



Universidad de Oviedo

**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

**GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL QUÍMICA**

**ÁREA DE QUÍMICA INORGÁNICA**

**POLÍMEROS SOSTENIBLES EN LA INDUSTRIA QUÍMICA**

**Dña. CÁRCABA ÁLVAREZ, Claudia**  
**TUTOR: D. GARCIA ALVAREZ, Joaquín**

**FECHA: Febrero de 2025**



# 1. Índice de contenidos

1.	Índice de contenidos .....	2
2.	Lista de abreviaturas .....	3
3.	Introducción.....	4
3.1.-	¿Qué son los polímeros sostenibles?.....	4
3.2.-	¿Por qué sustituir al plástico?.....	5
3.3.-	Plásticos de un solo uso .....	6
4.	Polímeros sostenibles .....	8
4.1-	Ácido poliláctico (PLA).....	8
4.2-	Polihidroxialcanoato (PHAs).....	10
4.3-	Tereftalato de polietileno (PET) .....	12
4.4-	Succinato de polibuteno (PBS).....	13
4.5-	Tereftalato de politrimetileno (PTT).....	15
4.6-	Furanoato de polietileno (PEF).....	16
4.7-	Policaprolactona (PCL).....	17
4.8-	Ácido poliglicólico (PGA) .....	19
4.9-	Alcohol polivinílico (PvOH).....	20
4.10-	Polióxido de polietileno (PEO) .....	22
4.11-	Poliácido levulínico (PAL).....	24
5.	Conclusiones.....	26
6.	Bibliografía .....	27



## 2. Lista de abreviaturas

ABS	Acrlonitrilo butadieno estireno
FDA	(U. S.) Food and Drug Administration
PAL	Poliácido levulínico
PBS	Succinato de polibuteno
PCL	Policaprolactona
PEF	Furanoato de polietileno
PEG	Polietilenglicol
PEO	Poli(óxido de etileno)
PET	Tereftalato de polietileno
rPET	Tereftalato de polietileno reciclado
PGA	Ácido poliglicólico
PHA	Polihidroxicanoatos
PLA	Ácido poliláctico
PTT	Tereftalato de politrimetileno
PVA	Alcohol polivinílico
PvOH	Alcohol polivinílico
UV	(luz) Ultra violeta



## 3. Introducción

### 3.1.- ¿Qué son los polímeros sostenibles?

Los polímeros sostenibles o ecológicos son compuestos sintéticos y biodegradables diseñados con el propósito de sustituir a los plásticos y otros polímeros sintéticos para minimizar el impacto medioambiental de estos.<sup>[1-3]</sup> Para que un polímero pueda considerarse sostenible, este puede:

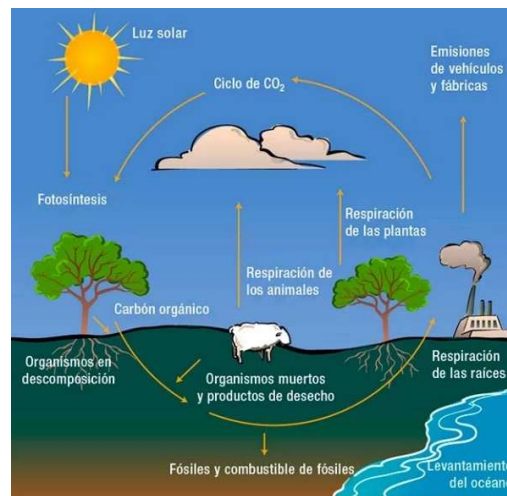
- i) *Ser biodegradable*: esto implica que el material tiene la capacidad de descomponerse de manera natural en un periodo de tiempo razonable, gracias a la acción de microorganismos como bacterias, hongos y otros agentes biológicos presentes en el medio ambiente. Durante este proceso, el material se transforma en compuestos más simples, como dióxido de carbono, agua, biomasa o minerales, que pueden reintegrarse de forma segura a los ciclos naturales sin generar residuos tóxicos ni impactos significativos en los ecosistemas. Esta propiedad es clave para minimizar la acumulación de desechos y promover un modelo de economía circular más sostenible.
- ii) *Provenir de fuentes bio-renovables no derivadas del petróleo*: es decir, materiales obtenidos principalmente a partir de biomasa renovable. Esta biomasa incluye compuestos naturales como la celulosa, el almidón y otros polisacáridos, que son recursos sostenibles capaces de regenerarse en períodos de tiempo relativamente cortos y que contribuyen a reducir la dependencia de combustibles fósiles y el impacto ambiental asociado.



### 3.2.- ¿Por qué sustituir al plástico?

Hoy en día, numerosos esfuerzos de investigación se centran en el diseño y la síntesis de polímeros sostenibles, con el propósito de desarrollar alternativas viables y económicamente competitivas al plástico de origen petrolífero. Estos nuevos polímeros buscan cumplir con los dos principios fundamentales anteriormente mencionados: *i) ser biodegradables*, es decir, descomponerse en un periodo de tiempo moderado bajo la acción de microorganismos, transformándose en compuestos simples que se reintegran al medio ambiente sin causar daños significativos; y *ii) provenir de fuentes bio-renovables no derivadas del petróleo*, como la biomasa renovable, que incluye sustancias como la celulosa o el almidón. Por tanto, el objetivo último de estas investigaciones es reducir al máximo la producción de plásticos tradicionales, conservando las ventajas que este material aporta a la vida moderna mientras se minimizan los graves problemas ambientales que su uso masivo genera a nivel global.

El principal motivo para la eliminación del plástico tradicional es su particular forma de crear residuos. Así, multitud de objetos plásticos dejan de ser útiles en un periodo corto de tiempo (de 12 a 15 minutos de media para plásticos de un solo uso)<sup>[4,5]</sup> y sin embargo, no se reintegran al ciclo natural de carbono como pueden hacer otros materiales como la madera, si no que se desintegran en partículas de menor tamaño, conocidas popularmente como microplásticos,<sup>[6]</sup> sin cambiar su composición química e integridad. Estas partículas pueden diseminarse con extrema facilidad antes de considerarse completada su descomposición, proceso que tarda varios cientos de años. Un ejemplo de este suceso puede ser el de una botella de plástico tipo PET (tereftalato de polietileno), que a pesar de tener un uso medio de 15 minutos aproximadamente, tarda de 450 a 500 años en reintegrarse al ciclo del carbono.<sup>[7,8]</sup>



**Figura 3.1:** Esquema del ciclo del carbono (imagen obtenida de la página web: <https://www.greenteach.es/ciclo-del-carbono-o-ciclo-biogequimico-del-carbono/>)

### 3.3.- Plásticos de un solo uso

Debido a su prolongado tiempo de descomposición, los plásticos no biodegradables tienden a acumularse de manera masiva en el medio ambiente. Esta producción continúa siendo muy elevada y, hasta cierto punto, se considera necesaria, dado que las alternativas sostenibles no se han adoptado ampliamente. En consecuencia, la dependencia de estos plásticos tradicionales sigue alimentando la crisis global de residuos. Por tanto, y aunque el problema de la acumulación de residuos procedentes de plásticos de un solo uso tiene una importancia vital, su eliminación total no tiene por qué ser la solución. La utilización de plásticos en la fabricación de objetos de un solo uso aporta numerosas ventajas, como un gran control en el proceso de fabricación, alta durabilidad y cohesión.<sup>[9]</sup> Gracias a estas propiedades, el plástico se emplea de forma generalizada en sectores como el empaquetado, la cubertería o la higiene.<sup>[10]</sup> No obstante, aunque reducir el uso y la producción de este material, y sustituirlo por opciones reutilizables, sería lo ideal, existen ciertos productos que requieren ser

desechables. Un claro ejemplo es el instrumental médico, donde se incluyen agujas, mascarillas, guantes, batas quirúrgicas.<sup>[11]</sup> Dado que gran parte de estos objetos de un solo uso se fabrican todavía a partir de plásticos derivados del petróleo, y considerando las notables desventajas medioambientales asociadas, la investigación en polímeros sostenibles resulta fundamental. Este esfuerzo busca desarrollar materiales capaces de reemplazar los plásticos tradicionales, mitigando así el impacto negativo que generan en el entorno.



**Figura 3.2:** Ejemplos de plásticos de un solo uso en medicina (imagen obtenida de la página web: <https://greentology.life/2024/01/26/recicla-startup-residuos-plasticos-medicos-desechables/>)



## 4. Polímeros sostenibles

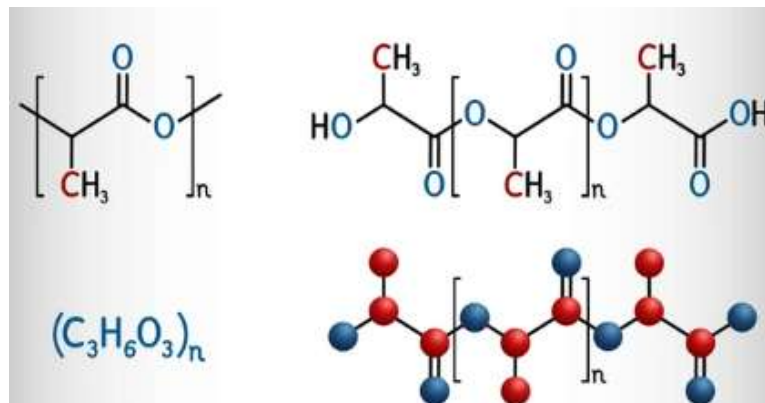
Una vez identificadas tanto las ventajas como los problemas asociados al empleo masivo de plásticos convencionales en la *Introducción*, resulta oportuno explorar las diferentes alternativas sostenibles disponibles. En los siguientes apartados de este *Trabajo de Fin de Grado* se presentarán ejemplos concretos de polímeros sostenibles que, gracias a su origen renovable y/o capacidad de biodegradación, ofrecen una respuesta más responsable y acorde a los retos medioambientales actuales relacionados con el empleo de plásticos tradicionales. Por tanto, el objetivo principal de este *Trabajo Fin de Grado* consiste en demostrar la viabilidad y el potencial del uso de plásticos derivados de polímeros sostenibles en diversos sectores industriales.

### 4.1- Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA) es un poliéster termoplástico derivado del ácido láctico, que se produce a partir de la fermentación de azúcares o almidones provenientes de plantas como el maíz, la patata o la caña de azúcar.<sup>[12]</sup> Gracias a su biocompatibilidad, ha sido reconocido como seguro por la FDA (U.S. Food and Drug Administration), lo que ha permitido su amplio uso en el ámbito de la medicina estética y medicina reconstructiva. Entre sus aplicaciones destacan los materiales de sutura, los tornillos ortopédicos y la restauración de tejidos blandos en casos de lipoatrofia o cicatrices.<sup>[13]</sup> Además de sus aplicaciones médicas, el PLA destaca por su potencial de biodegradación, sobre todo bajo condiciones de compostaje industrial (temperaturas y niveles de humedad elevados y un adecuado suministro de microorganismos). En este entorno, el PLA puede descomponerse en un periodo de tiempo relativamente corto, transformándose en compuestos simples como dióxido de carbono, agua y biomasa. Sin embargo, en condiciones ambientales más frías o con menor presencia de los microorganismos necesarios, su degradación resulta mucho más lenta, por lo que la gestión adecuada tras su uso es clave para aprovechar su característica de biodegradabilidad. En este sentido, fabricantes de



polímero PLA, como *PrimeBioPolymers*, aseguran un degradado en partículas de menos de 2 mm de diámetro en los primeros 3 meses después de su fabricación y una desintegración de hasta el 90% a los 6 meses.<sup>[14]</sup>



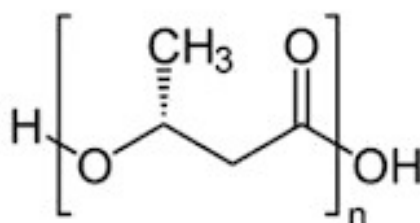
**Figura 4.1:** Estructura química del PLA (imagen obtenida de la página web: <https://www.alamy.com/stock-photo/polylactic-acid.html>)

Este polímero pretende sustituir plásticos tipo poliestireno, utilizados como envasado alimenticio, aislamiento térmico y acústico o textil.<sup>[15]</sup> No obstante, el polímero poliláctico en su estado actual no puede competir con el reducido coste y flexibilidad que prometen los plásticos derivados del petróleo, y su baja maleabilidad y coste suponen un problema en su aplicación. En este momento, se están investigando formas para modificar la composición del PLA de manera que se preserven sus ventajosas cualidades y se optimicen aquellas que requieren mejora. Cabe destacar la acción de ésteres de ácido cítrico,<sup>[16]</sup> polietileno glicol (PEG) o monoésteres de glucosa<sup>[17]</sup> en la investigación de la mejora de la flexibilidad y la resistencia al impacto del PLA.

## 4.2- Polihidroxicanoato (PHAs)

Los polihidroxicanoatos (PHAs) son polímeros bioplásticos termoestables que se consideran polímeros sostenibles debido a las siguientes razones: [18,19]

- i) *Origen renovable*: Los PHAs son biopolímeros cuyos monómeros son producidos por microorganismos (como bacterias) a partir de fuentes renovables, como azúcares, aceites vegetales y residuos agrícolas o industriales. Esto los diferencia de los plásticos derivados del petróleo, que dependen de recursos no renovables
- ii) *Biodegradabilidad*: Los PHAs son completamente biodegradables en una amplia gama de entornos (suelo, agua marina y compostaje industrial o doméstico). Al descomponerse, no dejan microplásticos persistentes y pueden reincorporarse al ciclo natural del carbono en un periodo de tiempo razonable.
- iii) *Baja toxicidad*: Los productos de la descomposición de los PHAs no son tóxicos para el medio ambiente ni para los organismos vivos.
- iv) *Compatibilidad con una economía circular*: Su producción puede integrarse con procesos de biorrefinería, utilizando residuos como materia prima y reduciendo impactos ambientales.



**Figura 4.2:** Estructura química general de los polihidroxicanoatos (imagen obtenida de la página web: <https://www.mexpolimeros.com/bio/pha.html>)



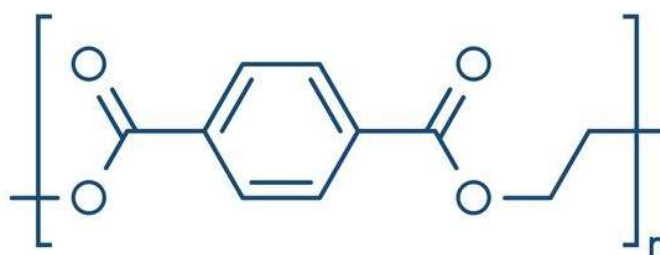
Así, actualmente los polihidroxicanoatos se obtienen en su mayoría a partir de residuos agrícolas como el suero lácteo, el almidón o el residuo de soja y su carácter biocompatible los hace relevantes en el campo de la medicina, donde se utilizan para la fabricación de suturas quirúrgicas, remplazos de vasos sanguíneos o placas para la estimulación del crecimiento óseo.<sup>[20]</sup> A pesar de su futuro brillante en el ámbito de las prótesis médicas, su principal aplicación actual es el de sustitutos de compuestos plásticos sintéticos como el polipropileno y poliestireno en la fabricación de embalajes alimenticios y coberturas impermeables.

Como ya se ha comentado, la degradación de estos polímeros se realiza por acción de bacterias y hongos comunes generando agua y dióxido de carbono en atmósferas aeróbicas, y agua y metano en condiciones anaeróbicas. Según ensayos de laboratorio, la degradación del polihidroxicanoato depende del tipo y condiciones del cultivo a alimentar y de la temperatura de ensayo, siendo a mayor temperatura mayor velocidad de crecimiento del cultivo y con ello mayor velocidad de desintegración. Por ejemplo: un cultivo de *Aspergillus* consigue una degradación del 90% a 50° C en 5 días. Por lo general, se ha establecido una velocidad de biodegradación moderada de entre 3 y 9 meses por varios microorganismos comunes.<sup>[21]</sup>

Las principales ventajas que suponen el uso del PHA como sustituto de otros polímeros derivados del petróleo, como el polipropileno, son: *i*) una mejor resistencia a la radiación ultravioleta (UV); *ii*) una ligera mejora en la resistencia a la tracción; *iii*) una degradación a ritmo razonable; y *iv*) el aprovechamiento de residuos industriales para su fabricación. No obstante, su mayor densidad y coste de producción puede resultar un impedimento a la hora de establecerse como una alternativa a otros compuestos derivados del petróleo.

### 4.3- Tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero termoplástico tipo poliéster que se obtiene mediante la policondensación del ácido tereftálico (obtenido a partir de la oxidación del *p*-xileno, presente en gases de cok) y el etilenglicol, utilizado como anticongelante en multitud de industrias que puede ser obtenido a partir de caña de azúcar.<sup>[22]</sup>



**Figura 4.3:** Estructura química del tereftalato de polietileno (imagen obtenida de la página web: <https://www.alamy.com/polyethylene-terephthalate-pet-pete-polyester-plastic-chemical-structure-mainly-used-in-synthetic-fibers-and-plastic-bottles-skeletal-formula-image216973638.html>)

Este polímero de uso extendido se emplea principalmente para el envasado de bebidas, bandejas de envasado alimenticio y tipo blíster, aunque gracias a sus propiedades dúctiles y plásticas también tiene aplicaciones en la industria textil, automovilística, electrónica, etc.<sup>[23]</sup>

Si bien el etilenglicol que conforma este material puede provenir de compuestos vegetales (considerándose por tanto como un bioplástico) o del petróleo, la intrínseca alta durabilidad del PET es independiente de su origen, es decir, tardará en integrarse al ciclo del carbono unos 1000 años. No obstante, este compuesto PET puede ser reciclado múltiples veces para múltiples usos, aunque este plástico reciclado (rPET) no se considera apto para envases alimenticios. Tanto el PET como el rPET tienen alta resistencia química y térmica, y buena

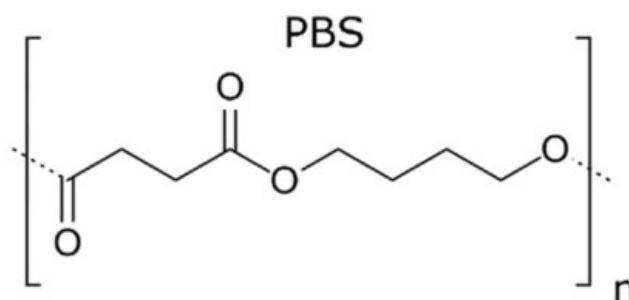


resistencia al desgaste y plegado. Además, tienen considerable resistencia al desgaste por contacto con dióxido de carbono, oxígeno y humedad.

Las principales desventajas del uso de polímeros tipo PET son: *i*) el elevado tiempo de degradación; *ii*) el medio de degradación requerido; y *iii*) la imposibilidad de crear objetos opacos, si bien admite ciertos tintes.<sup>[24]</sup> La degradación de este polímero se ve acelerada bajo ciertas circunstancias: *i*) degradación térmica (debida a un aumento de temperatura hasta su incineración); *ii*) degradación causada por luz, (concretamente por emisiones con longitud de onda cercana a la luz ultravioleta o UV); y *iii*) degradación por hidrólisis. Específicamente, la degradación por acción de luz UV afecta a este material empeorando sus propiedades mecánicas y elásticas, mientras que las degradaciones por acción térmica o hidrolítica consiguen acelerar el proceso de degradación completa significativamente. No obstante, estos procesos no suceden espontáneamente, por lo que los residuos de PET deben de ser tratados para una degradación acelerada.<sup>[25]</sup> No obstante, el hecho de que se pueda reciclar varias veces es un avance considerable para la industria respecto a los plásticos convencionales y en la actualidad supone un ahorro de hasta 200 000 toneladas anuales de plástico PET virgen.

#### 4.4- Succinato de polibuteno (PBS)

El polímero succinato de polibuteno (PBS) es una resina tipo poliéster alifático. Este compuesto se considera termoplástico. El PBS se obtiene por policondensación de 1,4-butanodiol y ácido succínico, ambos compuestos obtenidos a partir de caña de azúcar, yuca o maíz.<sup>[26]</sup>



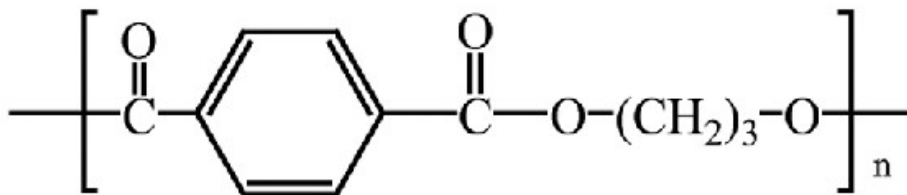
**Figura 4.4:** Estructura química del succinato de polibuteno (imagen obtenida de la página web: [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-formula-of-poly-butylene-succinate-PBS-polycaprolactone-PCL-polyvinyl\\_fig4\\_372285785](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-formula-of-poly-butylene-succinate-PBS-polycaprolactone-PCL-polyvinyl_fig4_372285785))

Gracias a la significativa resistencia térmica y química del PBS, éste se considera como la mejor alternativa biodegradable a compuestos como el polipropileno, el poliestireno o el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Este plástico tiene multitud de aplicaciones como embalajes y cubertería, cápsulas de café o pastillas tipo blíster, ortopedia, como hilo de pesca, etc. El PBS se descompone en biomasa, dióxido de carbono y agua por acción de enzimas presentes en la flora bacteriana común. Los principales estudios de descomposición de este compuesto se han realizado en el contexto de la industria agrícola (descomposición aeróbica) y se han conseguido resultados de una degradación de hasta el 16'9% en un periodo de 28 días.<sup>[27,28]</sup>

El PBS es un material blanco cristalino extremadamente dúctil (con elongaciones de hasta el 300% antes de ruptura) y altamente resistente; siendo estas propiedades dependientes de la temperatura de operación y del grado de cristalización del polímero. Su estabilidad térmica y biodegradabilidad también se encuentran entre las propiedades ventajosas de este producto industrial. No obstante, el PBS resulta más frágil a medida que se aumenta su peso molecular. Finalmente, es importante mencionar su porosidad, que permite el paso de ciertos gases comunes no deseados a su través, lo cual impiden su aplicación en ciertos sectores (embalaje de alimentos y medicamentos entre otros).

#### 4.5- Tereftalato de politrimetileno (PTT)

El tereftalato de politrimetileno (PTT) es un poliéster aromático termoplástico,<sup>[29]</sup> siendo un polímero dúctil sintetizado a partir del 1,3-propanodiol (obtenido a partir de maíz) y ácido tereftálico o bien tereftalato de dimetilo, similar a los reactivos necesarios para la obtención de tereftalato de polietileno (PET), visto en la *Sección 4.3* de esta *Memoria*.



**Figura 4.5:** Estructura química general del tereftalato de politrimetileno (imagen obtenida de la página web: [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structures-of-PET-PBT-and-PTT\\_fig1\\_264088738](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structures-of-PET-PBT-and-PTT_fig1_264088738))

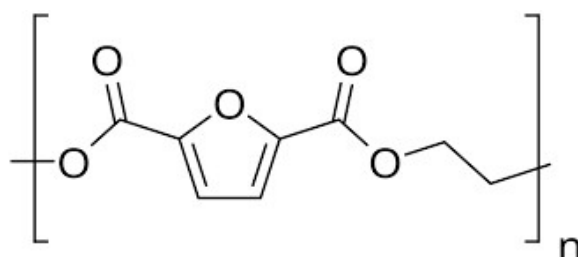
Este polímero tiene considerable elasticidad, fuerza y resistencia a la degradación, al igual que cierta impermeabilidad. Aunque sus propiedades mecánicas y termofísicas son similares al PET, el PTT se distingue por sus mejores propiedades de moldeo, elasticidad y resistencia a las manchas. Estas propiedades hacen del PTT un candidato ideal para la industria textil.<sup>[30]</sup> El PTT acepta tintes variados sin necesidad de un teñido a presión o a altas temperaturas, lo que supone una mejora sustancial respecto a otras fibras derivadas del petróleo como el nylon o el poliéster. Además de su multitud de aplicaciones textiles, el PTT se utiliza también en la fabricación de alfombras y embalajes alimenticios.

Las principales flaquezas del PTT son: *i*) una débil resistencia química, especialmente hacia ácidos y bases fuertes o fenoles; y *ii*) una importante degradación al agua, especialmente a temperaturas superiores a 70 °C. Al igual

que el PET, el polímero PTT no se considera biodegradable, aunque proviene de reactivos de origen no-petrolífero, lo que minimiza el consumo de petróleo en la industria de fibras. A pesar de la escasez bibliográfica existente en el ámbito del estudio del reciclaje a nivel industrial de este polímero, se ha conseguido reconvertir el PTT en pellets tras su uso a escala de laboratorio,<sup>[31]</sup> lo que implica la posibilidad de avances al respecto en el futuro cercano.

#### 4.6- Furanoato de polietileno (PEF)

El furanoato de polietileno (PEF) es un plástico poliéster aromático obtenido a partir del ácido furan-2,5-dicarboxílico (a su vez obtenido de fuentes de biomasa) y del etilenglicol.<sup>[32]</sup> Por tanto, este material se puede procesar de manera similar al PET, actualmente estándar en la industria.



**Figura 4.6:** Estructura química del furanoato de polietileno (imagen obtenida de la página web: [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-PEF\\_fig2\\_360400210](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-PEF_fig2_360400210))

Los principales usos del PEF son en envases relacionados con la industria alimenticia y, gracias a sus propiedades de barrera, envasados de materiales al vacío o protegidos del oxígeno, dióxido de carbono o agua (ideales como envases de bebidas carbonatadas). En circunstancias donde las propiedades de barrera sean especialmente necesarias, y gracias a las propiedades de este material, es posible crear envases de múltiples capas de PEF. Otras propiedades a destacar de





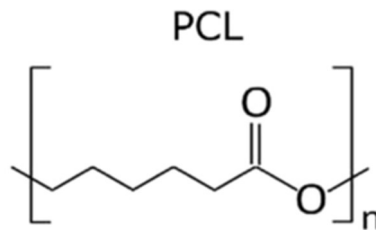
este material son: *i*) una resistencia a la tracción y módulo elástico superiores al PET; y *ii*) una temperatura de transición vítrea elevada (86 °C), lo que hacen del PEF un termoplástico considerablemente resistente al calor.

El uso de PEF como sustituto de otros competidores de origen petrolífero (especialmente su competidor directo el PET) supondría una reducción del 45% de combustibles fósiles (y con ello gases de efecto invernadero), tanto en la propia síntesis del polímero como en el proceso industrial necesario para llevar a cabo este proceso. Además, se estima una reducción del 47% de otros materiales inorgánicos no-renovables presentes en la producción del PET que no están involucrados en la fabricación del PEF.

Los principales desafíos que sufre este material son en lo referente al sector económico, ya que la producción es limitada y no se han realizado estudios en lo referente al reciclaje. El precio de este producto no es de información pública, pero expertos estiman que es cercano al PET. En lo que respecta a la degradación de este biopolímero, ensayos garantizan una degradación orgánica de hasta un año en condiciones controladas de compostaje. No obstante, el objetivo actual es que este material sea reciclado antes de ser desechado, ya que este proceso es compatible con los sistemas de reciclaje comunes en la actualidad.<sup>[33]</sup>

#### **4.7- Policaprolactona (PCL)**

La policaprolactona (PCL) es un poliéster alifático biodegradable creado a partir de la polimerización de la caprolactona (1,7-polioxepan-2-ona),<sup>[34]</sup> compuesto obtenido principalmente por la oxidación del ciclohexanona (derivado del petróleo) con peróxidos.



**Figura 4.7:** Estructura química de la policaprolactona (imagen obtenida de la página web: [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-formula-of-poly-butylene-succinate-PBS-polycaprolactone-PCL-polyvinyl-fig4\\_372285785](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-formula-of-poly-butylene-succinate-PBS-polycaprolactone-PCL-polyvinyl-fig4_372285785))

A pesar de lo que puedan indicar sus orígenes, el PCL es biodegradable. Este polímero puede ser degradado tanto por microorganismos (hongos, algas y bacterias principalmente) como por hidrólisis oxidante, enzimática o catalítica (relacionada con el pH),<sup>[35]</sup> siendo esta última la más eficaz y veloz. La degradación *in vivo* en presencia de agua se completa alrededor del tercer o cuarto año,<sup>[36]</sup> similar al tiempo de absorción total en el cuerpo humano.

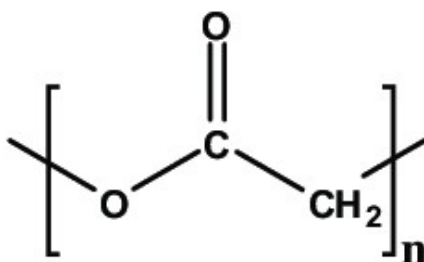
El principal uso actual de este polímero es el de corrector facial tipo relleno (estimulador de colágeno),<sup>[37]</sup> pues su carácter biocompatible previene las reacciones adversas y su degradación paulatina se completa antes del cuarto año. Además, se están realizando multitud de estudios para utilizar PCL en el campo de la medicina, principalmente en lo que respecta a la administración de drogas, curas de heridas<sup>[38]</sup> y otras áreas centradas en la proliferación de células. Finalmente, otro de los usos más relevantes que tiene este bioplástico en la actualidad es en la creación de filamentos para su uso en impresión 3D, con resultados altamente competitivos en mercado y con estudios en lo que respecta al uso de estas impresiones 3D para la creación de implantes y prótesis funcionales.

Este material tiene multitud de características ventajosas, como pueden ser: *i*) la facilidad al pigmentado; *ii*) la alta maleabilidad; *iii*) la resistencia a la grasa y la humedad (es hidrófobo); o *iv*) el bajo coste de fabricación. El PCL es altamente miscible y suele aparecer como refuerzo en otros materiales plásticos gracias a su

facilidad de combinación a componentes como el almidón o la lignina, los cuales aceleran su degradación. Además, el PCL tiene excelentes propiedades mecánicas relacionadas con su gran flexibilidad y elasticidad, al igual que una alta resistencia al impacto. Sin embargo, la principal desventaja de este material es su sensibilidad a altas temperaturas, debido a su baja temperatura de fusión (unos 65 °C), lo que puede minimizar sus posibles aplicaciones en ciertas industrias.

#### 4.8- Ácido poliglicólico (PGA)

El ácido poliglicólico (PGA) es un bioplástico tipo poliéster alifático termoplástico obtenido a partir de polimerización del ácido glicólico, que a su vez es extraído a partir del azúcar de caña.<sup>[39]</sup>



**Figura 4.8:** Estructura química del ácido poliglicólico (imagen obtenida de la página web: [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structures-of-PGA-PLA-and-PLGA-polymers-n-number-of-repeat-units-in-PLA-and-fig1\\_251509220](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structures-of-PGA-PLA-and-PLGA-polymers-n-number-of-repeat-units-in-PLA-and-fig1_251509220))

La biocompatibilidad, y esterilidad y ductilidad de este polímero lo hacen idóneo como material de sutura quirúrgica, siendo la fibra absorbida completamente entre los 60 y 90 días tras la instalación (absorción media). Existen también fibras de PGA de absorción rápida (completada en tanto solo 45 días) y de absorción lenta (máximo 9 meses).<sup>[40]</sup> Del mismo modo, puede ser también utilizado junto con membranas reabsorbibles y como fibras de PGA con revestimiento de otros materiales como el esterato de calcio. Estas fibras son degradadas por hidrólisis química dentro del cuerpo humano, generando ácido glicólico, que es metabolizado



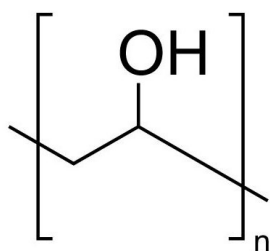
por el organismo y eliminado a través del ciclo de Krebs. Por tanto, su rápida biodegradabilidad (semanas a meses) lo hace ideal para aplicaciones temporales en biomedicina.<sup>[41]</sup>

Existen otros usos minoritarios del PGA en la explotación del petróleo y del esquisto gas, entre otros. Estos compuestos se benefician de las excelentes cualidades de estos polímeros, al igual que de sus propiedades de biodegradación, pues el periodo de degradación del PGA en condiciones tipo compost de dióxido de carbono en agua es de alrededor de un mes. Conjuntamente, el PGA presenta otras posibles propiedades relevantes relacionadas con su alta resistencia mecánica y su alto rendimiento al ser utilizado como de barrera de gas. Además, presenta un punto de fusión elevado (unos 225 °C), mostrando a la vez unas excelentes características de deformación plástica y manejo. Finalmente, cabe mencionar que el PGA tiene buena resistencia tanto a la tracción como a la rotura.

Sin embargo, la principal desventaja que presenta el uso del PGA es su actual producción limitada y su elevado coste consiguiente. Recientemente se ha desarrollado una tecnología de producción industrial de ácido poliglicólico de alto peso molecular,<sup>[42]</sup> lo que puede ser una solución para la reducción de su coste. Otra desventaja notable de este biopolímero es que no es soluble en la mayoría de los disolventes no-orgánicos. Por ello, el uso de PGA y derivados en su estado actual no es viable para uso en sectores como el embalaje o la creación de sustitutos de plásticos de un solo uso.

#### **4.9- Alcohol polivinílico (PvOH)**

El alcohol polivinílico (PVA, también como PvOH) es un biopolímero orgánico y sintético creado a partir de hidrólisis del acetato de polivinilo (cola blanca) y éste a su vez procede de transformaciones químicas a nivel industrial.<sup>[43]</sup>



**Figura 4.9:** Estructura química general de alcohol polivinílico (imagen obtenida de la página web: <https://www.polysciences.com/german/polyvinyl-alcohol-mw-133000>)

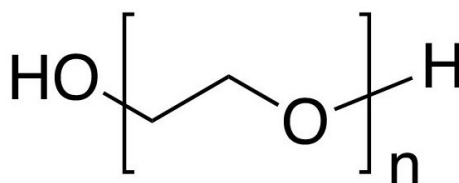
Este polímero tiene los siguientes usos: *i*) como barrera de dióxido de carbono en envases de PET (visto en secciones anteriores); *ii*) como encolado y refuerzo de fibras en la industria textil, espesante en lacas, champús y colas; *iii*) en productos de higiene íntima; y *iv*) en productos de liberación de molde en resinas tipo epoxy o embalajes solubles entre otros.

El reciclaje del PvOH es sencillo y efectivo, ya que solo se necesita disolverlo en agua para romper su estructura molecular, lo que facilita su separación de las impurezas presentes. A continuación, la disolución resultante se filtra para eliminar las impurezas y se elimina el agua de la disolución, regenerando el PvOH inicial. El PvOH regenerado puede utilizarse para fabricar una amplia gama de productos, como bolsas compostables, películas hidrosolubles y adhesivos.<sup>[44]</sup> Además, el alcohol polivinílico puede ser degradado por varios hongos y bacterias. No obstante, dichos microorganismos no siempre están presentes en el medio, como es el caso del PvOH que se deshecha al mar disuelto en agua. En estos casos, no se podría llevar a cabo la degradación total, aunque se ha comprobado una biodegradación parcial de hasta el 15% en 21 días de disoluciones de PvOH en medios ácidos o en aguas residuales. Además de las características citadas con anterioridad, cabe destacar su velocidad de solubilizarse en el agua (4-5 minutos a 95 °C) y la facilidad de manipulación industrial al poder utilizar máquinas de extrusión estándares para su conformación.

El principal problema que presenta este compuesto es su peligro para la vida silvestre. Aunque si se puede biodegradar hasta su transformación completa en ciertos entornos, normalmente este polímero se deshecha al mar disuelto en aguas residuales sin un tratamiento de filtración o eliminación específico, por lo que se mantiene estable en el agua. Una vez en el agua, el PvOH puede ser absorbido por la fauna y flora del entorno y ser acumulado en estos como microplásticos que, a su vez, pueden regresar al ser humano tras ser consumidos. Es por esto por lo que es necesario un tratamiento específico del PvOH antes de la reincorporación de aguas residuales al ciclo natural del agua. Una vez filtrado, el PvOH puede eliminarse con facilidad en plantas de compostaje especializadas, donde se reconvierte en biomasa, agua y CO<sub>2</sub>.<sup>[45]</sup>

#### 4.10- Polióxido de polietileno (PEO)

El polietilenglicol (PEG) u polióxido de polietileno (PEO) es un plástico tipo poliéter que se sintetiza generalmente a partir de fuentes petroquímicas. Su producción industrial involucra la polimerización del óxido de etileno, un derivado del etileno obtenido del petróleo o el gas natural.<sup>[46]</sup> Aunque la producción de PEO a partir de biomasa no es la ruta más común, es posible mediante la conversión de etanol de origen renovable en óxido de etileno.<sup>[47]</sup> Este plástico es considerado biocompatible y extremadamente soluble en varios disolventes como el agua u orgánicos (la acetona, el tolueno, el etanol o el hexano, entre otros).



**Figura 4.10:** Estructura química general del polióxido de polietileno (imagen obtenida de la página web: <https://www.polysciences.com/german/polyethylene-oxide-mw-200000>)



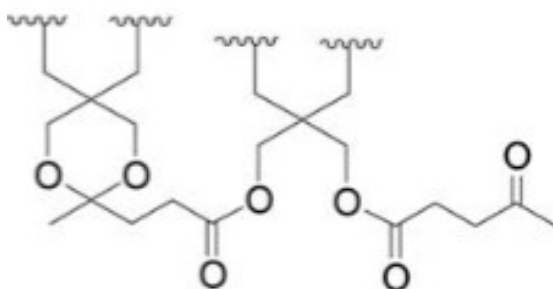
Gracias a su carácter soluble y biocompatible, este plástico tiene un amplio uso en la industria actual, siendo considerable su uso en la fabricación de productos farmacéuticos y cosméticos como agente de consistencia,<sup>[48]</sup> solubilizador y emulsionante al igual que como sustituto de la glicerina para productos con necesidad de retención de humedad. Su carácter homogéneo y estable lo hace ideal como medio de soporte para principios activos en medicinas de carácter oral. Además, sus propiedades como texturizante y estabilizador lo convierten en un importante compuesto en la industria alimenticia. También tiene usos relevantes en el sector de la automovilística, como sustancia lubricante y agente de liberación de moldes. Por tanto, la gran versatilidad del PEO se debe en parte a la amplia gama de pesos moleculares producidos y su disponibilidad al comprador de obtenerlo en forma líquida, granular, en escama, en polvo y sólida.

Sin embargo, las principales desventajas de este polímero son posibles efectos secundarios no deseados en su ingesta relacionados con: *i)* sus efectos laxantes; o *ii)* la posible absorción de compuestos tóxicos no deseados como el óxido de etileno o el 1,4-dioxano (presentes en la formación del PEO y posibles impurezas del producto). Sin embargo, el impacto de estos efectos secundarios ha sido estudiado extensivamente y el uso del PEG está aprobado por la FDA, garantizando la seguridad para el consumo humano.<sup>[49]</sup>

Otra de las desventajas a destacar de este compuesto es su difícil degradación en condiciones normales. Así, la biodegradabilidad del polietilenglicol en aguas residuales industriales es considerada difícil, pues estos compuestos han sido tradicionalmente clasificados como recalcitrantes. No obstante, se han desarrollado métodos para una eliminación más eficiente de este material, como: *i)* la inoculación del PEO con biomasa adaptada; o *ii)* su eliminación con cultivos bacterianos de *Pseudomonas sp.* y *Rhizobium trifolii* en reactores en Batc., obteniéndose, en el último caso, una eliminación de hasta el 98'5% en 20 días en un rango de temperatura de 15-37 °C, condiciones aerobias y PEG con peso molecular de 400.<sup>[50]</sup>

#### 4.11- Poliácido levulínico (PAL)

El poliácido levulínico (PAL) es un biopolímero derivado del ácido levulínico, un compuesto orgánico obtenido a partir de la hidrólisis de biomasa lignocelulósica, obtenida normalmente a partir de residuos agrícolas o forestales, lo que le confiere un carácter sostenible y renovable.<sup>[51]</sup> Se considera un biopolímero debido a su origen natural y su capacidad de biodegradación, lo que lo convierte en una alternativa ecológica a los polímeros sintéticos derivados del petróleo. La síntesis del PAL se basa en la polimerización del ácido levulínico o sus derivados con dialcoholes o diamidas mediante procesos catalíticos, como la polimerización asistida por enzimas, lo que permite obtener materiales con diferentes propiedades mecánicas y térmicas según su estructura y grado de polimerización.<sup>[52]</sup>



**Figura 4.11:** Ejemplo de estructura química general del poli(ácido levulínico-pentaeritritol) (imagen obtenida de la publicación con referencia número 51)

Este tipo de biopolímero ha despertado un gran interés en sectores como el envasado biodegradable, la medicina y la producción de materiales inteligentes, gracias a su versatilidad y compatibilidad ambiental. En la industria del envasado, se utiliza para la fabricación de films y recubrimientos biodegradables que reemplazan los plásticos tradicionales. En el ámbito biomédico, sus derivados se usan para la liberación controlada de fármacos y la producción de materiales biocompatibles para prótesis o suturas reabsorbibles. Además, su potencial en la industria de adhesivos y resinas refuerza su papel como material sostenible en





aplicaciones industriales.<sup>[53]</sup> Su biodegradación ocurre a través de procesos naturales mediados por microorganismos, que descomponen el polímero en compuestos inocuos, como agua, dióxido de carbono y biomasa, sin generar residuos persistentes ni microplásticos dañinos. Esto favorece su integración en un modelo de economía circular, donde los materiales pueden reutilizarse o degradarse sin impacto ambiental significativo. En comparación con otros biopolímeros, el poliácido levulínico destaca por su disponibilidad a partir de fuentes no alimentarias y su capacidad de modificar sus propiedades mediante ajustes en su estructura química, lo que lo convierte en una opción prometedora para la transición hacia una economía más sostenible y libre de plásticos contaminantes.



## 5. Conclusiones

A lo largo de este *Trabajo de Fin de Grado* se ha analizado el potencial de los polímeros sostenibles como alternativa a los plásticos convencionales derivados del petróleo. Se ha demostrado además que existen diversas opciones con propiedades mecánicas y químicas adecuadas para sustituir a los plásticos tradicionales en aplicaciones clave, especialmente en sectores donde la biodegradabilidad es un requisito fundamental.

Sin embargo, el desarrollo y la adopción de estos polímeros todavía enfrentan importantes desafíos. Uno de los principales obstáculos es el coste de producción, que en muchos casos sigue siendo superior al de los plásticos convencionales. Además, aunque algunos polímeros sostenibles como el PHA o el PLA presentan una buena biodegradabilidad en condiciones controladas, su descomposición en entornos naturales puede ser más lenta o depender de factores ambientales específicos. Esto resalta la necesidad de infraestructuras adecuadas para la gestión de estos materiales al final de su vida útil.

También es fundamental considerar el impacto ambiental global de estos polímeros a lo largo de todo su ciclo de vida. Si bien muchos de ellos provienen de fuentes renovables, su producción aún puede generar emisiones significativas o requerir grandes cantidades de recursos naturales. Por ello, la investigación debe centrarse no solo en la mejora de sus propiedades mecánicas y su degradabilidad, sino también en el desarrollo de procesos de fabricación más sostenibles y eficientes.

En conclusión, la implementación de polímeros sostenibles en la industria es un paso clave para reducir la contaminación plástica y avanzar hacia una economía circular. No obstante, su éxito dependerá de una combinación de avances tecnológicos, inversiones en infraestructura de reciclaje y compostaje, y regulaciones que promuevan su uso frente a los plásticos convencionales. Solo mediante un enfoque integral se podrá garantizar que estos materiales contribuyan de manera efectiva a la sostenibilidad ambiental a largo plazo.



## 6. Bibliografía

- [1] <https://polyexcel.com.br/es/productos/polimero-biodegradable-una-alternativa-sostenible/> (última fecha de acceso 27/09/2024).
- [2] A. Samir, F. H. Ashour, A. A. A. Hakim, M. Bassyouni. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *npj Mater. Degrad.* **2022**, *68*, 6.
- [3] M. S. Kim, H. Chang, L. Zheng, Q. Yan, B. F. Pflieger, J. Klier, K. Nelson, E. L.-W. Majumder, G- W. Huber. A Review of Biodegradable Plastics: Chemistry, Applications, Properties, and Future Research Needs. *Chem. Rev.* **2023**, *123*, 9915.
- [4] <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-reducir-consumo-plastico> (última fecha de acceso 27/09/2024).
- [5] <https://vivirsinplastico.com/por-que-evitar-el-plastico/> (última fecha de acceso 27/09/2024).
- [6] C. Campanale, C. Massarelli, I. Savino, V. Locaputo, V. F. Uricchio. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 1212.
- [7] <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/> (última fecha de acceso 27/09/2024).
- [8] [https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo\\_15282](https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo_15282) (última fecha de acceso 11/10/2024).
- [9] <https://www.uniuso.com/blog/ventajas-del-plastico/> (última fecha de acceso 11/10/2024).
- [10] C. Rizan, F. Mortimer, R. Stancliffe, M. F. Bhutta. Plastics in healthcare: time for a re-evaluation. *J. R. Soc. Med.* **2020**, *113*, 49.
- [11] <https://climateactionaccelerator.org/solutions/single-use-plastic-medical-items/> (última fecha de acceso 22/01/2025).



- [12] N. G. Khouri, J. O. Bahú, V. O. C. Concha, C. Blanco-Llamero, E. B. Souto. Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – A review of the literature. *J. Mol. Struct.* **2024**, 1309, 138243
- [13] V. De Stefano, S. Khan, A. Tabada. Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration* **2020**, 1, 76.
- [14] <https://primebiopol.com/plastico-pla-que-es-y-para-que-se-utiliza/> (última fecha de acceso 22/01/2025).
- [15] <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/polystyrene> (última fecha de acceso 22/01/2025).
- [16] M. Maiza, M. T. Benaniba, V. Massardier-Nageotte. Plasticizing effects of citrate esters on properties of poly(lactic acid). *J. Polymer Eng.* **2016**, 36, 371.
- [17] J. Zhang, Y. Xiang, X. Li, X. Wang, Z. Jia. Effects of glucose-derived plasticizers on the thermal and mechanical properties of PLA-based composites. *Polym. Degrad. Stab.* **2015**, 120, 214.
- [18] B. Laycock, P. Halley, S. Pratt, A. Werker, P. Lant. The chemomechanical properties of microbial polyhydroxyalkanoates. *Prog. Polym. Sci.* **2013**, 38, 536.
- [19] B. Lagoa-Costa, C. Kennes, M. C. Veiga. Influence of feedstock mix ratio on microbial dynamics during acidogenic fermentation for polyhydroxyalkanoates production. *J. Environ. Manage.* **2022**, 303, 114132
- [20] B. Maestro, J. M. Sanz. Polyhydroxyalkanoate-associated phasins as phylogenetically heterogeneous, multipurpose proteins. *Microb. Biotechnol.* **2017**, 10, 1323.
- [21] Y. González García, J. C. Meza Contreras, O. González Reynoso, J. A. Córdova López. Síntesis y biodegradación de polihidroxicanoatos: plásticos de origen microbiano. *Rev. Int. Contam. Ambie.* **2013**, 29, 77.
- [22] E. E. Kwon, J. Lee. Polyethylene terephthalate production from a carbon neutral resource. *J. Clean. Prod.* **2024**, 469, 143210.



- [23] <https://sintac.es/los-principales-usos-y-caracteristicas-del-polietileno-de-tereftalato/> (última fecha de acceso 05/11/2024).
- [24] S. Venkatachalam, S. G. Nayak, J. V. Labde, P. R. Gharal, K. Rao, A. K. Kelkar. *Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate)*, en el libro *Polyester* (Ed.: H. El-Din M. Saleh), IntechOpen, **2012**.
- [25] S. S. Hosseini, S. Taheri, A. Zadhoush, A. Mehrabani-Zeinabad, *J. Appl. Polym. Sci.* **2007**, *103*, 2304.
- [26] M. Barletta, C. Aversa, M. Ayyoob, A. Gisario, K. Hamad, M. Mehrpouya, H. Vahabi. Poly(butylene succinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications. *Prog. Polymer Sci.* **2022**, *132*, 101579.
- [27] Y. Wu, W. Xiong, H. Zhou, H. Li, G. Xu, J. Zhao. Biodegradation of poly(butylene succinate) film by compost microorganisms and water soluble product impact on mung beans germination. *Polym. Degrad. Stab.* **2016**, *126*, 22.
- [28] B. Soriano Ortega. *Biodegradación de plásticos en ambientes naturales*. Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Alcalá, Facultad de Ciencias, **2020**. Disponible en la URL: [https://efaidnbmnnnibpcajpcqlclefindmkaj/https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/45807/TFG\\_SORIANO\\_ORTEGA\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://efaidnbmnnnibpcajpcqlclefindmkaj/https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/45807/TFG_SORIANO_ORTEGA_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (última fecha de acceso 11/11/2024).
- [29] H. H. Chuah, *Synthesis, Properties and Applications of Poly(Trimethylene Terephthalate)*, en el libro *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters* (Eds.: J. Scheirs, T. E. Long), John Wiley & Sons, Ltd, **2003**.
- [30] A. P. Rath, M. K. Kanny. *Textile Applications of PTT-Based Polymer Blends, Composites, and Nanocomposites*, en el libro *Poly Trimethylene Terephthalate. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials* (Eds.: A. R. Ajitha, S. Thomas) Springer, **2023**.
- [31] <https://es.aceextech.com/Reciclaje-exitoso-de-fibra-residual-de-PTT-id40613657.html> (última fecha de acceso 12/11/2024).



[32] K. Loos, R. Zhang, I. Pereira, B. Agostinho, H. Hu, D. Maniar, N. Sbirrazzuoli, A. J. D. Silvestre, N. Guigo, A. F. Sousa. A Perspective on PEF Synthesis, Properties, and End-Life. *Front. Chem.* **2020**, *8*, 585.

[33] <https://www.sie7edechiapas.com/post/pef-el-nuevo-pl%C3%A1stico-de-origen-vegetal> (última fecha de acceso 13/11/2024).

[34] M. Labeta, W. Thielemans. Synthesis of polycaprolactone: a review. *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 3484.

[35] M. Bartnikowski, T. R. Dargaville, S. Ivanovski, D. W. Hutmacher. Degradation mechanisms of polycaprolactone in the context of chemistry, geometry and environment. *Prog. Polymer Sci.* **2019**, *1*.

[36] V. Guarino, G. Gentile, L. Sorrentino, L. Ambrosio. *Polycaprolactone: Synthesis, Properties, and Applications*, en el libro *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, **2017**.

[37] M.-O. Christen, F. Vercesi. Polycaprolactone: How a Well-Known and Futuristic Polymer Has Become an Innovative Collagen-Stimulator in Esthetics. *Clin. Cosmet. Investig. Dermatol.* **2020**, *13*, 31.

[38] J. A. del Olmo, P. Mikeš, N. Asatiani, J. M. Alonso, V. Sáez Martínez, R. Pérez González. Alternating Current Electrospinning of Polycaprolactone/Chitosan Nanofibers for Wound Healing Applications. *Polymers* **2024**, *16*, 1333.

[39] P. K. Samantaray, A. Little, D. M. Haddleton, T. McNally, B. Tan, Z. Sun, W. Huang, Y. Jic. C. Wan. Poly(glycolic acid) (PGA): a versatile building block expanding high performance and sustainable bioplastic applications. *Green Chem.* **2020**, *22*, 4055.

[40] <https://unilene.com/es/product/acido-poliglicolico/> (última fecha de acceso 18/11/2024).

[41] J. C. Middleton, A. J. Tipton. Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices. *Biomaterials* **2020**, *21*, 2335.



[42] K. Yamane, H. Sato, Y. Ichikawa, K Sunagawa, Y. Shigaki. Development of an industrial production technology for high-molecular-weight polyglycolic acid. *Polym. J.* **2014**, *46*, 769.

[43] N. B. Halima. Poly(vinyl alcohol): review of its promising applications and insights into biodegradation. *RSC Adv.* **2016**, *6*, 39823.

[44] <https://www.wastetrade.com/es/resources/plastics/introduction-to-plastics/types-of-plastics/polyvinyl-alcohol-pvoh-pva-or-pval-recycling/> (última fecha de acceso 18/11/2024).

[45] <https://jieyatwinscrew.com/es/blog/es-pva-biodegradable/> (última fecha de acceso 18/11/2024).

[46] C. Bento, M. Katz, M. M. M. Santos, C. A. M. Afonso. Striving for Uniformity: A Review on Advances and Challenges To Achieve Uniform Polyethylene Glycol. *Org. Process Res. Dev.* **2024**, *28*, 860.

[47] L. Faba, E. Díaz, S. Ordóñez. Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y Bosques* **2014**, *20*, 11.

[48] C. Fruijtjer-Pölloth. Safety assessment on polyethylene glycols (PEGs) and their derivatives as used in cosmetic products. *Toxicology* **2005**, *214*, 1.

[49] <https://www.fda.gov/media/155398/download> (última fecha de acceso 26/11/2024).

[50] N. Obradors Aranda. *Biodegradacion de polietilenglicoles por una cepa de pseudomonas sp.* Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, **1991**.

[51] A. S. Amarasekara, U. Ha, N. C. Okorie. Renewable Polymers: Synthesis and Characterization of Poly(levulinic acid–pentaerythritol). *J. Polymer Sci, A: Polymer Chem.* **2018**, *56*, 955.

[52] S. Xu, Y. Wang, T. R. Hoye, *Macromolecules* **2020**, *53*, 4952.

[53] G. C. Hayesa, C. R. Becer. Levulinic acid: a sustainable platform chemical for novel polymer architectures. *Polym. Chem.* **2020**, *11*, 4068.