------------|---|--------------|
| ▪ <i>L. casei</i> | } | L(+) láctico |
| ▪ <i>L. delbrueckii</i> | | |
| ▪ <i>L. acidophilus</i> | | |
| ▪ <i>L. helveticus</i> | } | DL láctico |
| ▪ <i>L. vulgaris</i> | | |
| ▪ <i>L. lactis</i> | } | D(-) láctico |

Ilustración 53 Principales bacterias termófilas usadas en los procesos de fermentación. (Tecnología de los plásticos, 2011)

Normalmente hoy en día a nivel industrial se usa la fermentación homofermentativa y además al sustrato se le añade una fuente de cofactores o vitaminas (una mezcla de entorno al 10-15% de glucosa, 10% de CaCO₃, y en pequeñas proporciones fosfato de amonio y extracto de levadura) para mejorar este proceso.

Posteriormente el medio fermentable se inocua y se agita sin aireación para optimizar la neutralización del ácido formado. El proceso de fermentación se termina cuando todo el azúcar se consume y suele durar entre 2 y 4 días. Al final de dicho proceso se ajusta el pH del medio a valores muy próximos a 10 y se va calentando el mismo para que se produzca la solubilización del lactato de calcio y coagular las proteínas presente. Luego el medio es filtrado para eliminar del mismo las sustancias insolubles y la biomasa. Por último, después de concentrar por evaporación, se obtiene el ácido libre adicionando ácido sulfúrico, seguido de una filtración para remover el sulfato de calcio formado.

Los procesos de fermentación pueden realizarse tanto en continuo como en discontinuo, y en ambos procesos el ácido láctico tiene que separarse del medio fermentable y purificarse antes de su polimerización.

Por otro lado, el ácido láctico también puede obtenerse a través de síntesis química. Sin embargo, este proceso presenta varias desventajas respecto al proceso anterior. El ácido láctico obtenido por esta vía representa una mezcla racémica de las formas D y L del mismo, es decir, constituye una mezcla equimolar de ambas formas que no desvía la luz en ninguna dirección.

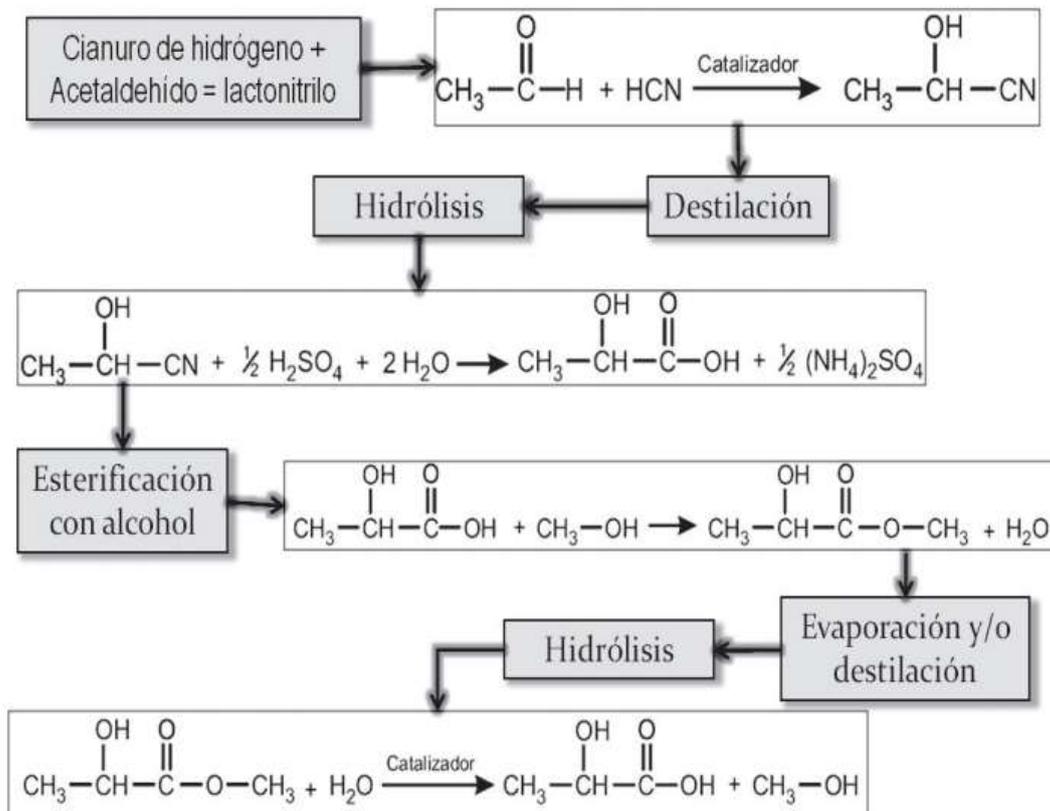


Ilustración 54 Secuencia de producción de ácido láctico por síntesis química. (Ricardo Heliodoro Gil-Horán, Rosa María Domínguez-Espinosa y Juan Daniel Pacho-Carrillo., 2008)

6.2 Proceso de polimerización

Hoy en día existen tres vías para la síntesis de PLA de alto peso molecular (polimerización por condensación directa en masa, polimerización por condensación con deshidratación azeotrópica y polimerización por apertura del anillo (ROP)), cuyos procesos se van a explicar a continuación:

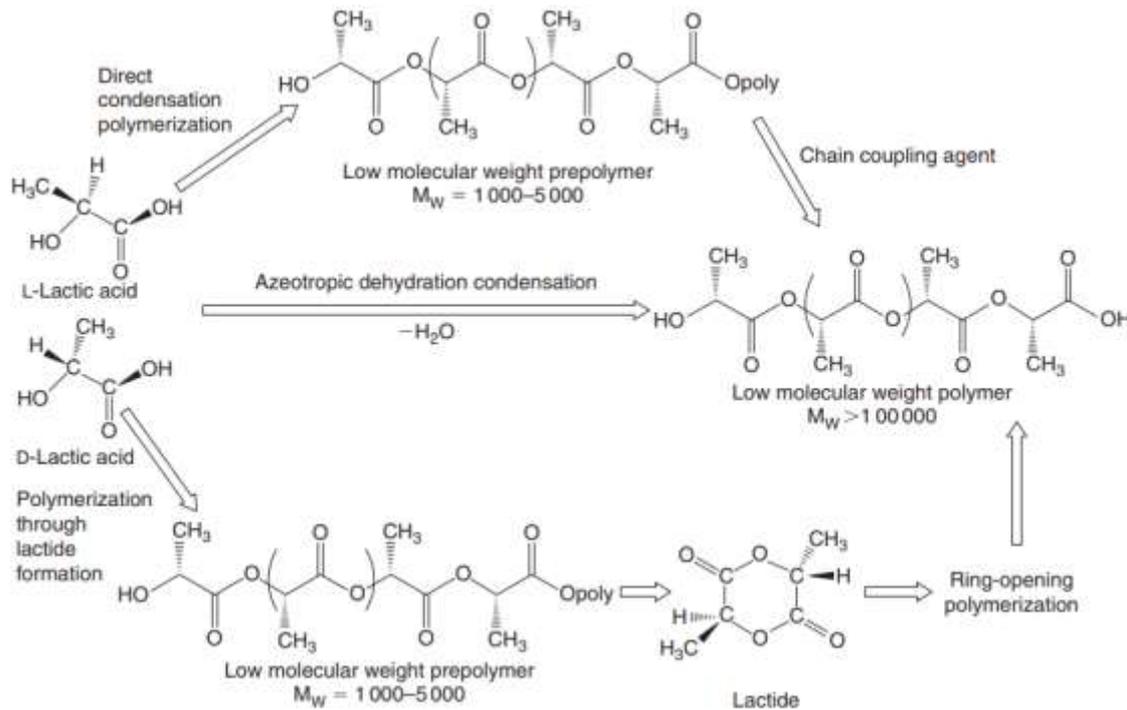


Ilustración 55 Métodos de síntesis para obtener PLA de alto peso molecular. (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008)

❖ Polimerización por condensación directa en masa

Este proceso se divide en tres etapas:

- Primera etapa:** En esta etapa se mueve el agua que puede contener ácido láctico, para evitar la formación algunos oligómeros lineales.
- Segunda etapa:** El ácido láctico reacciona en presencia de catalizadores (ácidos fuertes o compuestos organometálicos) para obtener oligómeros con distribuciones moleculares estrechas.
- Tercera etapa:** Se produce una polimerización en estado fundido para obtener un producto de elevado peso molecular. En esta etapa la transferencia de calor y la extracción de agua representan los factores críticos en la misma debido a la elevada viscosidad de la mezcla, lo que obliga usar reactores con una fuerte agitación, para obtener la máxima homogeneización posible. Si se quiere mejorar la eficacia del proceso será necesario usar vacío con una atmosfera inerte.

Esta es la vía más barata de obtener PLA, sin embargo, el producto que se obtiene es muy débil y de bajo peso molecular (no se suelen alcanzar pesos moleculares superiores a 100.000 g/mol). Para poder mejorar el producto obtenido se tienen que añadir agentes de acoplamiento o esterificación para aumentar la longitud de las cadenas, lo que incrementaría el coste del proceso, convirtiéndolo en un proceso no rentable (Bastioli, 2005).

❖ **Polimerización por condensación con deshidratación azeotrópica**

La polimerización por condensación azeotrópica es un proceso que permite obtener cadenas de gran longitud sin tener que adicionar extensores de cadena. Este proceso consiste en una destilación a presión reducida del ácido láctico durante un periodo de tiempo de en torno a 2 o 3 horas a una temperatura de 130 °C. Después se añaden el catalizador y el difenil éter y se adjunta un tubo con tamices moleculares al tanque de reacción. El solvente se recircula al reactor por medio de los tamices durante 30-40 horas a la misma temperatura. Este solvente desarrollara un azeótropo con el agua y luego ambos se retirarán por destilación, así la extracción del agua no supondrá ningún problema, sin embargo, habrá de recurrir a un agente secante para retirar el agua del solvente o usar un solvente nuevo. Por último, el PLA obtenido es purificado. Los principales inconvenientes de este proceso es que durante el mismo se producen gran cantidad de residuos, como consecuencia de la gran cantidad de catalizador que se necesita y los costos de producción de este son muy elevados (Bastioli, 2005).

❖ **Polimerización por apertura del anillo (ROP)**

Hoy en día es la vía de obtención de PLA más usada a nivel industrial. Este proceso está formado por tres etapas:

- i. **Primera etapa:** Se produce una ligera policondensación, formando compuestos de bajo peso molecular (menores de 2.500 g/mol) (Bastioli, 2005).
- ii. **Segunda etapa:** Se produce la despolimerización del PLA obtenido en la primera etapa para la obtención de la lactida. El proceso normalmente usado a nivel industrial consiste en el calentamiento del PLA obtenido en la primera fase a una temperatura entre 130-230°C (Bastioli, 2005), baja presión y en presencia de polvo de estaño en un porcentaje de entre 0,05-1,0% en peso. Después de este proceso, la lactida se purifica por destilación o recristalización

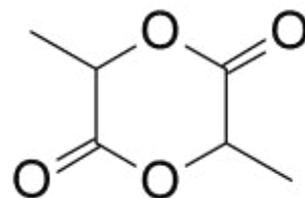


Ilustración 56 Estructura química de la lactida.
(Wikipedia, 2020)

empleando solventes como tolueno o acetato de etilo, que luego se separarán de la lactida mediante secado en vacío.

- iii. **Tercera etapa:** En esta etapa se produce la obtención de PLA a partir de la lactida. Este proceso se puede realizar por diferentes tipos de polimerización, en este caso se va a explicar la más usada, que es la polimerización en masa en estado fundido, donde se utilizan como catalizadores alcóxidos metálicos normalmente de estaño o aluminio. El mecanismo de la reacción generalmente es de coordinación-inserción siguiendo un patrón de iniciación y propagación.

La polimerización por apertura de anillo sobresale del resto de procedimientos debido a que presenta un mayor control de la química de la reacción, permitiendo así la obtención de diversas microestructuras.

6.3 Propiedades del PLA

i. Cristalinidad y propiedades térmicas

Las propiedades del PLA dependen de sus pesos moleculares, la ordenación de su estructura, su cristalinidad, su morfología y el grado de orientación de sus cadenas.

El Homo-PLA es una macromolécula lineal con una estructura molecular que se determina por su composición estereoquímica. El PLA puede producirse de forma totalmente amorfa o con hasta un 40% de cristalinidad. Las resinas de PLA que contienen más del 93 % de ácido láctico (L) son semicristalinas, pero, cuando contiene 50-93% del mismo, se convierte en un material totalmente amorfo (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008).

La cinética de cristalización del PLA ha sido ampliamente estudiada y se ha comprobado que es bastante lenta. La tasa de cristalización aumenta con la disminución del peso molecular y depende fuertemente de la composición del (co)polímero. Para que la cristalización se produzca se necesita una pureza óptima de al menos un 75%, es decir, debe tener aproximadamente 30 unidades de ácido láctico isostático (Arrieta, 2014).

Los cristales de los homopolímeros se desarrollan de tres formas diferentes (α , β y γ). Los que lo hacen de la forma α se caracterizan por ser cristales cuya forma de celda es pseudo-ortorrómbica y contienen dos cadenas antiparalelas. Además, tienen gran estabilidad térmica y un T_m de 185 °C. Por otro lado, los cristales que se desarrollan de la forma β lo hacen como consecuencia del estiramiento mecánico de los cristales α . Estos cristales están compuestos por una celda unitaria ortorrómbica con 6 cadenas

antiparalelas y una T_m de 175 °C. Por último, los cristales γ solo se forman por cristalización epitaxial en sustrato hexametilbenceno.

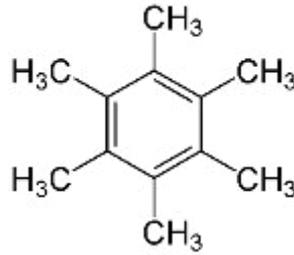


Ilustración 57
Estructura química
del hexametilbenceno.
(Wikipedia, 2020)

Por otra parte, el PLA puede cristalizarse en presencia de D-Lactida, sin embargo, a medida que la estructura se desordena, la tasa de cristalización disminuye, al mismo tiempo que disminuye la temperatura de fusión (T_m). De hecho, se ha comprobado que la tasa de cristalización está determinada esencialmente por la disminución del punto de fusión de los diferentes copolímeros.

ii. Solubilidad

Un buen disolvente para el PLA y para la mayoría de los copolímeros es el cloroformo. Otros disolventes son los compuestos orgánicos clorados o fluorados, el dioxano, el dioxolano y el furano.

iii. Propiedades barrera

Debido a que el PLA se usa principalmente para aplicaciones de envasado de alimentos, sus propiedades barrera (dióxido de carbono, oxígeno y el vapor de agua) han sido ampliamente investigadas debido a que los plásticos son relativamente permeables.

Por ello, una de las propiedades más importantes del PLA es analizar la permeabilidad de los gases y vapor de agua, ya que estos se pueden transferir a los alimentos a través del envase y provocar la alteración de la calidad del producto, al mismo tiempo que disminuye su vida útil. Por otro lado, la permeabilidad química a través de las membranas poliméricas también puede dar lugar a alteraciones en la estructura del polímero.

El coeficiente de permeabilidad (P), permite obtener la capacidad que tiene una membrana polimérica para tolerar el paso de algún compuesto a través de la misma. Para

determinar este parámetro se debe tener en cuenta la solubilidad o coeficiente de absorción (S) y el coeficiente de difusión (D), como se muestra en la siguiente ecuación (Arrieta, 2014):

$$P = S \cdot D \quad \text{Ec.6}$$

Donde S depende de la solubilidad de las moléculas de permeante en el material y D de la estructura del polímero.

iv. **Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas del PLA pueden variar mucho, desde materiales blandos y elásticos hasta materiales rígidos y de alta resistencia, según diferentes parámetros, como son la cristalinidad, la estructura del polímero, el peso molecular y procesamiento.

Para poder analizar las propiedades mecánicas de los materiales hay que tener en cuenta dos parámetros como son el módulo elástico y la resistencia a la tracción que presenta el material en cuestión. Estos parámetros aumentan con el aumento de la masa molar del material. Sin embargo, se ha comprobado para el PLA, esta tendencia solo se cumple cuando la masa molar aumenta de 50 kDa a 100 kDa. A partir de 300kDa esta estos parámetros no se ven afectados (Arrieta, 2014).

6.4 Proceso de degradación

❖ **Degradación abiótica**

i. Degradación térmica

La estabilidad térmica de los biopoliésteres no es muy elevada, lo que provoca que el rango de aplicación del PLA sea más reducido. La temperatura de descomposición del PLA se encuentra entre 230°C y 260°C (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008). Algunos autores concluyen que el vínculo carbono-oxígeno es el más probable que se rompa bajo el calentamiento isotérmico. Además, este proceso de degradación depende de la cristalinidad y peso molecular del PLA. Las reacciones que intervienen en la degradación térmica de los polímeros basados en el ácido láctico pueden seguir diferentes mecanismos:

- ❖ Termohidrólisis: Los enlaces éster suelen degradarse durante el tratamiento térmico en condiciones hidrolíticas.

- ❖ Degradación termo-oxidativa.
- ❖ Reacciones “zipper-like”: Se produce la despolimerización en forma de cremallera en presencia de residuos de catalizador.
- ❖ Reacciones transesterificación inter e intramolecular: las reacciones de que dan una ruptura y una creación de vínculos simultáneos.

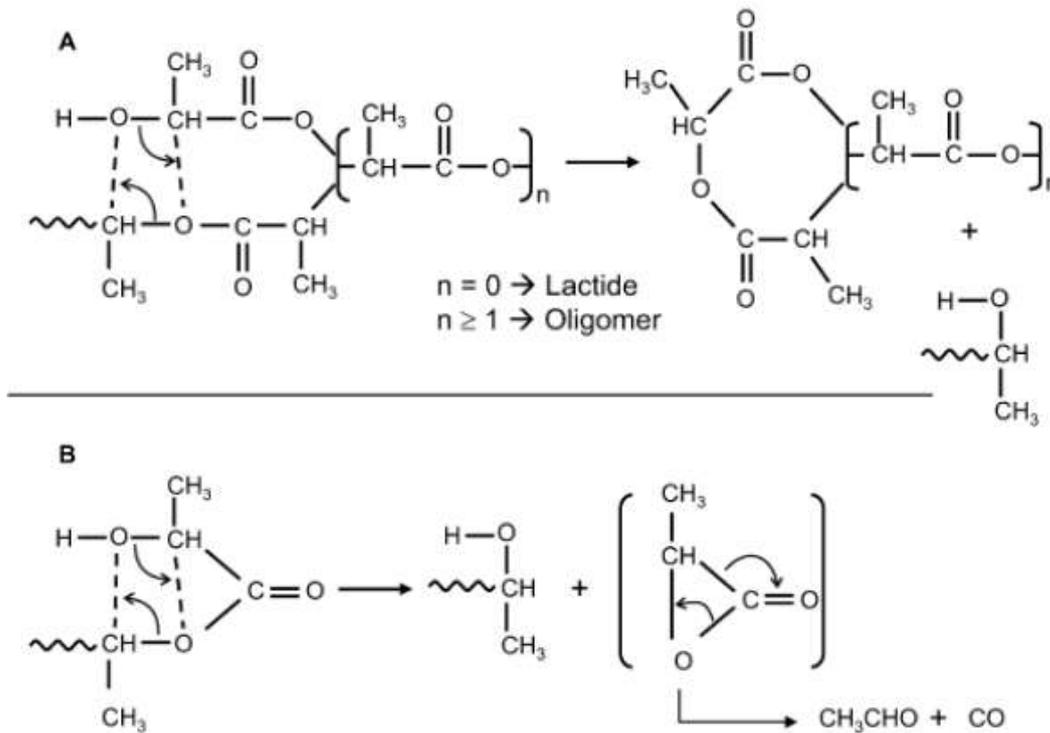


Ilustración 58 Mecanismos de degradación térmica del PLA. (Loong-Tak Lim, Rafael Auras y Maria Rubino, 2008)

ii. Degradación hidrolítica

La hidrólisis del PLA es un fenómeno muy relevante ya que lleva a la fragmentación de la cadena, y puede estar asociada con degradación térmica o biótica. Este proceso puede verse afectado por varios parámetros como su estructura, su peso molecular y distribución, su morfología (cristalinidad), la forma de sus muestras y por supuesto, las condiciones del proceso hidrolítico.

La degradación hidrolítica es un fenómeno que puede ser tanto deseable (por ejemplo, durante la etapa de compostaje) como indeseable (por ejemplo, durante la etapa de procesamiento o el almacenamiento). La desintegración del PLA comienza con una fase de absorción de agua del medio por la superficie, donde los grupos hidrolizables de la cadena principal son susceptibles al ataque del agua y empiezan a erosionar el polímero. Después, el agua se difunde hacia el seno del polímero donde se produce la división

hidrolítica de los enlaces éster de forma aleatoria. Así, las cadenas de elevada masa molar se hidrolizan a oligómeros de menor masa molar y ácido láctico, que pueden ser asimilados por diferentes microorganismos (hongos y bacterias). Además, se produce un proceso de difusión de oligómeros solubles al seno del polímero. Por último, cabe decir que la hidrólisis de los enlaces éster es autocatalizada por los grupos terminales ácidos carboxílicos y el proceso de degradación hidrolítica puede ser acelerado por ácidos o bases y se ve afectado tanto por la temperatura como la humedad. Según algunos estudios la velocidad de degradación hidrolítica del PLA es mayor en condiciones básicas que en condiciones ácidas (Arrieta, 2014)

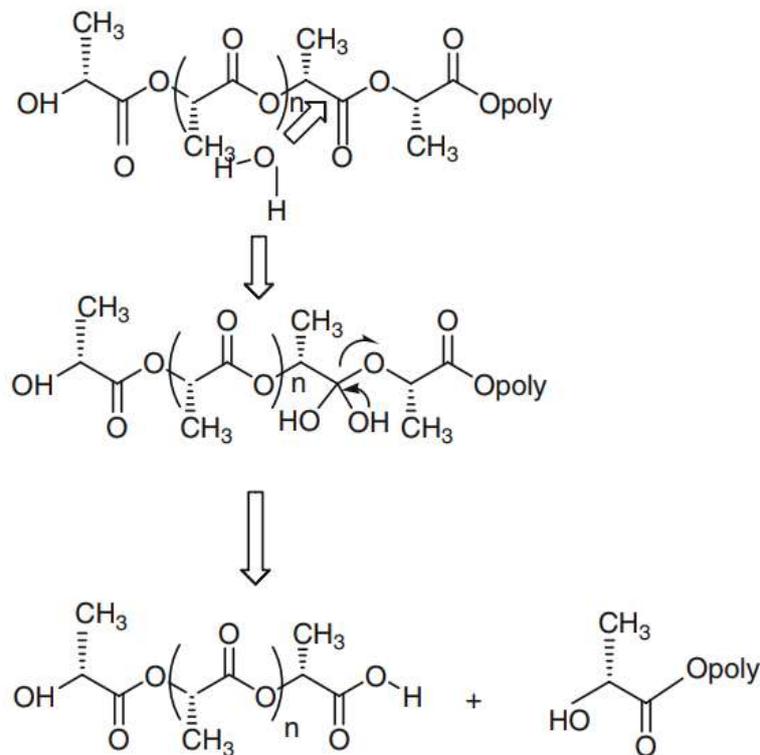


Ilustración 59 Hidrólisis del PLA. (Gaurav Kale, Sher Paul Singh y Rafael Auras, 2006)

❖ Degradación biótica

i. **Degradación enzimática**

Después del proceso de degradación hidrolítica se suele producir el proceso de degradación biótica. La degradación biótica de componentes de menor masa molar produce dióxido de carbono, agua y humus (mineralización) (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008).

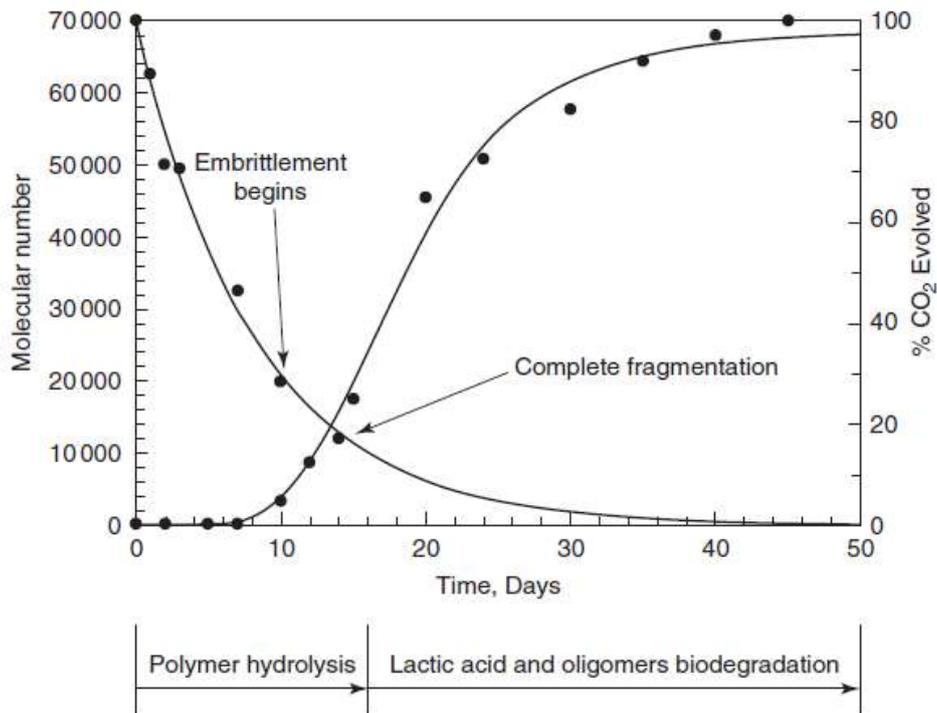


Ilustración 60 Degradación biótica y abiótica durante la etapa de compostaje. (Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini, 2008)

La ilustración 58 muestra que, durante la etapa de compostaje, el PLA se degrada en un proceso de varias etapas a través de diferentes mecanismos. Principalmente, después de la exposición a la humedad por mecanismos abióticos, el PLA se degrada por hidrólisis. Primero, las escisiones en cadena no enzimáticas de los grupos éster provocan una reducción del peso molecular, con la consiguiente fragilidad del polímero. Entonces, los oligómeros resultantes pueden difundirse fuera del polímero y ser atacados por los microorganismos. Así, los diferentes microorganismos presentes en el suelo (aerobios y anaerobios) se convierten en los agentes implicados del proceso de degradación de los diferentes polímeros biodegradables. Su acción degradativa es esencialmente el resultado de la producción de enzimas y la consiguiente ruptura del sustrato con el objetivo principal de obtener nutrientes. Para que las enzimas puedan degradar un polímero

biodegradable, la cadena de polímero debe encajar perfectamente en el sitio activo de la enzima, como se ha mostrado en el apartado anterior. Esta especificidad hace que las tasas de degradación de los diferentes polímeros varíen de una manera u otra en función del sitio en el que se produzca el proceso de biodegradación.

6.5 Diseño de un ensayo normalizado de la biodegradabilidad del PLA

El plástico seleccionado es un derivado del PLA junto con un líquido iónico adicionado como aditivo. Ante esta modificación en la composición, es necesario realizar ensayos de biodegradabilidad y/o compostabilidad. El método de ensayo para llevar a cabo el estudio de la biodegradabilidad de la muestra constituye un sistema diseñado para simular las condiciones de compostaje en presencia de oxígeno, es decir, de compostaje aeróbico.

❖ Material de laboratorio

- i. 9 reactores de vidrio de 3 litros, con tres entradas, una para poder medir la temperatura, y las otras dos para la entrada y salida de los gases.
- ii. 9 lavadores de vidrio de 1 litro, conectados a la salida de cada reactor, para retener el CO₂ producido durante el proceso de biodegradación del material orgánico en los diferentes reactores.
- iii. 18 lavadores de vidrio de medio litro, conectados en serie de dos en dos en la boca de entrada de cada reactor, con el objetivo principal de retener el CO₂ contenido en el aire ambiental.
- iv. Bombas de aire y conectores de vidrio para poder suministrar el caudal de aire homogéneamente a cada uno de los lavadores.
- v. 2 baños termostatizados con agua, donde se meten los 9 reactores, para mantener los mismos a una temperatura constante durante el proceso.
- vi. Tubos herméticos de silicona, para transportar el aire atmosférico desde la bomba a los reactores y a los lavadores.
- vii. Agua destilada.
- viii. Celulosa.
- ix. HCl 1N.
- x. NaOH de 0,5 M.

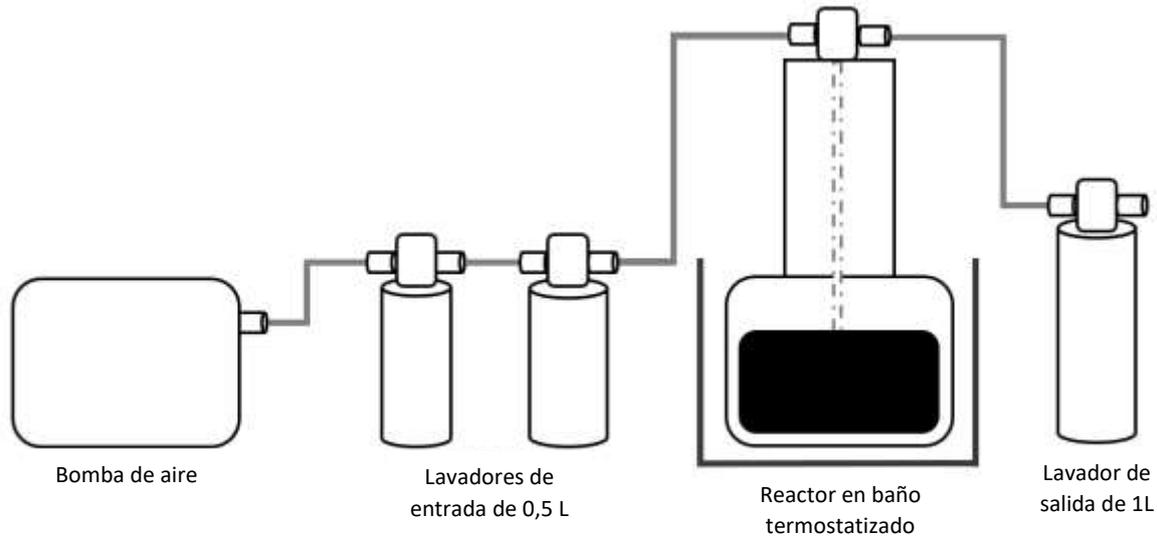


Ilustración 61 Esquema del proceso.

Para este procedimiento además se necesita un horno mufla para el analizar los sólidos volátiles (SV), una estufa para analizar los sólidos suspendidos totales (SST), una balanza para la realización de mediciones durante el proceso, un peachimetro para la medición del pH en los lavadores y los reactores, una bureta, un agitador para realizar las valoraciones y un analizador NDIR para analizar carbono orgánico total (COT).

Por otro lado, como material inóculo se usó un compost maduro adquirido de la planta de compostaje COMPOST RECICLABLES, S.L. localizada en la Crta. De Hellín, km-4, paraje “Loma de Hellín”- Jumilla (Murcia). Este inóculo se debe tamizar con una malla de 0,5 cm y además se tiene que medir el contenido de sólidos y el contenido de carbono orgánico total existente en el mismo, la cantidad de metales pesados y el pH.

Para medir los sólidos volátiles, las muestras secas se meten en un horno mufla a una temperatura de 550 °C durante un periodo de tiempo de 2 horas.

$$\% SV'_C = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(SST_C - cenizas)}{SST_C} \times 100 \right] / n \quad \text{Ec.7}$$

Donde SST_C representa el peso de sólidos secos por muestra de inóculo analizada, expresado en gramos y n hace referencia al número de muestras analizadas.

Para determinar el carbono orgánico total se usa un analizador de NDIR (el analizador de gases multicomponente representa un fotómetro industrial basado en la fotometría no dispersiva en el infrarrojo, para medir al tiempo varios gases), cuyo aparato

cuantifica el CO₂ producido durante la combustión de la muestra. Por último, para medir el pH se utilizó un peachimetro.

Una vez, se tiene todo el equipo necesario, se pasa a la realización del método de análisis, el cual consiste en introducir el PLA a estudiar mezclado con el inóculo en un recipiente donde se va a desarrollar el proceso de compostaje. Este proceso se debe realizar en unas condiciones de temperatura, oxígeno y humedad óptimas durante un periodo de tiempo inferior a 6 meses como se establece en la bibliografía mostrada en apartados anteriores. Además, durante este proceso es necesario medir periódicamente la cantidad de CO₂ generado durante el mismo. El porcentaje de biodegradación se va a expresar a través de la relación entre el CO₂ generado y la cantidad máxima del mismo que podría llegarse a producir.

❖ Preparación del material

En primer lugar, se preparan los 9 reactores, tres con inóculo sólo (blancos), tres mezclas de inóculo y celulosa y otros tres con inóculo y el material a ensayar. Después, se debe fijar una relación de la mezcla, que normalmente la más óptima en estas condiciones es de 6/1, es decir, se introducen en los reactores 600 g de sólidos secos de inóculo por cada 100 g de sólidos secos del material a ensayar o de celulosa. Esta relación varía en función del material a ensayar y las condiciones en la que este se encuentre. Además, es fundamental que en los reactores las mezclas sean homogéneas, para ello se le tiene que añadir una pequeña cantidad de agua destilada hasta conseguir la homogeneidad deseada y la humedad de la mezcla debe estar en torno al 50%, ya que en un porcentaje superior puede generar zonas anaerobias y consecuentemente gases indeseados. Así, una vez estén llenos los 9 reactores se meten los mismos en los baños termostatzados a una temperatura de 60 °C.

Los reactores están unidos a los sistemas de lavadores de CO₂ (ilustración 60), para lavar el CO₂ contenido en el aire atmosférico de entrada al reactor, al mismo tiempo que se retiene el CO₂ generado durante el compostaje.

Por un lado, en relación a los lavadores de entrada de aire, estos tienen que estar formados por dos tarros de vidrio de medio litro, situados en serie para afianzar el lavado de todo el CO₂ del aire atmosférico y así garantizar que la cantidad de CO₂ retenido a la salida del reactor es solo producto del proceso de compostaje. El aire atmosférico se introduce en el sistema a través de una bomba que permite introducir el mismo hacia los

lavadores de entrada. En los lavadores de entrada debe haber una concentración de NaOH suficiente para conseguir lavar la concentración de CO₂ atmosférico, cuyo proceso se debe comprobar que es adecuado para retener el CO₂ de la corriente de aire de entrada a los reactores. Yo establecería una concentración de 0,5 M de solución NaOH para este proceso.

Por otro lado, en relación a los lavadores de salida de los reactores, la concentración de NaOH se debe adecuar dependiendo de la fase de compostaje en la que se encuentre el proceso. Normalmente al principio del proceso como se produce mayor cantidad de CO₂, la concentración de NaOH es mayor, y conforme va transcurriendo el proceso la concentración de NaOH que se introduce va disminuyendo.

❖ Procedimiento

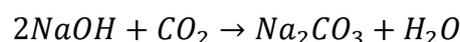
Con todo los materiales preparados y bajo unas condiciones adecuadas comenzará el proceso de compostaje, en primer lugar, empezará el proceso de reactivación de los microorganismos del inóculo, donde en los reactores que se encuentren tanto la celulosa como el material a ensayar, se iniciará la descomposición de los mismos generando nuevos microorganismos, CO₂ y agua.

Materia orgánica + nutrientes + O₂

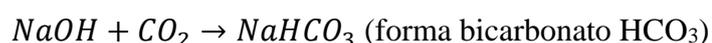
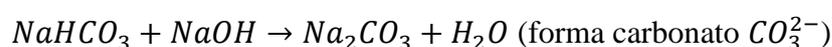


Como se muestra en esta reacción los microorganismos descompondrán la materia orgánica obteniendo la energía suficiente para poder crear nuevo material celular. En esta reacción, se producirá hummus, agua, amoníaco, anión sulfato y dióxido de carbono. Este último compuesto reaccionará con los álcalis o los hidroxilos disueltos en el agua neutralizando la basicidad que estas bases aportan desarrollando fundamentalmente carbonato CO₃²⁻ (si el hidróxido está en exceso), carbónico H₂CO₃ y bicarbonato HCO₃⁻. El hidróxido que se usará para que reaccione con el CO₂ es el hidróxido sódico (NaOH).

La reacción de neutralización que tendrá lugar será la siguiente:

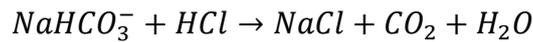
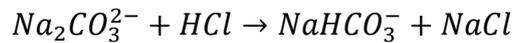
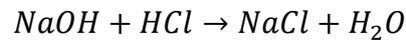


En esta reacción puede ocurrir dos fases cuando hay exceso de NaOH:



Cada día se deben analizar tanto las soluciones de los lavadores de salida como las soluciones de cada uno de los reactores de tal manera que se obtenga una secuencia de generación de CO_2 a lo largo de todo el ensayo. El método aconsejado será la valoración mediante indicadores de pH gracias a la ayuda de un peachimetro.

La metodología de valoración tiene el objetivo principal de analizar en cada reactor los gramos de carbonato y bicarbonato formado con el lavado de CO_2 y así determinar los gramos de CO_2 retenidos. Para la acidificación de la solución se usará una solución de 0,5 M de HCl. Además, cabe decir que, la concentración de sosa tiene que ser lo suficientemente elevada para que se produzca un exceso en la disolución a valorar, como se muestra en las ecuaciones siguientes:



La relación de HCl gastado para reaccionar con todo el CO_3^{2-} existente en la disolución será 1/1, es decir, por cada mol de CO_3^{2-} reaccionará un mol de HCl. Así, los moles de HCl gastados representarán los moles de CO_3^{2-} producidos por el lavado de CO_2 .

Por tanto, para determinar la concentración de CO_2 retenido por lavador se usará la siguiente ecuación, ya que esta varía en función del volumen de disolución de HCl gastado.

$$\text{moles de } \text{CO}_2/\text{ml} = (M_{\text{HCl}} \times V_2)/10 \quad \text{Ec.8}$$

❖ Determinación del porcentaje de biodegradación

El porcentaje de biodegradación del material a ensayar se define en función de la cantidad de CO_2 generada por los diferentes microorganismos procedentes de su degradación respecto a la cantidad máxima de CO_2 que se podría haber obtenido si se hubiera degradado totalmente el material de ensayo, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\% B = \frac{(\text{CO}_2)_t - (\text{CO}_2)_b}{T_{\text{hCO}_2}} \times 100 \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

- % B representa el porcentaje de biodegradación del material a ensayar.
- $(CO_2)_t$ representa la cantidad acumulada de CO_2 producido en el compostaje que contiene el material a ensayar, expresado en gramos por recipiente.
- $(CO_2)_b$ representa la cantidad acumulada de CO_2 generado en los reactores donde está el blanco, expresado en gramos por recipiente
- $ThCO_2$ representa la cantidad teórica de CO_2 que puede producir el material a ensayar, expresado en gramos por recipiente.

La estimación de la cantidad teórica de CO_2 del material a ensayar varía en función del contenido de %COT, como se muestra en la siguiente expresión:

$$ThCO_2 = SST \times \%COT \times 44/12 \quad \text{Ec.10}$$

Donde:

- SST hace referencia a la cantidad de sólidos secos totales del material a ensayar instauradas en cada uno de los reactores al inicio del ensayo, expresado en gramos y el %COT representa la proporción de carbono orgánico total presente en la masa seca del material a ensayar, expresado en porcentaje.

❖ **Validez del estudio**

- La diferencia entre el % B del material de referencia en los reactores debe ser menor del 20% al finalizar el ensayo.
- El grado de biodegradación del material de referencia tiene que ser superior al 70% al transcurrir un periodo de tiempo de 45 días.
- Es correcto si en el inóculo se generan más de 50 mg de CO_2 / g de SV y menos de 150 mg de CO_2 / g de SV tras pasar un periodo de tiempo de 10 días desde que se comenzó el ensayo.

7. CONCLUSIONES

En la actualidad queda mucho por avanzar dentro del campo de biodegradabilidad y compostabilidad de plásticos, sin embargo, gracias a la ayuda de la normativa en esta materia se ha conseguido la implantación de compuestos biodegradables y compostables en una amplia variedad de industrias, ya que gracias a esto se han incentivado a los diferentes empresarios a apostar por plásticos más sostenibles con el medio ambiente.

Por otro lado, el desarrollo de plásticos más sostenibles con el medio ambiente ha permitido reducir el principal problema actual que se tiene con los plásticos, es decir, se ha disminuido la cantidad de residuos generados, contribuyendo a reducir los mismos en mares y océanos. Esto va a tener numerosos beneficios para el medio ambiente ya que, si se incrementase la cantidad de plásticos biodegradables o compostables, la producción de plásticos generados a partir de derivados del petróleo disminuiría y con ello se podrían paliar los efectos de la contaminación asociados a la acumulación de los mismos. Además, la utilización de plásticos biodegradables y compostables impulsaría la creación de empleo verde, dando trabajo a millones de personas en todo el mundo.

Después de un estudio de la bibliografía actual, se llega a la conclusión de que el PLA puede ser compostable bajo determinadas condiciones ambientales. Sin embargo, para ampliar el rango de aplicaciones del PLA es necesario añadirle ciertos aditivos que mejoren algunas de sus propiedades. En este sentido, será necesario comprobar la biodegradabilidad y/o compostabilidad de las mezclas de PLA y aditivos. Para ello, se ha diseñado una instalación de acuerdo con la normativa aplicable. La instalación diseñada permitirá conocer las características de biodegradabilidad y/o compostabilidad del nuevo plástico. En caso de cumplir con los requisitos de las respectivas normas, el material se habrá degradado y desaparecido totalmente, dando lugar a un compuesto que puede ser usado como abono (para el caso de compostabilidad) en los diferentes campos de la región, pasando de ser un producto desechable a darle una segunda vida, es decir, alargando el ciclo de vida del producto, dando paso a una nueva economía del plástico más circular, todo ello en un periodo de tiempo relativamente corto (inferior a 6 meses).

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] 14995, U.-E. (2007). *Evaluación de la compostabilidad. Programa de ensayo y especificaciones.*
- [2] Alejandro Vásquez, Elbert Contreras, Andrés Felipe Sánchez, John Rober Muñoz, Alejandro Hoyos y Carmina Gartner. (s.f.). Degradación hidrolítica del PET. *Revista Colombiana de Materiales N.5, 6.*
- [3] Alba, L. C. (2016). *Polímeros biodegradables y química click.* Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [4] ambiente, M. d. (2020). *La desertización en España.* España: Gobierno de España.
- [5] Ana Carolina Lemos Delgado y Alexis Mina Cordoba. (2015). *Polyhydroxyalkanoates (PHA's) produced by bacteria and its potential application to industrial level.* Colombia: Tecnoacademia Nodo Cali.
- [6] Arrieta, M. P. (2014). *Films de PLA y PLA-PHB plastificados para su aplicación en envases de alimentos. Caracterización y análisis de los procesos de degradación.* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] Ashter, S. A. (2016). *Introduction to Bioplastics Engineering.* ELSERVIER.
- [8] Bastioli, C. (2005). *Handbook of biodegradable polymers.* Reino Unido: Rapra.
- [9] Bret D. Ulery, Lakshmi S. Nair and Cato T. Laurencin. (2012). Biomedical Applications of Biodegradable Polymers. *Journal of Polymer Science*, 63.
- [10] Bustamante, B. P. (2012). La degradación de los plásticos. *Revistas académicas, Universidad EAFIT*, 20.
- [11] Caicedo, A. M. (2011). Obtención de un catalizador ácido derivado de almidón de yuca para la síntesis de ésteres grasos. *Chemistry*, 6.
- [12] Cairplas. (2018). Obtenido de <https://cairplas.org.ar/plasticos/>
- [13] Cecilia Sundberg, Sven Smars and Hakan Jönsson. (2004). Low pH as an Inhibiting Factor in the Transition from Mesophilic to Thermophilic Phase in Composting. *Bioresource Technology.*

- [14] *COPLASEM*. (2020). Obtenido de <https://coplasem.es/embases-y-embalajes/bolsas-compostables/#:~:text=El%20compostaje%20es%20un%20proceso,donde%20se%20produce%20la%20biodegradaci%C3%B3n>.
- [15] *CymitQuimica.com*. (s.f.). Obtenido de <https://cymitquimica.com/products/TR-D299603/140-56-7/dexon/>
- [16] D. J. Suler and M. S. Finstein. (1976). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ formation in Bench-Scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Applied and environmental microbiology*, 6.
- [17] D. R. Lu, C. M. Xiao, S. J. Xu. (2009). Starch-based completely biodegradable polymer materials. *Express Polymer Letters*, 10.
- [18] David Aradilla Zapata, Ramón Oliver Pujol y Francesc Estrany Coda. (2010). Biodegradable polymers: an alternative of future to the sustainability of the environment. *REVISIÓN*, 5.
- [19] *Decoora*. (2020). Obtenido de <https://www.decoora.com/que-es-la-goma-laca-y-los-usos-que-tiene/>
- [20] Diana Ramos Picos, Martha Gómez Carril, Dianelis Fernández Mena y Leopoldo Núñez. (2000). Microesferas biodegradables de liberación controlada para administración parenteral. *RevCubanaFarm*, 8.
- [21] Díaz, N. B. (2017). *Microesferas de biopolímeros mediante microfluídica para aplicación biomédica*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- [22] Ecoembes. (s.f.). *Guía de etiquetado ambiental para envases y embalajes*.
- [23] *Economiacircular*. (2020). Obtenido de https://economiacircular.org/wp/?page_id=62
- [24] *EcuRed*. (2020). Obtenido de https://www.ecured.cu/Bacterias_mes%C3%B3filas#:~:text=Concepto%3A,entre%2030%20y%2040%20C.
- [25] *EcuRed*. (2020). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Almid%C3%B3n>

- [26] Élidea Beatriz Hermida. (2004). Cambios microestructurales durante la cristalización de biopolíester biodegradables. *CONGRESO CONAMET/SAM*, (pág. 4). Buenos Aires.
- [27] (2004). *EN ISO 17556. Plastics - Determination of the ultimate aerobic biodegradability in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved*.
- [28] *Enestadocrudo*. (24 de Febrero de 2020). Obtenido de <https://www.enestadocrudo.com/compostable-biodegradable/>
- [29] Europea, C. (2018). *Real Decreto 293/2018, de 18 de mayo, sobre reducción del consumo de bolsas de plástico y por el que crea el registro de productores*. España: BOE.
- [30] Europea, C. (16 de Enero de 2018). *Una estrategia europea para el plástico en una economía circular*. Obtenido de https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0023.02/DOC_1&format=PDF
- [31] europea, C. (2020). *Gobierno de España*. Obtenido de <http://www.exteriores.gob.es/RepresentacionesPermanentes/EspanaUE/es/quees2/Paginas/default.aspx>
- [32] Europea, D. (1994). *DIRECTIVA 94/62/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO*.
- [33] Europeo, P. (19 de Diciembre de 2018). *Noticias Parlamento Europeo*. Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20181212STO21610/reciclaje-y-residuos-de-plastico-en-la-ue-hechos-y-cifras>
- [34] (s.f.). *Evaluación de la degradación de mezclas de bioplásticos en compostaje a alta temperatura*. ETSEIB.
- [35] *Falcotitlan*. (2016). Obtenido de <http://www.falcotitlan.org/2016/04/ideonella-sakaiensis-la-bacteria-que.html>
- [36] Fuentes, A. F. (2015). *Tesis: Análisis de la degradación, desintegración y biodegradabilidad de las bolsas de poliéster y almidón en compostaje de residuos*

urbanos: *Escalas de laboratorio e industrial*. Escuela técnica superior de ingenieros de montes, forestal y del medio natural.

- [37] Fumihito Miyatake and Kazunori Iwabuchi. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*.
- [38] G.C. Avendaño-Romero, A. López-Malo y E. Palou. . (2013). *Propiedades del alginato y aplicaciones en alimentos*. México: Universidad de las Américas Puebla.
- [39] Gabriela Polo Aguilar y José Iván Estrada Quintana. (Diciembre de 2010). *Monografias.com*. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos82/biomateriales-aplicados-medicina-siliconas/biomateriales-aplicados-medicina-siliconas2.shtml>
- [40] García, S. (2009). *Referencias históricas y evolución de los plásticos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [41] Gaurav Kale, Sher Paul Singh y Rafael Auras. (2006). Degradation of Commercial Biodegradable Packages under Real Composting and Ambient Exposure Conditions. *Journal of Polymers and the Environment* , 16.
- [42] *Greenpack*. (21 de Julio de 2017). Obtenido de <https://greenpack.com.co/diferencia-entre-biodegradable-degradable-y-compostable/#:~:text=Los%20productos%20biodegradables%20son%20de%20origen%20vegetal.&text=Los%20t%C3%A9rminos%20biodegradable%20y%20compostable,buena%20calidad%20es%20decir%20composta>
- [43] Greenpeace, D. c. (2016). *Greenpeace*. Obtenido de http://archivos.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/Plasticos_en_el_pescazo_y_el_mariscoLR.pdf
- [44] Guillebon, B. d. (2011). *Bioplásticos*. Remar (Red Energía y Medio Ambiente).
- [45] *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*. (2012). Sina Ebnesajjad.
- [46] Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Routledge.

- [47] Hermida, J. I. (2017). *Análisis comparativo de diferentes procesos de reciclado mecánico de poli(ácido láctico)*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [48] Howden. (2020). Obtenido de <https://www.howdeniberia.com/contaminacion-accidental-responsabilidad-medioambiental-diferencias-necesidades/>
- [49] Ing. Daniel Sztern, MGA, Lic. Miguel A. Pravia, Oficina de Planeamiento y Presupuesto y Unidad de Desarrollo Municipal. (s.f.). *Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos*. ORGANIZACION PANAMERICANA.
- [50] Instituto Geográfico Nacional. (10 de Octubre de 2020). Obtenido de Centro Nacional de Información Geográfica: https://www.ign.es/espmap/mapas_riesgos_bach/Riesg_Mapa_08.htm
- [51] Jiménez, E. (17 de Enero de 2018). *Greenpeace*. Obtenido de <https://es.greenpeace.org/es/noticias/mucho-ruido-y-pocas-nueces-en-la-lucha-contra-el-plastico/>
- [52] Joaquín Moreno Casco y Raul Moral Herrero. (2008). *Compostaje*. Madrid, Barcelona y México: Mundiprensa.
- [53] Jordi López, Sandra Kalil y Rosana Amaral Schiaffino. (2010). Proteolisis enzimática del colágeno dentinario. *Avance en Odontostomatología*, 10.
- [54] Jose Ochoa Gómez, Tomás Roncal, Elena Díaz de Apodaca y Jesús Torrecilla. (2007). *Bioplásticos*. LEIA.
- [55] Julián Esteban Barrera, John Alexander Rodríguez, Jairo Ernesto Perilla y Néstor Ariel Algecira. (2007). Estudio de la degradación térmica de poli(alcohol vinílico) mediante termogravimetría y termogravimetría diferencial. *Revista ingeniería e investigación*, 7. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64327215.pdf>
- [56] Juliana Meneses, Catalina María Corrales y Marco Valencia. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de Yuca. *EIA*, 11.

- [57] Julio San Román, Alberto Gallardo, Blanca Vázquez y Antonio López Bravo. (2000). "Ingeniería de tejidos": contribución de los polímeros al desarrollo de los procesos de regeneración tisular. *CSIC*, 15.
- [58] Li Shein, Juliane Haufe y Martin k. Patel. (2009). *Product overview and market projection of emerging bio-based plastics*. Países bajos: Utrecht University.
- [59] Lizarbe, M. A. (2007). Sustitutivos de tejidos: de los biomateriales a la ingeniería tisular. *Revista de la Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales*, 23.
- [60] Llamas, M. d. (2010). *Síntesis de redes poliméricas interpenetradas para la remoción de fluoruro y cadmio en solución acuosa*. IPICYT.
- [61] Loong-Tak Lim, Rafael Auras y Maria Rubino. (2008). Processing technologies for poly (lactic acid). *ELSEVIER*, 16.
- [62] M. A. Sánchez Monedero, A. Roig, C. Paredes y M. P. Bernal. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the rutgers system and its effects on pH, and maturity of the composting mixtures. *Bioresourfe Technology*, 8.
- [63] Marcus Eriksen ,Laurent C. M. Lebreton, Henry S. Carson, Martin Thiel, Charles J. Moore, Jose C. Borerro, Francois Galgani, Peter G. Ryan and Julia Reisser. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLOS ONE*, 15.
- [64] Margarita San Andrés, Ruth Chércoles, José Manuel de la Roja y Marisa Gómez. (2006). *Factores responsables de la degradación*.
- [65] María Jesús Romero y Adrián Ortiz. (3 de Agosto de 2020). *Cubo verde*. Obtenido de El futuro de los plásticos: <http://www.elcuboverde.com/2018/08/03/el-futuro-de-los-plasticos/#:~:text=vertido%20y%20de%20incineraci%C3%B3n%20de%20residuos%20de%20pl%C3%A1stico%20siguen%20siendo>
- [66] Martell, A. M. (2013). *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable base alginato*. México: Univerdidad Nacional Autónoma de México.
- [67] Martín, L. S. (29 de Octubre de 2019). *OPCIONES. Impulsem el consum conscient*. Obtenido de <https://opcions.org/es/consumo/biodegradable-compostable/>

- [68] *mexpolímeros*. (s.f.). Obtenido de <https://www.mexpolimeros.com/tg.html>
- [69] Miguel Ángel Sánchez Monedero, Asunción Roig, Concepción Paredes y María Pilar Bernal. (2001). Nitrogen Transformation during Organic Waste Composting by the Rutgers System and Its Effects on pH, EC and Maturity of the Composting Mixtures. *Bioresource Technology* .
- [70] Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini. (2008). *Monomers, polimers and composites from renewablw resources*. Reino Unido: ELSEVIER.
- [71] Moraño, X. (19 de Agosto de 2019). Obtenido de <https://join.clickoala.com/ecolabel-que-es-para-que-sirve/>
- [72] *Nanovexbiotech*. (2014). Obtenido de <http://www.nanovexbiotech.com/858-2/>
- [73] Nengwu Zhu, Changyan Deng, Yuanzhu Xiong and Huiyue Qian. (2005). Performance Characteristics of Three Aeration Systems in the Swine Manure Composting. *Bioresource Tecnology*, 95.
- [74] ONU. (31 de Julio de 2019). *ONU*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2019/07/1460041>
- [75] *ONU*. (2020). Obtenido de <https://www.un.org/es/about-un/>
- [76] *OWS*. (2020). Obtenido de https://www.ows.be/es/lc_divisions/biodegradabilidad-compostabilidad-y-ecotoxicidad/
- [77] Paola Scarfato, Luciano Di Maio y Loredana Incarnato. (2015). *Recent advances and migration issues in biodegradable polymers from renewable sources for food packaging*. Wiley.
- [78] Pedro Bueno Márquez, Manuel Jesús Díaz Blanco y Francisco Cabrera Capitan. (s.f.). *Factores que afectan al proceso de compostaje*. Huelva: Departamento de ingeniería química, química física y química orgánica. Universidad de Huelva. Facultad de ciencias experimentales.
- [79] Peraza, A. M. (2017). *Estudio preliminar de la biodegradación de plásticos por bacterias marinas*. Tenerife: Facultad de ciencias de la universidad de La laguna.

- [80] Piergiorgio Gentile, Valetia Chiono, Irene Carmagnola y Paul V Hatton. (2015). An overview of poly(lactic-co-glycolic) acid (PLGA)-based biomaterials for bone tissue engineering. *PubMed*, 2.
- [81] Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. (2011). *Revista Tecnocientífica URU*, 7.
- [82] Raffino., M. E. (4 de julio de 2020). *Concepto.de*. Obtenido de <https://concepto.de/plastico/>
- [83] Ricardo Heliodoro Gil-Horán, Rosa María Domínguez-Espinosa y Juan Daniel Pacho-Carrillo. (2008). *Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: Procesos de separación y purificación*. México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C.
- [84] Rudnik, E. (2019). *Compostable Polymer Materials*. Newnes: ELSERVIER.
- [85] Samaniego, J. M. (26 de abril de 2019). *Cultura científica* . Obtenido de <https://culturacientifica.utpl.edu.ec/2019/04/biopolimeros-una-alternativa-a-los-plasticos-derivados-del-petroleo/>
- [86] Sánchez, C. (2019). Biodegradabilidad y compostabilidad: diferencias, procesos y ensayos para certificarlas. *ITENE*, 2.
- [87] *Scrap y Rezagos S.R.L.* (2020). Obtenido de <http://www.rezagos.com/pages/reutilizacion-y-reciclaje>
- [88] Service, N. R. (2000). *Environmental Engineering National Engineering Handbook*. USDA.
- [89] *SHALBAIDA*. (9 de Julio de 2019). Obtenido de <https://www.shalbaida.com/blog-sh-albaida/diferencias-biodegradable-compostable/>
- [90] *Tecnología de los plásticos*. (8 de Agosto de 2011). Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>
- [91] *Textos científicos*. (2020). Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/polimeros/acido-polilactico>
- [92] *Thefreedictionary*. (2020). Obtenido de <https://es.thefreedictionary.com/reparaci%C3%B3n>

- [93] Tortosa, G. (10 de Febrero de 2015). *Compostando ciencia lab*. Obtenido de <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>
- [94] U.Tomati, E.Galli and E.Madejon. (2000). Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Science & utilization*, 9.
- [95] (2010). *UNE- EN 14855. Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado. Parte 2: Medición gravimétrica del dióxido de carbono liberado.*
- [96] (2001). *UNE-EN 13432. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la adaptación final del envase o embalaje.*
- [97] (2003). *UNE-EN 14045. Envases y embalajes. Evaluación de la desintegración de los materiales de envases y embalajes en los análisis prácticos orientados bajo condiciones definidas de formación de compost.*
- [98] (2003). *UNE-EN 14046. Envases y embalajes. Evaluación de la biodegradabilidad aeróbica última y de la desintegración de los materiales de envase y de embalaje bajo condiciones controladas de formación de compost. Método mediante el análisis de CO2 liberado.*
- [99] (2007). *UNE-EN 14987. Plásticos. Evaluación de la aptitud de los plásticos para ser eliminados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Programa de ensayo para la aceptación final y especificaciones.*
- [100] (2007). *UNE-EN 14995. Plásticos. Evaluación de la compostabilidad. Programa de ensayo y especificaciones.*
- [101] (2019). *Anexo C: Polímeros biodegradables con aplicaciones en suturas quirúrgicas.*
- [102] Villanueva, J. W. (2016). *Evaluación de la degradación de mezclas de bioplásticos en compostaje a alta temperatura*. Barcelona: UPC.
- [103] Viteri, A. L. (2018). *Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones*. UNED.

- [104] Waldir Estela, Mojmír Rychtera, Karel Melzoch, Elena Quillama y Erida Egoavil. (2007). Producción de ácido láctico por *Lactobacillus plantarum* L10 en cultivos batch y continuo. *Revista Peruana de Biología*, 6.
- [105] Werner Bidlingmaier, Verena Grauenhorst, Markus Schlosser and Joachim Müsken. (2007). Odor emissions from composting plants. *Waste Management*, 189.
- [106] *Wikipedia*. (2020). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Lactida>
- [107] *Wikipedia*. (2020). Obtenido de <https://es.qaz.wiki/wiki/Hexamethylbenzene>
- [108] Xataka. (12 de Enero de 2018). *CienciasAmbientales*. Obtenido de <https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/china-crisis-medioambiental-15269>
- [109] Zulay Mármol, Gisela Páez, Marisela Rincón, Karelén Araujo, Cateryna Aiello, Cintia Chandler y Edixon Gutiérrez. (2011). Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. *Revista Tecnocientífica URU*, 7.