



UNIVERSIDAD DE SEVILLA



FACULTAD DE FARMACIA

GRADO EN FARMACIA

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO QUÍMICO DE MATERIALES POLIMÉRICOS PARA LA SOSTENIBILIDAD

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Autor: Miguel Escalante Cabeza

Tutor: Ana Alcudia Cruz y Belén Begines Ruiz

Departamento de Química Orgánica y Farmacéutica

Sevilla, julio de 2021

Resumen

Ante el creciente problema de la acumulación de residuos plásticos, el diseño de polímeros sostenibles se sitúa como uno de los principales agentes encargados de hacerle frente. Por ello, en esta revisión analizamos en un primer lugar la Química Verde y sus 12 principios, los cuales surgen como una manera tangible de protocolizar los procesos químicos para que, de este modo, se minimicen los riesgos que afectan tanto a la salud humana como al medio ambiente. Además, hacemos un repaso sobre el modelo económico circular y la importancia de ir dejando atrás el obsoleto modelo económico lineal.

Si bien desde finales del siglo pasado se comenzó una carrera ininterrumpida por disminuir la contaminación y la producción de plástico, la urgencia por controlar la pandemia del coronavirus (SARS-CoV-2), responsable del síndrome respiratorio COVID-19, que ha afectado recientemente a nuestro planeta, ha disparado la producción y acumulación de plásticos. No solo a nivel biosanitario mediante los equipos de protección personal como las mascarillas, sino por el aumento de la cultura del “usar y tirar” – promovida por el miedo a la transmisión del virus – y del uso de servicios online que suponen una cantidad de embalaje mayor.

Para solucionar este revés en la lucha contra la acumulación de residuos plásticos, los nuevos procesos químicos para sintetizar polímeros bio-basados pasan a jugar un papel crucial. Es por esta razón por lo que estudiaremos algunos de ellos, así como las aplicaciones que tienen actualmente y que se prevé que pueden tener en un futuro no muy lejano en ámbitos como la biomedicina, envasado o transporte.

Palabras clave: Polímeros sostenibles, Química Verde, Economía Circular, COVID-19, plástico, polímeros bio-basados.

Índice

1. Introducción a los materiales poliméricos sostenibles.....	4
2. Objetivos de la revisión.....	6
3. Metodología.....	6
4. Química Verde.....	8
4.1. Los 12 principios de la Química Verde.....	8
4.2. Química Verde y Economía Circular.....	11
5. COVID-19 y plástico.....	13
5.1. Equipos de protección personal como fuentes de microplásticos.....	15
5.2. Retos y estrategias de gestión de estos residuos.....	16
6. Polímeros bio-basados.....	18
6.1. Algunos de los nuevos procesos químicos para obtener polímeros bio-basados	
6.1.1. Polímeros híbridos bio-basados de almidón y poliuretanos.....	22
6.1.1.2. Aplicaciones.....	25
6.1.2. Resinas epoxi bio-basadas de lignina y aceites vegetales.....	25
6.1.2.1. Aplicaciones.....	27
6.1.3. Polímeros bio-basados producidos por microorganismos	
metabólicamente modificados.....	27
6.1.4. Polímeros bio-basados a partir de microalgas y alginatos.....	28
7. Conclusiones.....	29
8. Bibliografía.....	31

1. Introducción a los materiales poliméricos sostenibles.

En esta revisión bibliográfica se realizará un estudio por los materiales poliméricos que actualmente mantienen ocupados a investigadores de todo el mundo en busca de un diseño más eficaz y sostenible.

Desde el comienzo de los tiempos, el avance del ser humano ha ido ligado al desarrollo de nuevos materiales que permitían una mejor adaptación al entorno. En un primer lugar, comenzando por aquellos que se encontraban en la naturaleza, fuimos recorriendo un largo camino hasta desarrollar industrialmente los sintéticos. Este progreso ha sido clave en nuestra evolución y en el desarrollo de las sociedades debido a sus amplias propiedades. Conscientes de ello, hemos querido explotar esta ventaja al máximo y lo más rápido posible. Es decir, con un modelo económico lineal que imposibilitaba mantener ese ritmo sin comprometer a las generaciones venideras. Tal ha sido la importancia y dependencia que hemos otorgado a estos materiales, que el aumento de su producción ha acabado suponiendo uno de los principales problemas a los que se enfrenta el hombre actualmente: la acumulación de residuos plásticos (Geyer et al., 2017), a la cual se debe sumar el impacto que la pandemia causada por la COVID-19 ha supuesto en cuanto al incremento de éstos.

Ante esta creciente amenaza, la conciencia social ha ido incrementándose de manera proporcional. En contra se posiciona la dependencia que actualmente tenemos de este tipo de materiales plásticos, ya que nos deja muy poco margen de actuación en la tarea de disminuir su producción y por tanto la acumulación al final de su vida útil.

Es aquí donde surge la figura de los materiales poliméricos sostenibles:

- El término *polímero* deriva del griego poli y meros, que, respectivamente, significan mucho y partes (Seymour, 2013).
- Por otro lado, *sostenible* hace referencia al desarrollo duradero, definido por primera vez en el Informe Brundtland, publicado por las Naciones Unidas, como aquel que asegura satisfacer las necesidades presentes del ser humano sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas

propias (Brundtland, 1987). La clave para cumplir con este principio radica en pasar del modelo económico lineal, empleado durante gran parte de nuestra historia, al modelo económico circular.

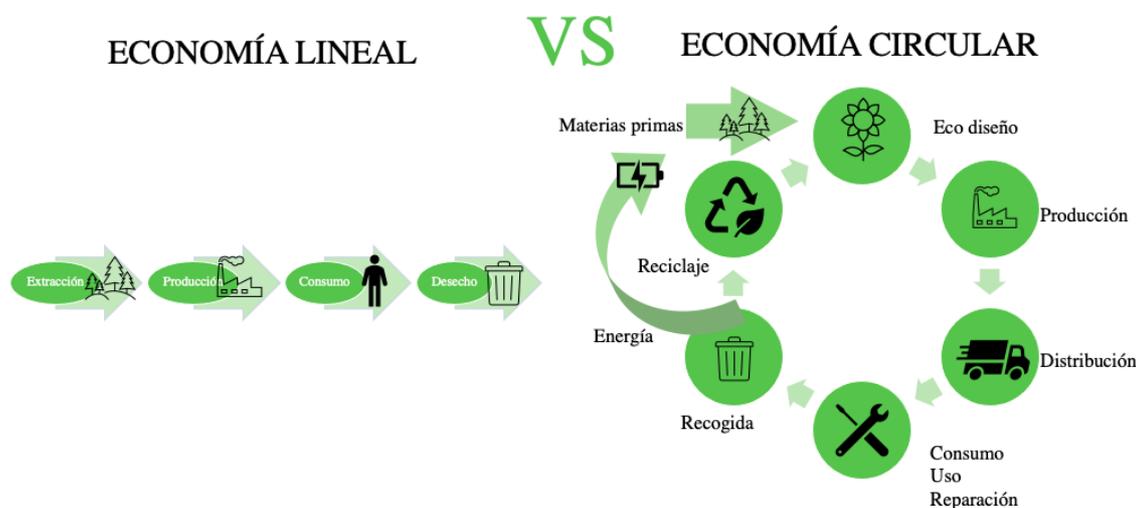


Figura 1. Economía lineal vs Economía circular.

Desde el punto de vista de la Química Orgánica y Farmacéutica, lo que nos concierne es el diseño y desarrollo de estos materiales, por lo que debemos estar en constante búsqueda de propiedades novedosas en los materiales que nos ayuden a resolver los retos impuestos por el desarrollo de la sociedad actual. Todo esto, por supuesto, de manera que se minimice todo lo posible el coste económico y medioambiental. Para completar esta transición hacia la economía circular sostenible, debemos dejarnos guiar por el eco-diseño, la química verde, el análisis de ciclo de vida y la ecología industrial, pudiendo así alcanzar la siguiente generación de materiales y productos (López et al., 2018).

A continuación, tras exponer los objetivos y explicar la metodología, profundizaremos en el término de *Química Verde* y los 12 principios que la rigen para poder entender mejor la tendencia actual del diseño químico y producción. Además, veremos la relación entre esta Química y la Economía Circular. Continuaremos mediante el análisis del impacto que ha tenido la COVID-19 en cuanto al incremento de la acumulación de plásticos residuales. Finalmente, estudiaremos los polímeros bio-basados y algunos de los nuevos procesos químicos que están surgiendo para su producción, así como sus posibles aplicaciones.

2. Objetivos de la revisión

Los objetivos propuestos para esta revisión bibliográfica son:

1. Revisar la trayectoria, situación actual y perspectiva futura de la Química Verde y sostenible basada en la Economía Circular.
2. Analizar el impacto que la COVID-19 ha supuesto para la sociedad a nivel del aumento de la producción de plásticos.
3. Mostrar la creciente importancia de los polímeros bio-basados.
4. Presentar algunas de las nuevas líneas de investigación y síntesis de polímeros sostenibles.
5. Indicar las aplicaciones en los ámbitos de la biomedicina, envasado, transportes etc. que los polímeros bio-basados tienen actualmente y que se prevé que pueden tener en un futuro no muy lejano.

3. Metodología.

La metodología empleada en la elaboración de la revisión bibliográfica se ha basado en la recopilación de información de artículos procedentes principalmente de la base de datos Pubmed, aunque también han sido utilizadas Scopus, Science Direct, Fama US y Google Académico.

La búsqueda de información fue modificada según el apartado en el que se estaba trabajando, pero siempre filtrando artículos de los últimos 10 años, salvo en casos excepcionales de interés que se suprimió este filtro. En la primera parte de la revisión se estudiaron artículos relacionados con la Química Verde, la Economía Circular y la relación de la COVID-19 y la producción de plástico, por lo que para acotar la búsqueda se emplearon palabras clave en inglés como “green chemistry”, “sustainable”, “circular economy” y “COVID-19” acompañado de “plastic waste” o “plastic production”.

Para la búsqueda de información relacionada con los polímeros bio-basados se emplearon las palabras claves en inglés “biobased polymer” acompañado de “synthesis” o

“application”. Hay que destacar que, para este apartado, se filtraron solamente artículos desde el 2018 debido a que se trataba de estudiar nuevas vías de síntesis relacionadas con los polímeros bio-basados, por lo que se emplearon artículos publicados recientemente.

Es especialmente interesante observar el aumento de la cantidad de artículos publicados en Pubmed relacionados con los polímeros sostenibles empleando las palabras clave “Sustainable polymers” simplemente limitando la búsqueda a los últimos 20 años. La Figura 2 denota la creciente importancia que se le esta dando a esta línea de investigación, que, de los 296 artículos en 2001, llega a multiplicar esta cifra por 10 para llegar a los 2935 artículos en 2020.

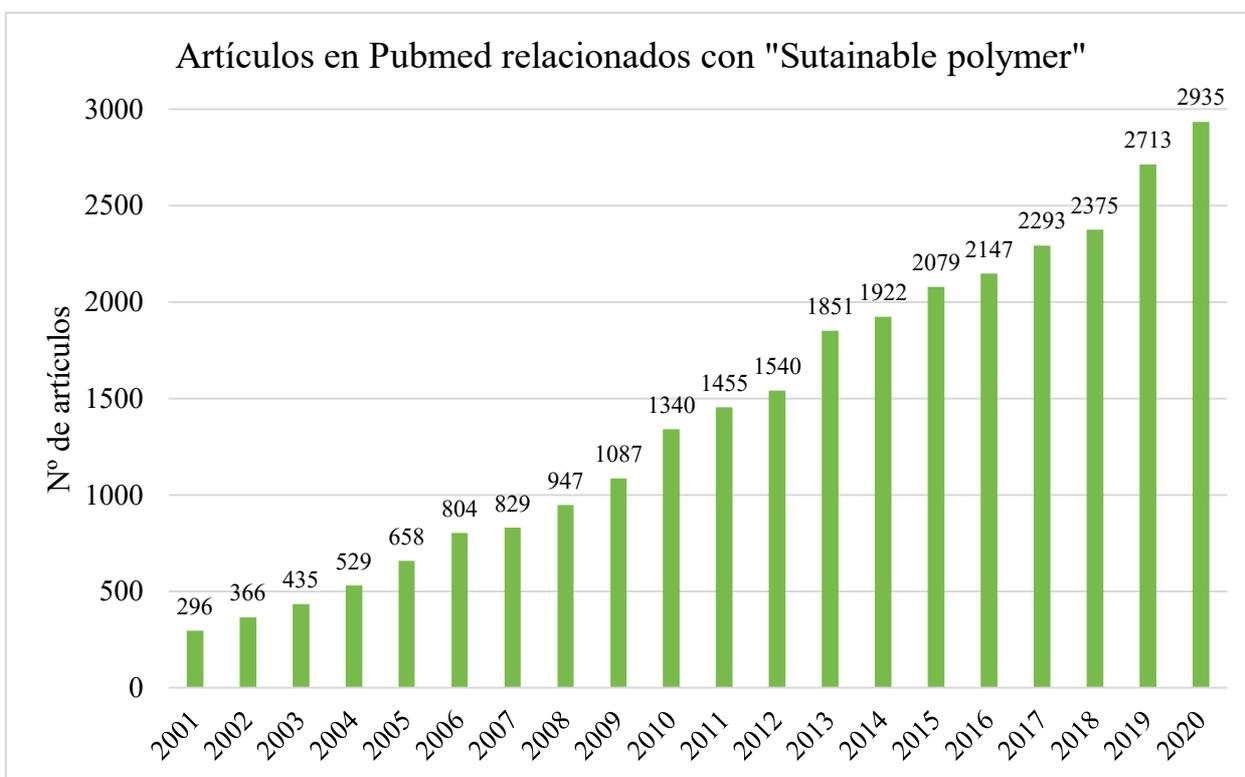


Figura 2. Número de publicaciones sobre polímeros sostenibles por año en Pubmed.

4. Química Verde.

La *Química Verde* (QV) se define como aquellos procesos químicos que tratan reducir o eliminar el uso o generación de sustancias peligrosas en el diseño, manufactura y aplicaciones de productos químicos para minimizar las amenazas a la salud de los operarios y al medio ambiente (Anastas, 1999). No debemos confundirla con la Química Sostenible, la cual se refiere a aquella química que contribuye a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Falcone and Hiete, 2019). El término QV viene utilizándose desde principio de los años 90 y fue haciéndose cada vez más popular hasta llegar a su culmen en 1998, cuando Paul Anastas y John Warner postularon 12 principios mediante los cuales se cumpliría con el objetivo antes descrito en la definición (de Marco et al., 2019).

4.1 Los 12 principios de la Química Verde



Figura 3. Los 12 principios de la Química Verde propuestos por Anastas y Werner.

El nacimiento de estos principios surge como una manera tangible de protocolizar y enfocar los procesos químicos con el objetivo de minimizar los riesgos que afecten tanto a la salud humana como al medio ambiente, a la vez que se reduce la generación de residuos y prevenimos la contaminación. (Serrano, 2009).

Como podemos observar en la Tabla 1, se trata de una serie de pautas de actuación sencillas y basadas en el sentido común, pero que marcan la diferencia a la hora de calcular el impacto medioambiental.

Tabla 1. Tabla de los 12 principios de la Química Verde. (Anastas and Warner, 1998; de Marco et al., 2019)

Nº	Principio	Descripción del principio
1	Prevención	Prevención de la generación de residuos. Se prefiere evitar la producción de residuos que tratarlos después de su generación.
2	Economía atómica	Los métodos sintéticos deben planificarse de manera que el producto final incorpore la máxima cantidad posible de los reactivos utilizados durante el proceso. Así conseguimos que se minimice la generación de residuos.
3	Uso de metodologías que generen productos con toxicidad reducida	Los métodos sintéticos deben diseñarse para la síntesis y producción de sustancias de baja o nula toxicidad laboral y medioambiental. Por lo tanto, es altamente recomendable la sustitución de los disolventes tóxicos por disolventes de baja o nula toxicidad.
4	Generar productos eficaces, pero no tóxicos	Se debe tener muy en cuenta la toxicidad de los productos químicos diseñados. Evidentemente, deben cumplir sus funciones, pero también deben presentar la menor toxicidad posible.
5	Reducir el uso de sustancias auxiliares	El uso de disolventes y otros reactivos y auxiliares debe evitarse siempre que sea posible. Cuando no se pueda, estas sustancias deben ser lo más inocuas posible.
6	Disminuir el consumo energético	Se catalogarán las necesidades energéticas del proceso según el impacto que este tenga medioambiental y económicamente, tratando de reducirse al máximo.
7	Utilización de materias primas renovables	Siempre que sea económica y técnicamente factible, deben utilizarse materias primas renovables en lugar de las no renovables.
8	Evitar derivatización innecesaria	Los procesos de derivación (protección /desprotección de grupos etc.) innecesarios deben evitarse o minimizarse, ya que requieren el uso adicional de reactivos y generan residuos.
9	Potenciación de la catálisis	El uso de reactivos catalíticos (lo más selectivos posible) reutilizables es mejor que el uso de reactivos estequiométricos.
10	Generar productos biodegradables	Los productos químicos deben diseñarse de forma que al final de su función se descompongan en productos de degradación inocuos y no persistan en el medio ambiente.
11	Desarrollo de metodologías analíticas para la monitorización en tiempo real	Los métodos analíticos deben ser controlados en tiempo real para evitar la formación de sustancias peligrosas.
12	Minimizar el potencial de accidentes químicos	Tanto las sustancias como la forma de utilizarlas durante el proceso químico deben elegirse teniendo en cuenta la minimización de posibles accidentes, como fugas, explosiones e incendios, con el objetivo de lograr una mayor seguridad laboral y medioambiental terrestre.

Debemos tener claro que el objetivo fundamental de la QV no pretende ser la solución a la contaminación, sino más bien un freno que la prevenga desde antes de su origen (Serrano and Ruvalcaba, 2013). Hoy en día, toda persona vinculada al ámbito químico debe tener presente estos 12 puntos que generan un compromiso con el medio ambiente, tratando siempre de encontrar la balanza entre la consecución de su objetivo y la aplicación de estos principios.

Las maneras de convertir un proceso químico convencional en un proceso químico “verde” son muy variadas y, según la dificultad y especificidad de nuestro objetivo, podremos aplicarlas de una forma u otra. Por ejemplo, un modo de aplicar el 5º principio sería mediante la reducción del uso de sustancias auxiliares o, en caso de necesitarlas obligatoriamente, tratar de utilizar aquellas situadas lo más a la izquierda posible según la Figura 4; frente a las situadas a la derecha, consideradas como las más peligrosas por un estudio realizado por Denis Prat sobre 51 sustancias (Prat et al., 2014).

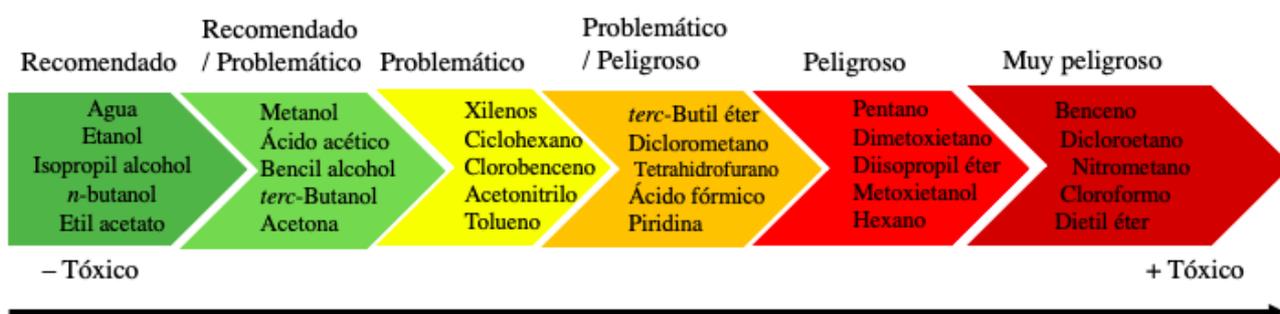


Figura 4. Clasificación de sustancias auxiliares. (Prat et al., 2014).

Por otro lado, se han ido desarrollando diferentes técnicas que han permitido la optimización de los procesos de modo que conseguimos ahorrar tanto en recursos económicos como medioambientales. Algunas de estas técnicas son la *síntesis supercrítica*, que consiste en la utilización de fluidos supercríticos –aquellos que se encuentran por encima de su temperatura y presión críticas– los cuales tienen propiedades a caballo entre las del vapor y el líquido, de ahí sus ventajas y amplias aplicaciones; o la *síntesis ultrasónica o sonoquímica* que es otra técnica en boga basada en los efectos de la propagación del ultrasonido en el medio de reacción, favoreciendo y activando las reacciones químicas mediante la energía acústica (Salinas-Estevané and Sánchez, 2012).

4.2 Química Verde y Economía Circular

Como introducíamos al inicio de esta revisión, una de las claves en las que radica el actual problema de la acumulación de residuos, es dejar a un lado el modelo económico lineal – materia prima, uso y residuo – (van Buren et al., 2016) para pasar al modelo circular como se indica en la Figura 5. Dentro de esta transición, nos centraremos en las contribuciones que la Química Verde como potencial herramienta puede aportar para colaborar en esta tarea de cerrar el círculo mediante la aplicación de los 12 principios.

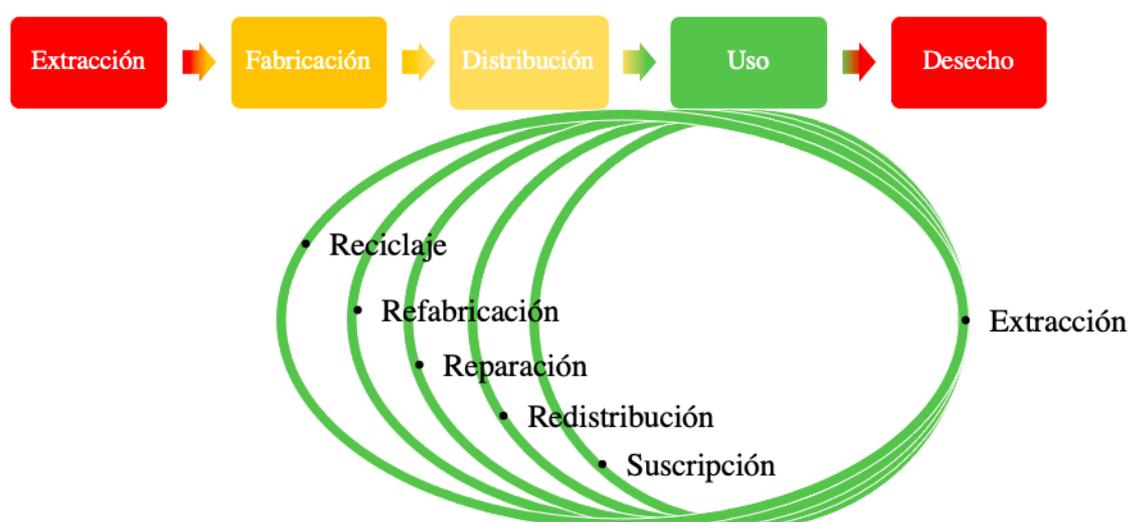


Figura 5. Paso de Economía lineal a circular.

El concepto de Economía Circular (EC) propone un cambio de paradigma mediante sus 3 pilares básicos (3 Rs): “Reducir, Reutilizar y Reciclar”. En este modelo el residuo juega un papel fundamental, basándose en la reutilización inteligente, imitando la forma cíclica de la naturaleza, dejando de ser residuo para convertirse en materia prima (Lett, 2014). Además, la EC – comprometida con las energías renovables – minimiza las huellas y trata de eliminar el uso de productos químicos tóxicos mediante un diseño cuidadoso del proceso.

El objetivo es desvincular la proporcionalidad que existe entre el uso de recursos y el desarrollo de la economía. Es decir, queremos mantener el crecimiento de la economía, pero utilizando una menor cantidad de recurso. Todo esto, por supuesto, manteniendo la protección al medio ambiente. Para ello es esencial que los productos y procesos se

rediseñen en busca de maximizar el valor de los recursos a lo largo de toda la cadena, permitiéndonos de esta manera optimizarlo (Loste et al., 2020). La manera de alcanzar este objetivo no puede ser otra que mediante la implementación de los 12 principios de la QV (Smieja and Babcock, 2017) además de la aplicación del método propuesto por Kirchherr de las 9R – desecho (Refuse), Re-pensar, Reducción, Reutilización, Reparación, Reacondicionamiento, Refabricación, Refuncionalización, Reciclaje y Recuperación – (Kirchherr et al., 2017) para aumentar la circularidad de la economía lineal convencional.

Tabla 2. Las 9R de Kirchherr et al., (2017)

Uso y producción inteligente del producto	R0. Refuse (desecho)	Hacer que el producto sea redundante al abandonar su función o al ofrecer la misma función con un producto radicalmente diferente
	R1. Repensar	Intensificar el uso de los productos (p. ej., compartiéndolos)
	R2. Reducción	Aumentar la eficiencia en la fabricación o el uso del producto consumiendo menos recursos naturales y materiales
Prolongar la vida útil del producto y de sus piezas	R3. Reutilización	Reutilización del producto desechado que aún está en buen estado y cumple su función original, por otro consumidor
	R4. Reparación	Reparación y mantenimiento del producto defectuoso para que pueda ser utilizado con su función original
	R5. Reacondicionamiento	Restaurar un producto antiguo y ponerlo al día
	R6. Refabricación	Utilizar partes del producto desechado o sus partes en un nuevo producto con la misma finalidad
	R7. Refuncionalización	Utilizar el producto desechado o sus partes en un nuevo producto con una función diferente
Aplicación útil de los materiales	R8. Reciclaje	Procesar los materiales para obtener la misma calidad (alta calidad) o menor (baja calidad).
	R9. Recuperación	Incineración de materiales con recuperación de energía.

La EC, al reducir el uso de recursos y energía en la industria química, supone una vía para el desarrollo sostenible a partir de la aplicación de evaluaciones medioambientales y la demostración de la capacidad de reciclaje del nuevo producto químico (Chen et al., 2020). Actualmente nos encontramos una tendencia creciente que consiste en introducir la economía bio-basada, que utiliza enfoques de la QV para ampliar el nivel económico circular. La gestión de estos residuos plásticos bio-basados ofrece grandes ventajas de cara a la sostenibilidad (Kaur et al., 2018), los cuales trataremos más adelante en esta revisión.

5. COVID-19 y plástico

Desde la cumbre de Naciones Unidas que tuvo lugar en Estocolmo en el año 1972, ante las señales que nos mandaba nuestro planeta, comenzamos una carrera ininterrumpida por disminuir la contaminación, desarrollándose diversas estrategias para frenar este problema que se encontraba en la agenda política europea y mundial. Sin embargo, en diciembre del 2019 el mundo fue afectado por la pandemia del coronavirus (SARS-CoV-2), responsable del síndrome respiratorio conocido como COVID-19 (Kitajima et al., 2020). La severidad de este síndrome, unido a la alta tasa de contagiosidad, hizo que la pandemia se expandiera por todo el planeta rápidamente, afectando a todos los sectores y paralizando al mundo entero.

La urgencia por controlar la pandemia que atacó a nuestro planeta llevó a los gobiernos a tomar medidas para aplanar la curva de contagios tales como el confinamiento domiciliario, el uso de material de protección de desecho y la obligatoriedad de llevarlo fuera de nuestro domicilio (Patrício Silva et al., 2021). Esto ha enfatizado el papel indispensable que juegan los plásticos en nuestra vida, ya que es el componente básico de todos los equipos de protección, los cuales son principalmente de usar y tirar (Parashar and Hait, 2021). Las características ideales de este material para proteger frente al virus, ha hecho que las políticas para frenar el problema de su acumulación sean reajustadas (Patrício Silva et al., 2020).

Para que nos hagamos una idea de la producción de estos equipos de protección plásticos, la Organización Mundial de la Salud (OMS, WHO en inglés) proyectó una demanda mensual solo en personal sanitario de 89 millones de mascarillas, 76 millones de guantes, 30 millones de batas y 1,6 millones de gafas (WHO, 2020), llegando a alcanzar la cifra de consumo mundial mensual de mascarillas y guantes los 129.000 millones y 65.000 millones respectivamente (Ardusso et al., 2021; Kalina and Tilley, 2020). Además, la OMS ha estimado un aumento mensual del 40% en la cadena de suministro de diferentes productos de seguridad médica en todo el mundo durante la pandemia (Parashar and Hait, 2021).

En el ámbito sanitario el problema va más allá, ya que no solo se ha visto incrementada la producción del material de protección, sino que las piezas de plástico de los kits de pruebas de detección del coronavirus que se emplean en las RT-PCR – de un solo uso por razones higiénicas –también colaboran con el aumento de la acumulación de éstos.



Figura 6. Principales fuentes de residuos plásticos en 2021.

Pero esta pandemia no solo ha afectado en la producción de plástico a nivel biosanitario. A nivel de la sociedad general se pueden observar cambios en los hábitos de consumo como por ejemplo el aumento de las compras online y servicios de comida a domicilio, que se han disparado ante esta situación, disparando a su vez la generación de residuos plásticos debido a los embalajes empleados en estos servicios (Jribi et al., 2020).

Por otro lado, también es interesante analizar el comportamiento de los consumidores, que al comienzo de la pandemia se ha vieron influidos a comprar desmesurada e irracionalmente productos de primera necesidad y no perecederos, conduciendo a una acumulación innecesaria de recursos que solamente aumentaba el despilfarro. Todo ello debido a la falta de información fiable y a la prensa sensacionalista. Además, se instauró una actitud generalizada del “usar y tirar”, desechando utensilios – que perfectamente podrían ser reciclados o reutilizados – por miedo a que pudiesen contener el virus en su superficie y contagiarse (Vanapalli et al., 2021).

5.1 Equipos de protección personal como fuente de microplásticos

Sabemos que los materiales poliméricos de un solo uso son una fuente importante de contaminación por plástico en el medio ambiente, siendo, por ejemplo, los ya mencionados embalajes de plástico, envases de comida y botellas las principales fuentes de contaminación por microplásticos a nivel mundial (Schnurr et al., 2018). Del mismo modo, las mascarillas desechables están postulando actualmente como uno de los principales contaminantes debido al aumento de su producción y consumo ante la aparición de la COVID-19, pudiendo ser una nueva fuente emergente de fibras microplásticas al degradarse en partículas menores a 5mm (Fadare and Okoffo, 2020).

Según un estudio realizado por Benson sobre el consumo de mascarillas en África, asumiendo que los habitantes de las zonas urbanas y semiurbanas utilizaran al menos una mascarilla al día con un 70% de aceptación de éstas sobre la población total, el volumen estimado de mascarillas generadas y desechadas por habitante y día sería de unos 412 millones de unidades. Si traducimos estos datos a nivel mensual, estaríamos hablando de más de 12.000 millones de mascarillas desechadas solo por las personas que viven en el continente africano, lo cual suponen 105.000 toneladas de residuos plásticos generados

por la pandemia de la COVID-19 que se suman al resto de desechos generados habitualmente (Benson et al., 2021).

También podemos ver el incremento de este problema en las costas sudamericanas desde abril del año pasado – cuando comenzó a ser obligatorio llevar la mascarilla – por ejemplo en Colombia, que multiplicó por 5 la producción mensual de mascarillas (Arduzzo et al., 2021); o en Brasil, que un estudio llevado a cabo por Urban y Nakada, evaluaba el impacto de la pandemia en el medio ambiente y la gestión de residuos sólidos en este país, determinando que más de 85 millones de mascarillas podrían ser desechadas diariamente en Brasil (Urban and Nakada, 2021).

5.2 Retos y estrategias de gestión de estos residuos

Aunque en la actualidad no existe una normativa unificada a nivel internacional sobre la regulación de los plásticos y la gestión de la contaminación – probablemente debido a conflictos de intereses económicos – algunos países han puesto en marcha medidas estrictas para frenar la incesante proliferación de residuos plásticos (Fadare and Okoffo, 2020; Li et al., 2020). Teniendo en cuenta los efectos positivos de las mascarillas en la lucha mundial contra la pandemia, la prohibición de éstas sigue siendo una opción minoritaria en este momento. La sensibilización de la población es clave una vez llegados a este punto.

Las tendencias de las estrategias para gestionar los residuos plásticos las podemos observar de manera gráfica en la Figura 7:

- Antes de la pandemia, las principales estrategias para hacer frente a este problema eran el (I) *reciclaje mecánico* (16%), la (II) *incineración* (25%) y la (III) *deposición en vertederos* (40%), mientras que un 19% se filtraba al medio ambiente por la (IV) *mala gestión* de estos residuos.
- Con la aparición de la pandemia y su consecuente aumento de residuos plásticos, el (I) *reciclaje mecánico* se ha visto reducido debido a la bajada de precios de los carburantes y al miedo por la transmisión viral, lo cual ha bajado los índices de participación en el reciclaje por parte de las personas; la (II) *incineración*, al ser

más eficiente tratando con plásticos diversos/no reciclables y permitiendo recuperar energía del material, se ha visto incrementada hasta llevarla a niveles de saturación. Algo parecido ha ocurrido con los (III) *vertederos* que, – aunque provocan menos emisiones de CO₂– los vertidos insalubres, las limitaciones de espacio y el riesgo de incendios, sitúan a la incineración como una práctica más recomendable.

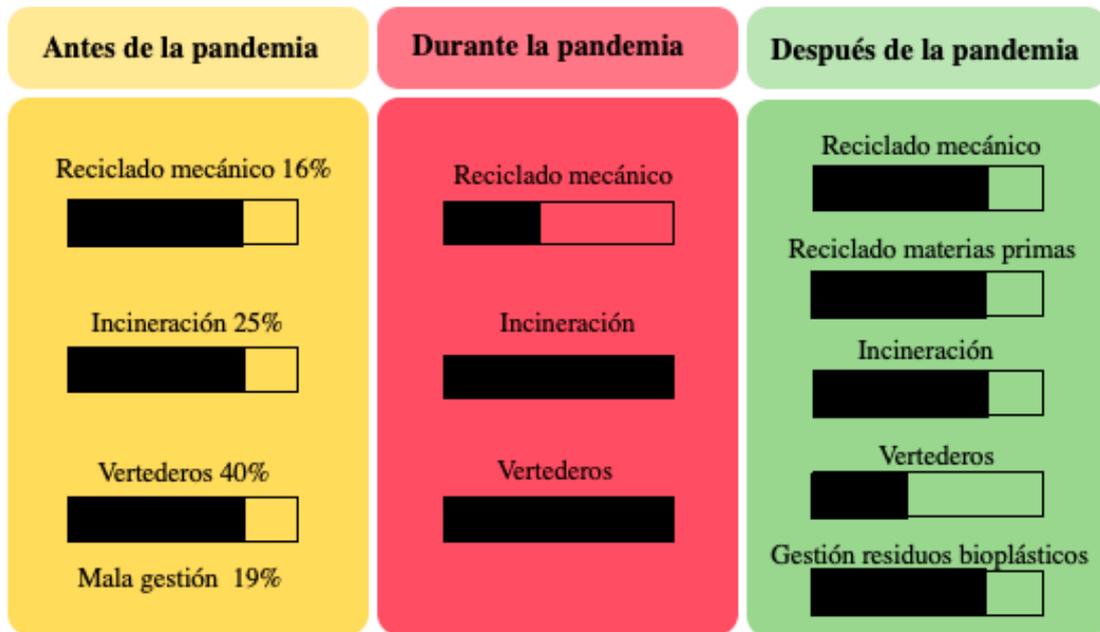


Figura 7. Tratamiento de los residuos plásticos pre-pandemia, durante la pandemia y postpandemia.

- En la era postpandemia, las líneas a seguir son el aumento del (I) *reciclaje mecánico* y mantener un ritmo de (II) *incineración* óptimo para lidiar con la producción residuos, mientras que la dependencia de los (III) *vertederos* debe ser disminuida, utilizándose solo en casos concretos puntuales; y un mayor control de la filtración de residuos por la (IV) *mala gestión*. Además, aparecen dos protagonistas nuevos en la ecuación como son la (V) *Gestión de residuos de bioplásticos* (Bioplastic waste management) y el (VI) *Reciclado de materias primas* (Feedstock recycling), el cual complementa a la perfección al reciclaje mecánico colaborando en el “cierre del círculo” y permitiendo recuperar materiales y disminuyendo la necesidad de materiales vírgenes (Vanapalli et al., 2021).

Además, es esencial reforzar el pensamiento crítico en la investigación para ofrecer alternativas ecológicas y mejorar el sistema de gestión de residuos para ayudar a encontrar una solución sostenible a la contaminación por plásticos. Si bien la movilización y la concienciación sobre la prevención y contención de la COVID-19 está ampliamente extendida por todo el mundo, la urgencia y la falta de visión a largo plazo no nos está permitiendo ver que la mala gestión de la contaminación por plástico puede ser la próxima pandemia mundial (Ahmadifard, 2020).

A continuación, profundizaremos sobre algunas de las líneas de investigación que se presentan como solución ante dicho problema, como el desarrollo de polímeros bio-basados.

6. Polímeros Bio-basados.

El término *Bio-basado* hace referencia a aquellos productos comerciales o industriales – excluyendo piensos o alimentos – compuestos en su totalidad o en una parte significativa por productos biológicos, material forestal o material agrícola renovable, incluyendo material vegetal, animal y marino. También es definido como un material orgánico en el que el carbono deriva de una fuente renovable a través de procesos biológicos (Reddy et al., 2012). Cuando aplicamos esta definición a los polímeros, obtenemos los llamados polímeros bio-basados – conocidos también como biopolímeros – los cuales actualmente están siendo utilizados en sectores industriales para reducir el impacto material y energéticos en el medio ambiente, ya que derivan de fuentes biológicas renovables (Azimi et al., 2020).

Un *Bioplástico* puede ser bio-basado y/o biodegradable, es decir, puede ser un biopolímero derivado de la naturaleza y/o un polímero que puede volver a la naturaleza. Los términos "plástico bio-basado" y "plástico biodegradable" son frecuentemente utilizados de manera indistinta, aunque esto no es correcto. Los bioplásticos pueden estar hechos de material 100% renovable, de polímeros fósiles biodegradables o una combinación de materiales renovables y fósiles (Reddy et al., 2013). Estos bioplásticos van progresivamente ganando importancia en los sectores de la agricultura, la

gastronomía, envases, la electrónica de consumo y la automoción, pero siguen teniendo una cuota muy baja en la producción total de plásticos, siendo alrededor del 1% de los cerca de 300 millones de toneladas de plástico que se producen anualmente (Rujnić-Sokele and Pilipović, 2017).

Como todo producto que sale al mercado, estos polímeros deben presentar alguna ventaja que aporte valor frente a los polímeros que ya existen en ese momento, para que un productor o transformador de polímeros deje atrás los antiguos y decida dar el paso hacia los nuevos. Es por ello por lo que a estos polímeros se les considera “*bioaventajados*”, porque ofrecen una respuesta ecológica novedosa (Hernández et al., 2014).

Los esfuerzos científicos por optimizar el diseño, la síntesis y la producción de polímeros sostenibles o verdes se han expandido enormemente en las últimas dos décadas. Uno de los más exitosos y visibles es el proceso de NatureWorks para la producción a gran escala de ácido poliláctico (PLA) a partir de maíz mediante tecnologías de fermentación. Hace algo más de veinte años, el PLA tenía un precio unas 15-20 veces mayor que el PET, lo cual imposibilitaba económicamente su implantación en el mercado. Actualmente, el precio del PLA frente al PET es sólo un 15-25% superior, una cantidad lo suficientemente pequeña como para permitir su expansión en varios mercados. A pesar de los esfuerzos de NatureWorks, el PLA adolece de algunos inconvenientes inherentes, como su baja tasa de degradación en agua, por lo que la búsqueda del polímero sostenible ideal aun continúa (Miller, 2013).

El grupo liderado por Stephen A. Miller de la Universidad de Florida ha conseguido interesantes avances inspirándose en la celulosa, ya que este es el polímero más abundante creado y degradado en la Tierra (Mülhaupt, 2013). Esto se debe a que cada monómero está conectado por un grupo funcional acetal, lo cual no es muy común en los polímeros comerciales. Por ello, incorporaron el grupo funcional acetal en la cadena principal del PLA, generando una familia de copolímeros de poliéster-acetal (PEA), que son manifiestamente susceptibles de degradarse con el agua.

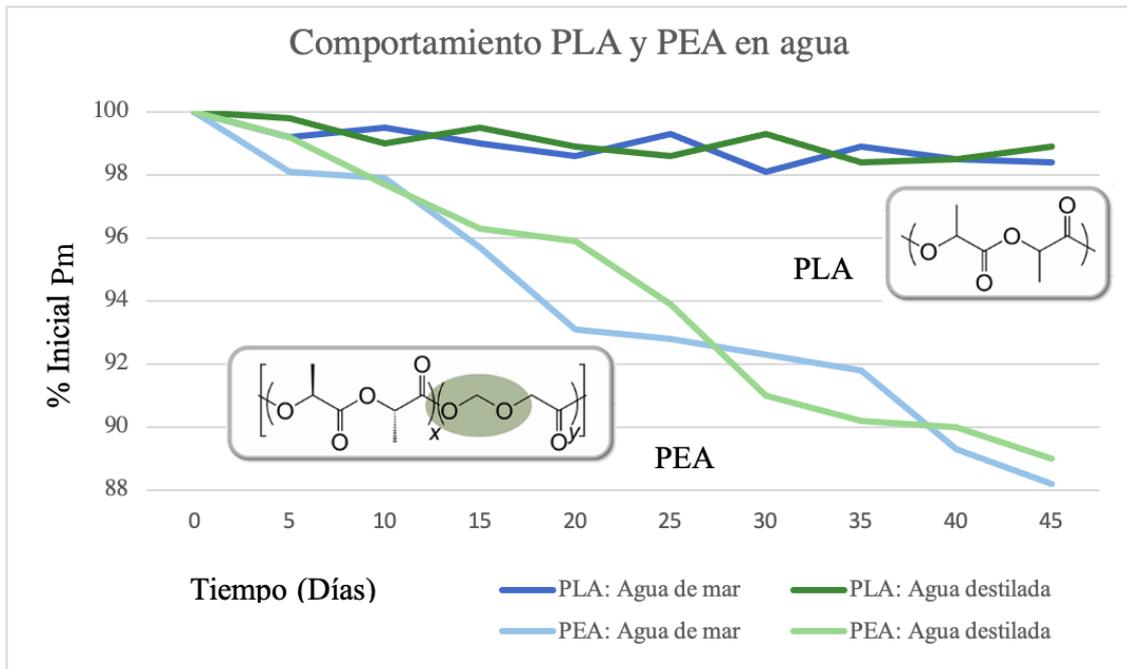


Figura 8. Comportamiento del PLA y PEA frente al agua destilada y al agua de mar.

En esta figura se enfrentan las capacidades de degradación de estos dos polímeros tanto en agua destilada ($\text{pH} = 7,0$) como en agua de mar ligeramente básica ($\text{pH} = 7,5$) en un periodo de tiempo de 45 días. Se observa que en el día 0 el % de peso molecular (Pm) tanto en PEA como en PLA en los dos tipos de agua es de 100. Lo interesante es observar como el grupo acetal incluido en PEA favorece la degradación constante en agua, disminuyendo a un 88% el Pm inicial a los 45 días. Los tiempos de degradación extrapolados (basados en la pérdida de masa) son del orden de 5 a 10 años (Miller, 2013). Sin este grupo acetal, el PLA no se degrada en el agua y debe depender de la biodegradación enzimática, que no suele estar presente en los vertederos anóxicos o en las aguas frías del océano (Madbouly et al., 2014).

Los plásticos biodegradables se pueden clasificar (Ahmed et al., 2018) en:

- Los *plásticos bio-basados biodegradables* proceden de recursos renovables. Desde el punto de vista medioambiental, estos polímeros destacan en ciertas aplicaciones industriales debido a su capacidad de degradación biológica completa. Los tipos más comunes son los polihidroxialcanoatos (PHA) y el ácido poliláctico (PLA).

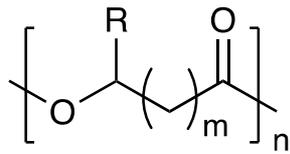


Figura 9. Polihidroxicanoatos (PHA).

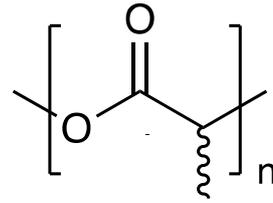


Figura 10. Ácido poliláctico (PLA).

- Los *plásticos biodegradables de origen fósil* se emplean principalmente en la industria de los envases. Sin embargo, la mayoría de los plásticos de origen fósil son no biodegradables y suponen un grave problema por sus residuos. Algunos ejemplos de ellos son el succinato de polietileno (PES) y la policaprolactona (PCL).

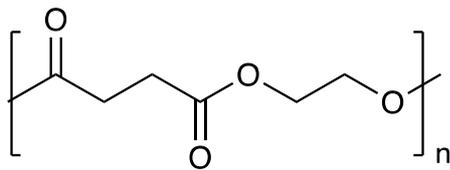


Figura 11. Succinato de polietileno (PES).

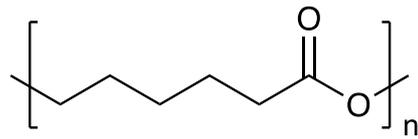


Figura 12. Policaprolactona (PCL).

- La *mezcla de polímeros biodegradables* es un método más barato y rentable para hacer que los polímeros sean biodegradables con las características deseadas. Este método es más fácil, rápido y económico que la copolimerización. Algunos ejemplos son la mezcla de almidón-poliéster y la mezcla de almidón-PVA.

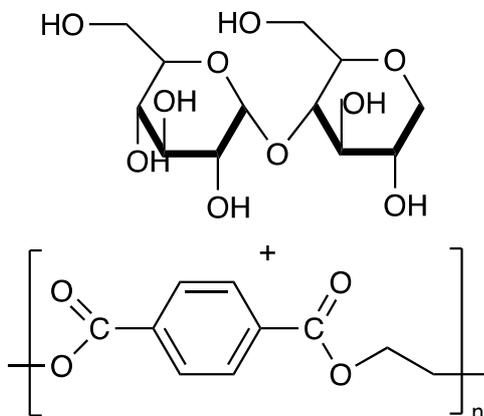


Figura 13. Mezcla de almidón-poliéster.

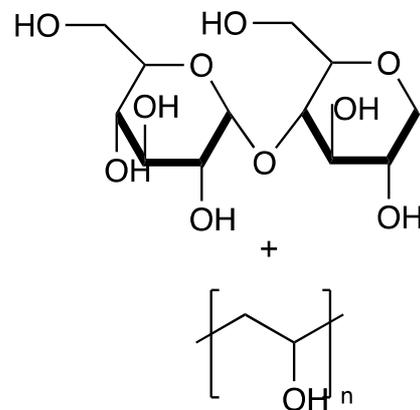


Figura 14. Mezcla de almidón-PVA.

6.1 Algunos de los nuevos procesos químicos para la obtención de polímeros bio-basados y sus aplicaciones.

La creciente concienciación respecto a la producción responsable de polímeros y plásticos ha suscitado un gran interés por parte de los investigadores, los cuales, sabedores de la importancia que tienen y tendrán estos productos, están desarrollando numerosas líneas de investigación para optimizar la síntesis de estos. Las fuentes para obtener los polímeros son muy diversas, desde estructuras tan simples como el CO₂ hasta estructuras más complejas como carbohidratos – almidón, celulosa etc. – pasando por poliaminas o aceites vegetales (Zhu et al., 2016). Los estudios que se van realizando muestran que se pueden obtener productos con características y rendimiento similares a los obtenidos mediante fuentes fósiles, pero utilizando materias primas biológicas, como observaremos a continuación.

6.1.1 Polímeros híbridos bio-basados de almidón y poliuretanos.

Uno de los biomateriales que más interés está suscitando es el almidón. Gracias a su abundancia, bajo precio y naturaleza no tóxica, este material se sitúa en una posición aventajada en la industria de los polímeros. Sin embargo, también se caracteriza por su alta sensibilidad al agua y vapor de agua, así como por su alta fragilidad y pobre rendimiento mecánico (Meng et al., 2019). A raíz de estas desventajas, surge la idea de combinarlo con otros materiales que las compensen, apareciendo así la síntesis de materiales híbridos que combina el almidón y poliuretanos sin isocianatos (Ghasemlou et al., 2020).

Los poliuretanos (PU) son una familia versátil de polímeros con una amplia gama de propiedades físicas y químicas que ha hecho que se conviertan en el material de elección para un amplio espectro de aplicaciones. Los enlaces de carbamato dentro de la espina dorsal química de los PU suelen sintetizarse mediante una reacción de poliadición entre isocianatos y polioles (Solanki et al., 2018). Para enmendar algunas de las propiedades no deseadas del almidón y mejorar la biodegradabilidad de los nuevos materiales desarrollados, los PUs se injertan químicamente o se mezclan físicamente con el almidón como podemos observar en las siguientes reacciones.

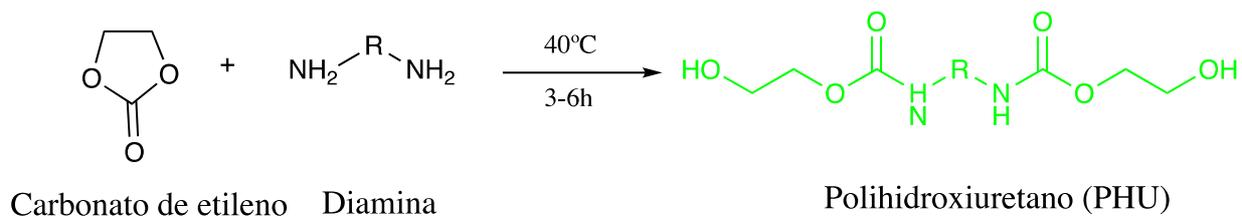


Figura 15. Paso 1 en la síntesis del híbrido HAGS/PHU. Síntesis del Polihidroxiuretano (PHU) a partir de carbonato de etileno y una diamina.

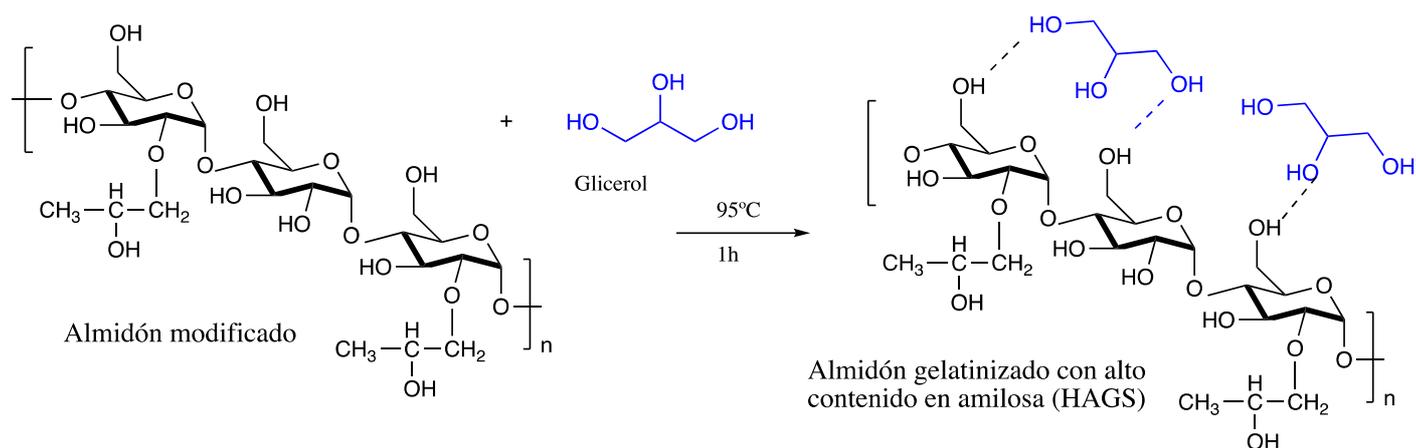


Figura 16. Paso 2. Síntesis de Almidón Gelatinizado con Alto Contenido de Amilosa (HAGS) a partir de almidón modificado y glicerol.

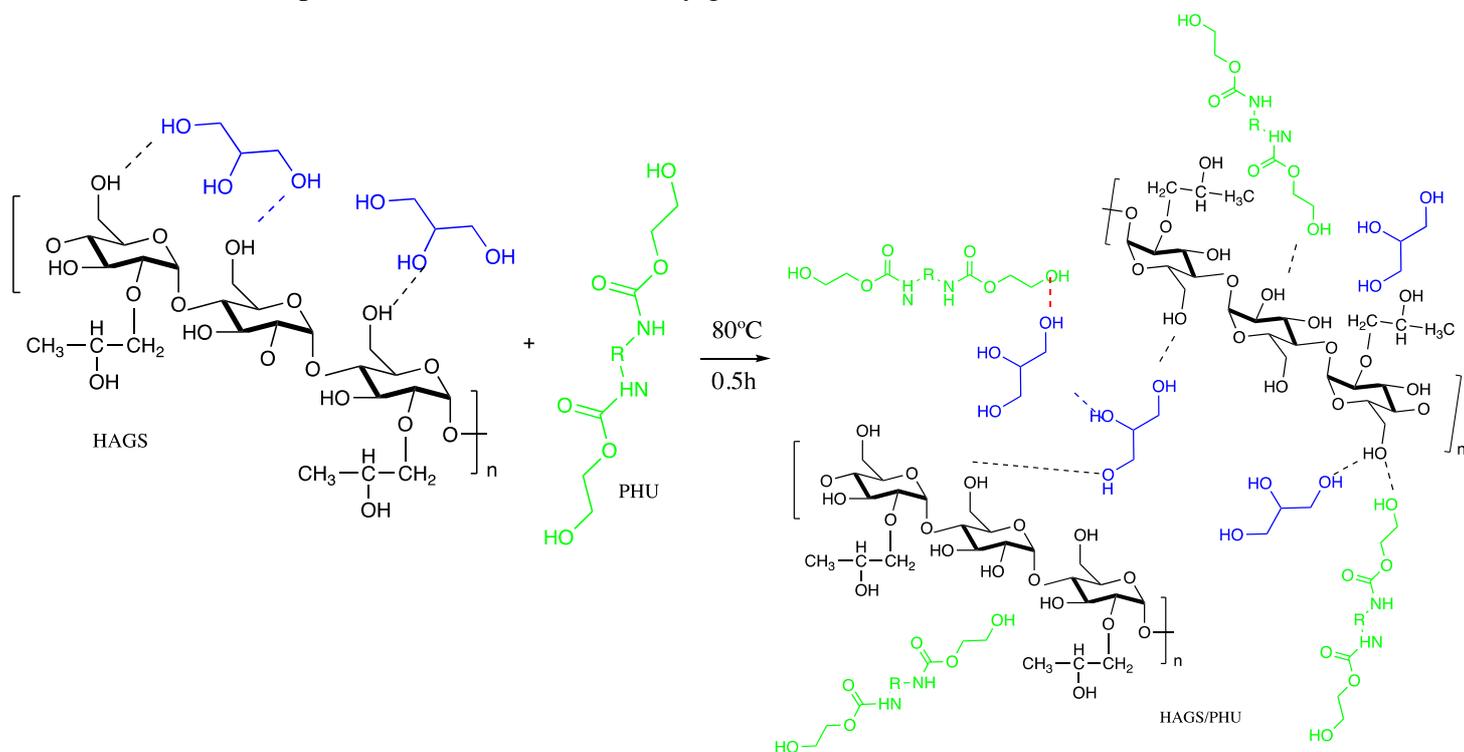


Figura 17. Paso 3. Síntesis del híbrido HAGS/PHU a partir del HAGS y PHU previamente sintetizado.

A pesar de estos avances, un reto importante a tener en cuenta es la toxicidad asociada a los isocianatos, ya que su uso constante en la síntesis de PU puede afectar a la salud de las personas que participan en su manipulación y producción. Algo similar ocurre también con los residuos que queden sin reaccionar en los PU, pudiendo afectar negativamente a la salud de los usuarios finales (Suryawanshi et al., 2019).

Como veíamos al inicio de esta revisión, desde el punto de vista de la química verde, hay un énfasis notable en la sustitución de los materiales peligrosos. Es por ello por lo que la ruta del poliuretano sin isocianato (NIPU) ha surgido como una vía alternativa segura a la síntesis convencional de PU.

Los NIPUs se sintetizan en su mayoría utilizando la reacción de polimerización de apertura de anillo entre carbonatos cíclicos y diaminas. Estos son cada vez más importantes en las aplicaciones industriales lo cual ha hecho que se acelere la investigación en el desarrollo de procesos innovadores para la fabricación de estos materiales (Shen et al., 2018). Los NIPUs suelen tener varias ventajas sobre los PUs convencionales debido a la presencia de varios grupos hidroxilos en su columna vertebral. El almidón, al ser hidrófilo por naturaleza, puede mezclarse fácilmente con los NIPUs – también de naturaleza hidrófila gracias a estos grupos hidroxilos– para obtener materiales híbridos de almidón-NIPU con características mecánicas y estructurales mejoradas (Carré et al., 2019). Sin embargo, hasta el momento no hay estudios que hayan materializado esta síntesis de almidón-NIPU ni su posible aplicación en el campo de los envases.

Los NIPUs bio-basados se sintetizan a través de la reacción de aminólisis, ya que es la ruta más adecuada según los principios de la Química Verde. Esta reacción implica la apertura del anillo de un carbono cíclico (CC) con una amina, lo que conduce a una función hidroxietano y, finalmente, a polímeros PHU (Carré et al., 2019).

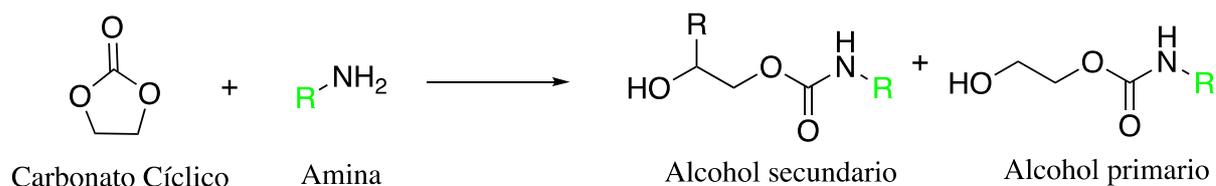


Figura 18. Esquema general de la reacción de aminólisis.

Por lo tanto, su estructura final se compone de un enlace de uretano con un grupo hidroxilo adicional. Los CC de cinco miembros son sintetizados fácilmente mediante la carbonatación de epóxidos con CO₂, lo cual convierte a esta vía en una de las más ecológicas y menos tóxicas para la síntesis de PHUs. De hecho, la valorización del CO₂ – recurso renovable, barato y no tóxico – es una gran ventaja en esta síntesis. El punto negativo reside sobre la baja reactividad y conversión de la reacción carbonato/amina. Para solucionar este problema, los investigadores están trabajando en los polihidroxiuretanos híbridos (H-PHU) como el HGS-PHU descrito anteriormente (Quienne et al., 2020).

6.1.1.2 Aplicaciones

Dentro del campo de la biomedicina, los PUs pueden participar en una amplia gama de aplicaciones tales como en la ingeniería tisular, los implantes ortopédicos, los parches transdérmicos, los catéteres y los portadores de fármacos. Gracias al hecho de que estos pueden ser fabricados con propiedades biocompatibles y biodegradables, son portadores eficaces de moléculas como proteínas, genes o péptidos. Al adicionar carbohidratos como el almidón antes mencionado, se optimizan las propiedades de los polímeros, confiriéndole las características ideales para participar por ejemplo en espumas para vendajes y endoprótesis autoexpandibles para cirugías endoscópicas (Solanki et al., 2018).

Por otro lado, los polímeros bio-basados híbridos de almidón-PU van ganando importancia en el campo del envasado, siendo actualmente se utilizados tanto en aplicaciones alimentarias como no alimentarias, tales como envoltorios, películas de acolchado, bolsas, laminados de papel, botellas moldeadas por soplado, cajas, cubiertos, bandejas etc. (Tai et al., 2018).

6.1.2 Resinas epoxi bio-basadas de lignina y aceites vegetales

Otra línea de investigación nos muestra el diseño y preparación de resinas epoxi totalmente bio-basadas combinando aceite de lino epoxidado (ELO), lignina

y una diamina bio-basada derivada de dímeros de ácidos grasos (Ortiz et al., 2020).

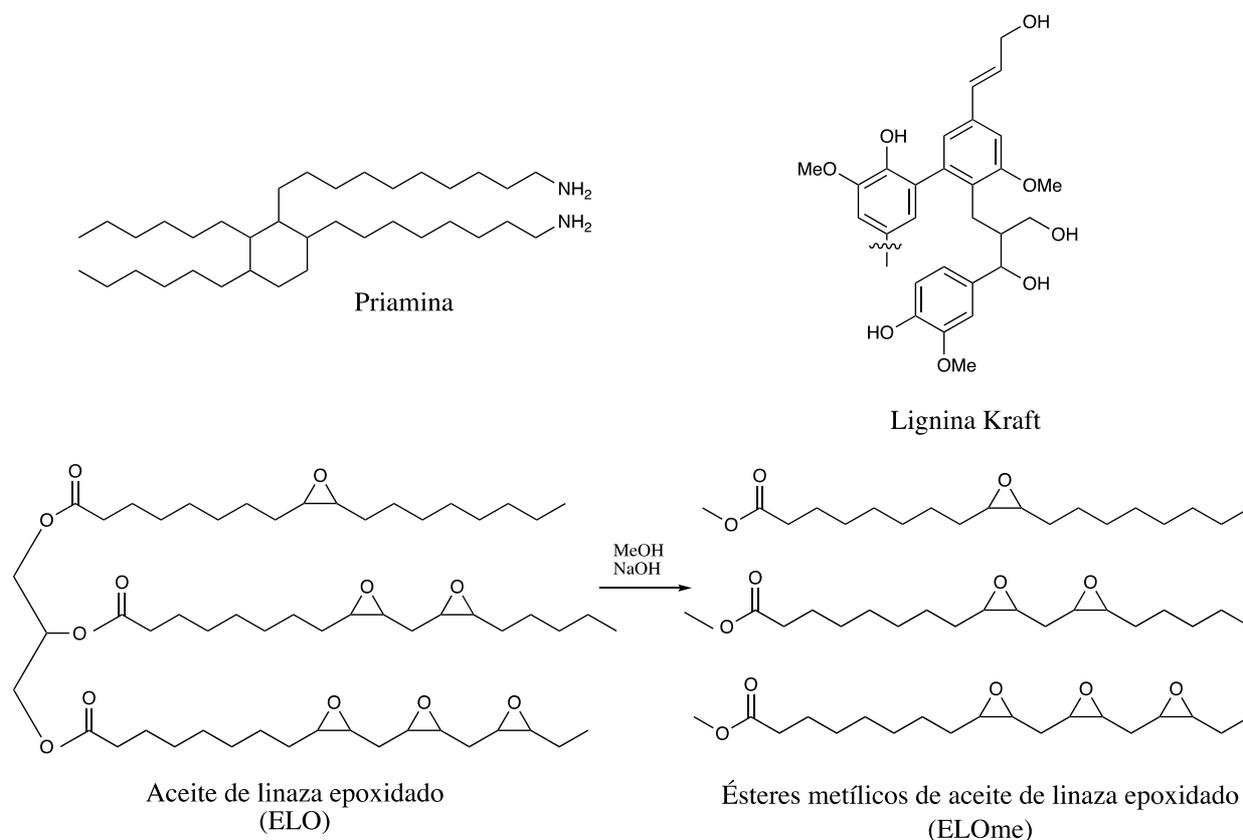


Figura 19. Componentes bio-basados utilizados en la producción de resinas epoxi bio-basadas.

Las ligninas industriales son actualmente las únicas que se encuentran disponibles a gran escala. Entre ellas, el proceso *Kraft* es el predominante en la industria del papel y la pasta de papel. Sin embargo, el uso de esta lignina para la síntesis de polímeros representa un reto debido a su alta dispersión, solubilidad limitada y heterogeneidad (Rinaldi et al., 2016). Las estructuras aromáticas de la lignina que podemos observar en la figura 19 aportan dureza y resistencia a esta resina epoxi que de otro modo sería flexible y quebradiza. En estas resinas epoxi, hay una amplia variedad de endurecedores que se pueden utilizar en la polimerización, siendo las poliaminas la opción más común. Si bien es cierto que la producción industrial de poliaminas bio-basadas está todavía en pañales, podemos encontrar comercializada la Priamine® de Croda, derivada de ácidos grasos dimerizados (Baroncini et al., 2016).

6.1.2.1 Aplicaciones

De forma general, las resinas poliméricas se clasifican en resinas éster y epoxi, utilizándose las primeras en aplicaciones de bajo rendimiento y las segundas en aplicaciones de alto rendimiento debido a su mayor tendencia a adherirse a la superficie de las fibras de vidrio y de carbono que las resinas de éster (Ramon et al., 2018). Las resinas bio-basadas pretenden desarrollar materiales termoestables, termoplásticos y ligeros con mejores propiedades mecánicas y sustituir a las resinas comerciales basadas en el petróleo. Esta mejora hace que la demanda de resinas biológicas no cese de aumentar. Las resinas a base de lignina se han utilizado en amplias aplicaciones como equipos deportivos, raquetas de tenis, aviones, barcos y en la construcción para edificios gracias a su ligereza, alto módulo específico y resistencia (Kumar et al., 2021).

6.1.3 Polímeros bio-basados producidos por microorganismos metabólicamente modificados.

Otra de las posibles formas de producción de polímeros bio-basados es mediante el ensamblado de monómeros producidos por microorganismos metabólicamente modificados. Estos microorganismos dan lugar a polímeros sintetizados *in vivo*, dioles, ω -aminoácido, ácidos dicarboxílicos, monómeros aromáticos, hidroxiácidos y diaminas, a partir de los cuales se pueden obtener polímeros como el nilón o el poliuretano (Chung et al., 2015).

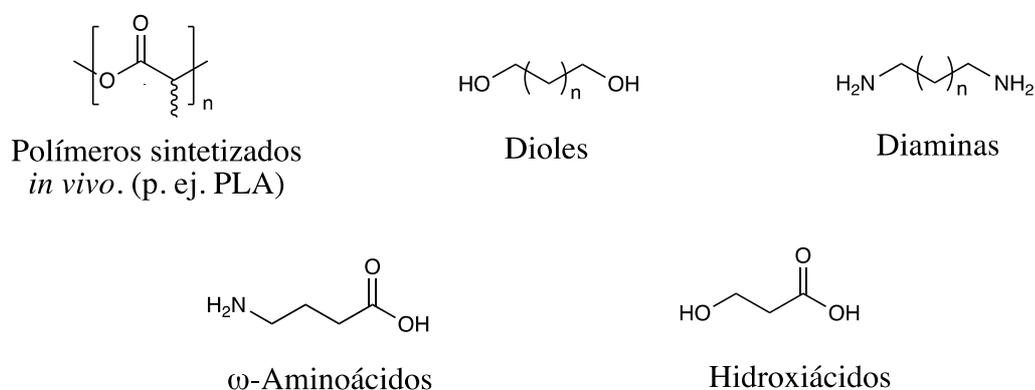
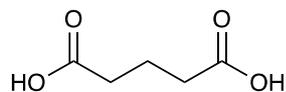
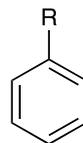


Figura 20. Polímeros y monómeros producidos por microorganismos metabólicamente modificados (I).



Ácidos dicarboxílicos
(p.ej. ácido glutárico)



Monómeros aromáticos

Figura 21. Polímeros y monómeros producidos por microorganismos metabólicamente modificados (II).

6.1.4 Polímeros bio-basados a partir de microalgas y alginatos

También podemos encontrar otra línea de investigación en vías de desarrollo como es la producción de bioplásticos a partir de microalgas. Ésta es una nueva oportunidad con gran potencial, ya que los bioplásticos que derivan de cultivos terrestres como el maíz o la patata, compiten con el suministro de alimentos, a la vez que consumen grandes extensiones de terreno, agua y nutrientes, dificultando la sostenibilidad de ellos a largo plazo. Los principales géneros de algas empleados en este ámbito son *Chlorella*, por su alta resistencia y estabilidad térmica, y *Spirulina*, empleada también en el sector alimenticio y conocida por su capacidad de adaptación a condiciones extremas (Cinar et al., 2020).

Además, los alginatos, gracias a su capacidad para formar películas y revestimientos, son ampliamente aplicados con fines de conservación y envasado de alimentos. Esto es debido a sus buenas propiedades de formación de películas, baja permeabilidad al O₂ y a los vapores, flexibilidad, buena resistencia a la tracción, resistencia al desgarramiento, rigidez, solubilidad en agua y brillo, al tiempo que son insípidos e inodoros (Kontominas, 2020).

7. Conclusiones.

La pandemia del coronavirus ha supuesto un impacto de gran calibre en cuanto a la producción y acumulación de plásticos. Esto se debe a diversos factores entre los cuales el principal es la gran producción de equipos de protección personal. Sin embargo, no se quedan atrás otros factores como el cambio sociológico que han sufrido los consumidores por miedo a la transmisión del virus, optando por un aumento de la cultura del “usar y tirar”; así como el uso de servicios online que suponen una cantidad de embalaje mayor.

Es innegable el aumento de la importancia que los polímeros bio-basados están viviendo actualmente. Su condición de polímeros “*bioaventajados*” les confiere un hueco en el mercado cada vez mayor gracias a avances como el de la empresa NatureWorks, que consiguió producir a gran escala el PLA y así abaratar su precio. Además, se llevaron a cabo optimizaciones de este polímero mediante la adición de un grupo acetal que le otorgaba una capacidad de degradación en agua mucho mayor, dando lugar al PEA.

Son numerosas las líneas de investigación que se están desarrollando en el campo de los polímeros sostenibles debido a la incesante demanda. Algunas de las líneas de investigación que se encuentran en boga actualmente son el desarrollo de polímeros híbridos de almidón-PU y la optimización de estos mediante la sustitución de los PU por NIPUs, que son más verdes.; las resinas epoxi bio-basadas de lignina y aceites vegetales, las cuales gracias a esta combinación consiguen una gran resistencia; los polímeros y monómeros producidos mediante microorganismos metabólicamente modificados; y los polímeros a base de microalgas y alginatos, los cuales tienen un gran potencial debido a que no compiten con el suministro de alimentos como los derivados de cultivos terrestres.

Las aplicaciones que se le van otorgando a los polímeros bio-basados son cada vez más numerosas. Las principales residen en el ámbito de la biomedicina como transportadores de fármacos o en la ingeniería tisular, por ejemplo; y en el sector del envasado con aplicaciones tanto alimentarias como no alimentarias. Además, las aplicaciones en los sectores de transportes y de materiales deportivos o de construcción se multiplican sin parar.

8. Bibliografía

- Ahmadifard A. Unmasking the hidden pandemic: sustainability in the setting of the COVID-19 pandemic. *Br Dent J* 2020;229:343–5. <https://doi.org/10.1038/s41415-020-2055-z>.
- Ahmed T, Shahid M, Azeem F, Rasul I, Shah AA, Noman M, et al. Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environ Sci Pollut Res* 2018;25:7287–98. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>.
- Anastas PT. Green Chemistry and the role of analytical methodology development. *Crit Rev Anal Chem* 1999;29:167–75. <https://doi.org/10.1080/10408349891199356>.
- Anastas PT, Warner J. *Green Chemistry: Theory and Practice* 1998.
- Arduoso M, Forero-López AD, Buzzi NS, Spetter C V., Fernández-Severini MD. COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America. *Sci Total Environ* 2021;763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144365>.
- Azimi B, Maleki H, Zavagna L, de la Ossa JG, Linari S, Lazzeri A, et al. Bio-based electrospun fibers for wound healing. *J Funct Biomater* 2020;11. <https://doi.org/10.3390/JFB11030067>.
- Baroncini EA, Kumar Yadav S, Palmese GR, Stanzione JF. Recent advances in bio-based epoxy resins and bio-based epoxy curing agents. *J Appl Polym Sci* 2016;133:1–19. <https://doi.org/10.1002/app.44103>.
- Benson NU, Fred-Ahmadu OH, Bassey DE, Atayero AA. COVID-19 pandemic and emerging plastic-based personal protective equipment waste pollution and management in Africa. *J Environ Chem Eng* 2021;9. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105222>.
- Brundtland GH. Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. *Doc Las Nac Recolección Un ...* 1987:416.
- van Buren N, Demmers M, van der Heijden R, Witlox F. Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. *Sustain* 2016;8:1–17. <https://doi.org/10.3390/su8070647>.
- Carré C, Ecochard Y, Caillol S, Avérous L. From the Synthesis of Biobased Cyclic Carbonate to Polyhydroxyurethanes: A Promising Route towards Renewable Non-Isocyanate Polyurethanes. *ChemSusChem* 2019;12:3410–30. <https://doi.org/10.1002/cssc.201900737>.

- Chen TL, Kim H, Pan SY, Tseng PC, Lin YP, Chiang PC. Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. *Sci Total Environ* 2020;716:136998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>.
- Chung H, Yang JE, Ha JY, Chae TU, Shin JH, Gustavsson M, et al. Bio-based production of monomers and polymers by metabolically engineered microorganisms. *Curr Opin Biotechnol* 2015;36:73–84. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.07.003>.
- Fadare OO, Okoffo ED. Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment. *Sci Total Environ* 2020;737:140279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140279>.
- Falcone PM, Hiete M. Exploring green and sustainable chemistry in the context of sustainability transition: The role of visions and policy. *Curr Opin Green Sustain Chem* 2019;19:66–75. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.08.002>.
- Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 2017;3:25–9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Ghasemlou M, Daver F, Ivanova EP, Adhikari B. Synthesis of green hybrid materials using starch and non-isocyanate polyurethanes. *Carbohydr Polym* 2020;229:115535. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115535>.
- Hernández N, Williams RC, Cochran EW. The battle for the “green” polymer. Different approaches for biopolymer synthesis: Bioadvantaged vs. bioreplacement. *Org Biomol Chem* 2014;12:2834–49. <https://doi.org/10.1039/c3ob42339e>.
- Jribi S, Ben Ismail H, Doggui D, Debbabi H. COVID-19 virus outbreak lockdown: What impacts on household food wastage? *Environ Dev Sustain* 2020;22:3939–55. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00740-y>.
- Kalina M, Tilley E. “This is our next problem”: Cleaning up from the COVID-19 response. *Waste Manag* 2020;108:202–5. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.006>.
- Kaur G, Uisan K, Ong KL, Ki Lin CS. Recent Trends in Green and Sustainable Chemistry & Waste Valorisation: Rethinking Plastics in a circular economy. *Curr Opin Green Sustain Chem* 2018;9:30–9. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.11.003>.
- Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour Conserv Recycl* 2017;127:221–32.

- <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Kitajima M, Ahmed W, Bibby K, Carducci A, Gerba CP, Hamilton KA, et al. SARS-CoV-2 in wastewater: State of the knowledge and research needs. *Sci Total Environ* 2020;739:139076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139076>.
 - Kontominas MG. Use of alginates as food packaging materials. *Foods* 2020;9. <https://doi.org/10.3390/foods9101440>.
 - Kumar B, Agumba DO, Pham DH, Latif M, Dinesh, Kim HC, et al. Recent research progress on lignin-derived resins for natural fiber composite applications. *Polymers (Basel)* 2021;13:1–30. <https://doi.org/10.3390/polym13071162>.
 - Lett LA. Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Rev Argent Microbiol* 2014;46:1–2. [https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(14\)70039-2](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70039-2).
 - Li C, Busquets R, Campos LC. Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Sci Total Environ* 2020;707:135578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135578>.
 - López Valentín J, Bernal-Ortega P, Posadas P, Fernández A, Herrero R, Muscas F, et al. Diseño y desarrollo sostenible de materiales poliméricos. *Rev Plásticos Mod* 2018;115:8.
 - Loste N, Roldán E, Giner B. Is Green Chemistry a feasible tool for the implementation of a circular economy? *Environ Sci Pollut Res* 2020;27:6215–27. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07177-5>.
 - Madbouly SA, Schrader JA, Srinivasan G, Liu K, McCabe KG, Grewell D, et al. Biodegradation behavior of bacterial-based polyhydroxyalkanoate (PHA) and DDGS composites. *Green Chem* 2014;16:1911–20. <https://doi.org/10.1039/c3gc41503a>.
 - de Marco BA, Rechelo BS, Tótolí EG, Kogawa AC, Salgado HRN. Evolution of green chemistry and its multidimensional impacts: A review. *Saudi Pharm J* 2019;27:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.07.011>.
 - Meng L, Li S, Yang W, Simons R, Yu L, Liu H, et al. Improvement of Interfacial Interaction between Hydrophilic Starch Film and Hydrophobic Biodegradable Coating. *ACS Sustain Chem Eng* 2019;7:9506–14. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00909>.
 - Miller SA. Sustainable polymers: Opportunities for the next decade. *ACS Macro Lett* 2013;2:550–4. <https://doi.org/10.1021/mz400207g>.

- Mülhaupt R. Green polymer chemistry and bio-based plastics: Dreams and reality. *Macromol Chem Phys* 2013;214:159–74. <https://doi.org/10.1002/macp.201200439>.
- Ortiz P, Vendamme R, Eevers W. Fully biobased epoxy resins from fatty acids and lignin. *Molecules* 2020;25:1–11. <https://doi.org/10.3390/molecules25051158>.
- Parashar N, Hait S. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter? *Sci Total Environ* 2021;759:144274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>.
- Patrício Silva AL, Prata JC, Walker TR, Campos D, Duarte AC, Soares AMVM, et al. Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Sci Total Environ* 2020;742:140565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565>.
- Patrício Silva AL, Prata JC, Walker TR, Duarte AC, Ouyang W, Barcelò D, et al. Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. *Chem Eng J* 2021;405. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683>.
- Prat D, Hayler J, Wells A. A survey of solvent selection guides. *Green Chem* 2014;16:4546–51. <https://doi.org/10.1039/c4gc01149j>.
- Quienne B, Kasmi N, Dieden R, Caillol S, Habibi Y. Isocyanate-Free Fully Biobased Star Polyester-Urethanes: Synthesis and Thermal Properties. *Biomacromolecules* 2020;21:1943–51. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00156>.
- Ramon E, Sguazzo C, Moreira PMGP. A review of recent research on bio-based epoxy systems for engineering applications and potentialities in the aviation sector. *Aerospace* 2018;5. <https://doi.org/10.3390/aerospace5040110>.
- Reddy MM, Misra M, Mohanty AK. Bio-based materials in the new bio-economy. *Chem Eng Prog* 2012;108:37–42.
- Reddy MM, Vivekanandhan S, Misra M, Bhatia SK, Mohanty AK. Progress in Polymer Science Biobased plastics and bionanocomposites : Current status and future opportunities. *Prog Polym Sci* 2013;38:1653–89. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.006>.
- Rinaldi R, Jastrzebski R, Clough MT, Ralph J, Kennema M, Bruijninx PCA, et al. Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis. *Angew Chemie - Int Ed* 2016;55:8164–215. <https://doi.org/10.1002/anie.201510351>.

- Rujnić-Sokele M, Pilipović A. Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review. *Waste Manag Res* 2017;35:132–40. <https://doi.org/10.1177/0734242X16683272>.
- Salinas-Estevané P, Sánchez Cervantes E. La química verde en la síntesis de nanoestructuras 2012:7–16.
- Schnurr REJ, Alboiu V, Chaudhary M, Corbett RA, Quanz ME, Sankar K, et al. Reducing marine pollution from single-use plastics (SUPs): A review. *Mar Pollut Bull* 2018;137:157–71. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.001>.
- Serrano CD. Química verde : un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente 2009:412–20.
- Serrano CD, Ruvalcaba M. Química verde: Un tema de presente y futuro para la educación de la química* 2013;24:94–5. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72501-1](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72501-1).
- Seymour RB. Introducción a la química de los polímeros . Primera ed. Barcelona: Reverté; 2013.
- Shen Z, Zhang J, Zhu W, Zheng L, Li C, Xiao Y, et al. A solvent-free route to non-isocyanate poly(carbonate urethane) with high molecular weight and competitive mechanical properties. *Eur Polym J* 2018;107:258–66. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.08.006>.
- Smieja JM, Babcock KE. The intersection of green chemistry and steelcase’s path to circular economy. *Green Chem Lett Rev* 2017;10:331–5. <https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1383516>.
- Solanki A, Das M, Thakore S. A review on carbohydrate embedded polyurethanes: An emerging area in the scope of biomedical applications. *Carbohydr Polym* 2018;181:1003–16. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.049>.
- Suryawanshi Y, Sanap P, Wani V. Advances in the synthesis of non-isocyanate polyurethanes. *Polym Bull* 2019;76:3233–46. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2531-7>.
- Tai NL, Adhikari R, Shanks R, Halley P, Adhikari B. Flexible starch-polyurethane films: Effect of mixed macrodiol polyurethane ionomers on physicochemical characteristics and hydrophobicity. *Carbohydr Polym* 2018;197:312–25. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.019>.
- Urban RC, Nakada LYK. COVID-19 pandemic: Solid waste and environmental impacts in Brazil. *Sci Total Environ* 2021;755:142471.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142471>.

- Vanapalli KR, Sharma HB, Ranjan VP, Samal B, Bhattacharya J, Dubey BK, et al. Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Sci Total Environ* 2021;750:141514.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141514>.

- WHO. Rational use of personal protective equipment for coronavirus disease 2019 (COVID-19) - Interim guidance. *WHO Interim Guid* 2020;2019:1–7.
- Zhu Y, Romain C, Williams CK. Sustainable polymers from renewable resources. *Nature* 2016;540:354–62. <https://doi.org/10.1038/nature21001>.