

ALTERNATIVAS A LOS PLÁSTICOS CONVENCIONALES. LAS DOS CARAS DE LOS PLÁSTICOS VERDES

*Laura Ribba^a, Oswaldo Ochoa-Yepes^b,
Edgar Darío Díaz^b, Silvia Goyanes^{b*}*

^a INTI, CONICET, Dirección de Materiales Avanzados, Áreas del Conocimiento,
San Martín, Buenos Aires, Argentina.

^b Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física.
IFIBA (CONICET). Buenos Aires, Argentina.
goyanes@df.uba.ar

Resumen

En los últimos 10 años, la conciencia social y las normativas medioambientales vienen impulsando el reemplazo de los plásticos tradicionales por los llamados plásticos verdes. En este capítulo se describen en profundidad las ventajas y desventajas de estos materiales respecto a los plásticos convencionales, junto con sus principales aplicaciones actuales y perspectivas a futuro. Los nuevos desafíos que plantean respecto a la gestión de residuos son abordados desde un punto de vista de las tecnologías y las regulaciones. Finalmente, la importancia de políticas de estado integrales que acompañen su implementación para que esto pueda marcar una diferencia es remarcada.

Palabras clave: bioplástico, bio-basado, biodegradable, normas, disposición final.

Abstract

Alternatives to conventional plastics. The two sides of green plastics. In the last 10 years, social awareness and environmental regulations have driven the replacement of traditional plastics by so-called green plastics. This chapter describes the advantages and disadvantages of these materials over conventional plastics, along with their main current applications and future perspectives. The new challenges they pose with respect to waste management are addressed from a technologic and regulatory point of view. Finally, the importance of comprehensive state policies that accompany their implementation is highlighted.

Keywords: bioplastic, bio-based, biodegradable, standards, final disposal.

INTRODUCCIÓN

Los primeros materiales plásticos fueron sintetizados a fines del siglo XIX a partir de materias primas orgánicas, en particular derivados de celulosa. Sin embargo, con el surgimiento de los plásticos de origen petroquímico, más económicos y adecuados para una producción masiva, los bioplásticos fueron desplazados. No fue hasta la segunda mitad del siglo XX que se comenzó a considerar los costos ambientales asociados a la producción de millones de toneladas de materiales desechables no biodegradables.

El primer producto comercializado como bioplástico fue creado en 1976 por la compañía británica Imperial Chemical Industries (ICI), sin embargo, su uso fue muy restringido debido a su alto costo. A partir de allí el interés por estos materiales se incrementó favorablemente y hoy en día el mercado de los bioplásticos es una realidad. Estos materiales son el foco de una industria emergente centrada en hacer que una vida cómoda sea compatible con la estabilidad ambiental. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para lograr mitigar el efecto negativo de los plásticos convencionales en el medio ambiente. Dentro del concepto de bioplásticos o “plásticos verdes” se incluye una amplia gama de materiales, incluyendo biodegradables y/o bio-basados, que es necesario comprender a fondo para aprovechar sus ventajas medioambientales. Para lograr explotar la potencialidad de los bioplásticos, es necesario el desarrollo de legislación y políticas de estado que, basados en el avance de la tecnología, permitan una eficiente gestión de residuos. Esto no solo implica disminuir el riesgo ambiental, sino obtener un balance económico positivo, ya sea por potenciar economías rurales regionales donde se producen las materias primas renovables, o gracias a la conversión de desechos biodegradables en biogas.

1. Tipos de plásticos verdes: definiciones y clasificación.

Comúnmente, y en forma incorrecta, se piensa que algo que deriva de la biomasa, también debe ser biodegradable. Sin embargo, es importante comprender que los plásticos de base biológica no siempre son biodegradables y que los plásticos biodegradables no siempre son de base biológica. Con el fin de aclarar la terminología asociada a este capítulo en primer lugar se realizará una breve descripción de los términos más importantes.

Los **plásticos verdes** o **bioplásticos** se definen como polímeros biodegradables y/o bio basados, es decir pueden cumplir ambos requisitos o solo uno de ellos. Por un lado, los polímeros **bio-basados** o **biopolímeros** son definidos por la IUPAC como sustancias macromoleculares derivadas de plantas, animales o microorganismos. Éstos se pueden clasificar en función de distintos criterios, como se muestra en la Fig. 1. Una clasificación propone dividirlos en aquellos extraídos directamente de biomasa, los sintetizados a partir de bio-monómeros y los producidos a partir de microorganismos. Otra opción es clasificarlos como de primera generación, producidos a partir de fuentes alimenticias como carbohidratos (trigo, maíz, caña de azúcar y soja), de segunda generación, que se producen a partir de

materias primas no aptas para alimentos (cultivos no alimentarios y materiales de desecho del primer procesamiento de biomasa); y de tercera generación, refiriéndose a la producción directa de plástico (o monómero) por microorganismos.

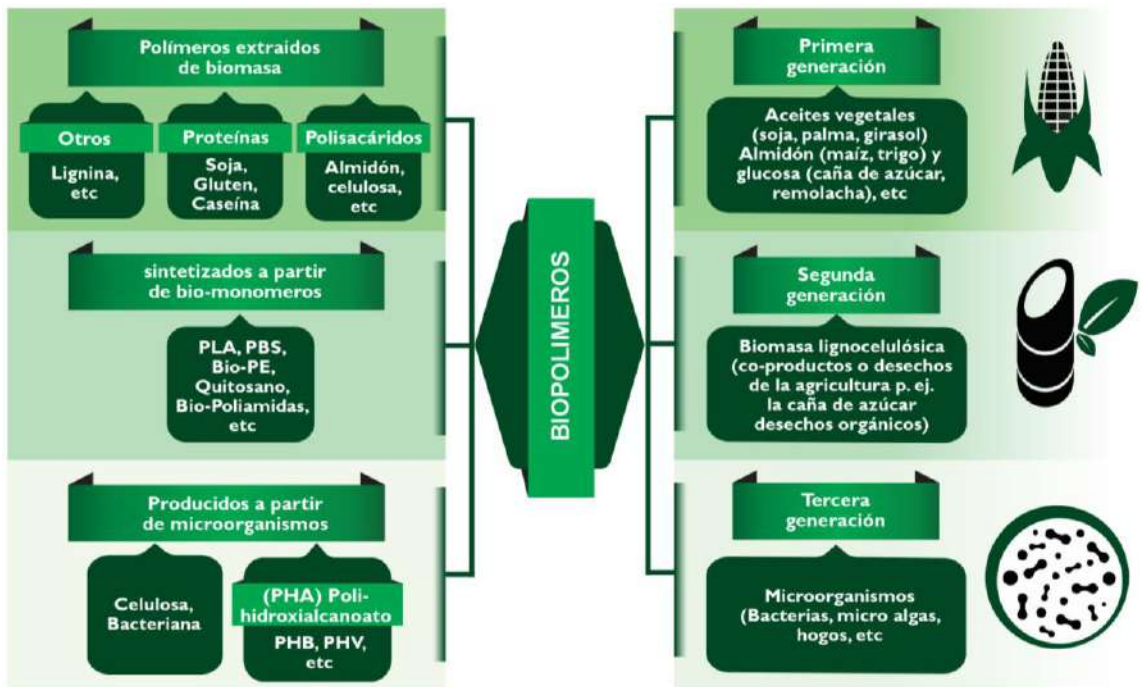


Fig. 1. Clasificaciones de los biopolímeros. Ejemplos de cada tipo.

Por otro lado, se definen como **biodegradables** a los polímeros susceptibles de degradación por actividad biológica, cuya degradación está acompañada de una disminución de su masa molar. Es decir, los polímeros capaces de ser mineralizados (convertidos en compuestos inorgánicos) mediante la acción de microorganismos obteniendo como productos finales compuestos de carbono y agua. Es importante aclarar que la biodegradación de estos polímeros puede ocurrir en condiciones aeróbicas (en presencia de oxígeno) o anaeróbicas (en ausencia de él), dando lugar a productos variados. Mientras que durante la degradación aeróbica el polímero es convertido principalmente en CO_2 y agua, durante la degradación anaeróbica se emite además metano (CH_4), un gas de efecto invernadero relativamente potente que contribuye al calentamiento global del planeta, pero puede utilizarse como fuente de energía si es correctamente colectado.

Además de la presencia de oxígeno, otros parámetros ambientales como la disponibilidad de nutrientes, temperatura, humedad ambiental, presencia de microorganismos y pH influyen la biodegradabilidad de los plásticos. Por ejemplo, la degradabilidad de PLA y PCL en condiciones neutras y ácidas es lenta y alta en condiciones básicas [1]. La biodegradación se puede dar en diferentes ambientes, por lo que al definir un material como biodegradable es necesario aclarar bajo qué condiciones. Hay fuertes diferencias entre disponer el “biodegradable” en un relleno sanitario, en suelo, en una compostera industrial, en agua dulce o en agua marina.

Fijado el ambiente a evaluar, la biodegradabilidad de un polímero dependerá de su estructura molecular y consecuentes propiedades. Por ejemplo, su cristalinidad, peso molecular, presencia de enlaces susceptibles al rompimiento enzimático, estereoquímica, carácter hidrofílico/hidrofóbico, flexibilidad de las cadenas y tamaño de regiones amorfas, serán decisivas para definir la posibilidad de ser degradado por microorganismos.

Como se detalló previamente, un bioplástico puede ser no biodegradable, y un biodegradable puede no provenir de biomasa. Generalmente en la literatura se encuentran esquemas como el de la Fig. 2 para mostrar las diferentes posibilidades que tienen los polímeros tanto desde el punto de vista de su origen como de su capacidad para biodegradarse, siendo todos englobados en la denominación de bioplásticos excepto los polímeros que pertenecen al cuadrante de plástico convencional (no biodegradables y de origen petroquímico).

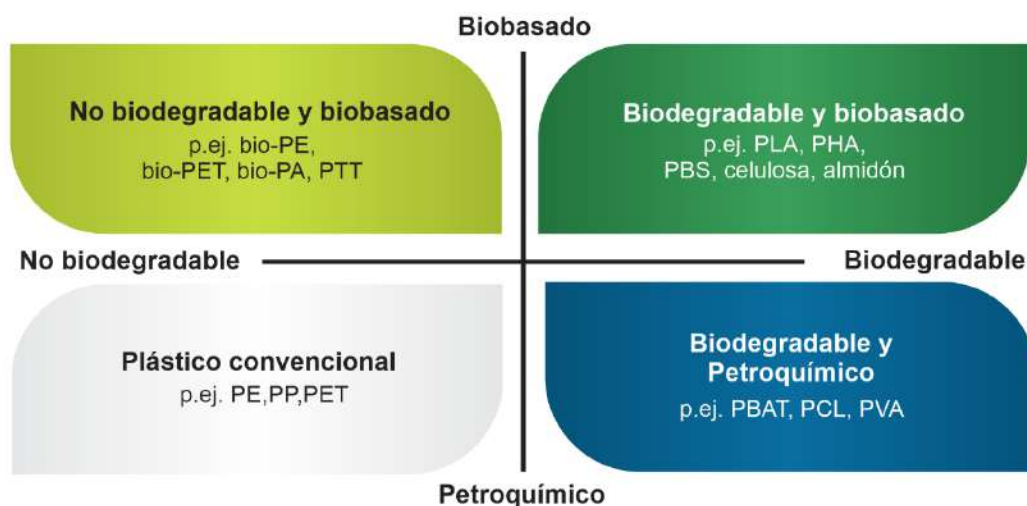


Fig. 2. Sistema de coordenadas de materiales de los plásticos.

Una palabra que puede llevar a confusión es el término **biomateriales** (o **polímeros biocompatibles**). Éstos son polímeros utilizados en aplicaciones biomédicas ya que no interfieren ni degradan el entorno biológico, es decir, interactúan con los tejidos vivos, sin causar daño.

Otra definición que es importante aclarar es que es la **oxo-degradación** consiste en la degradación física de los plásticos en unidades más pequeñas a través de acciones de oxidación, térmicas o ultravioleta. A través de estos procesos, el peso molecular disminuye, sin embargo, estos materiales pueden ser muy nocivos porque quedan como microplásticos (MP). La dirección general para el medio ambiente de la Unión Europea ha recomendado la restricción en el uso de este tipo de materiales, ya que no hay evidencia que los polímeros oxo-degradables sean biodegradados en un periodo razonable en un medio ambiente abierto, rellenos sanitarios o ambientes

marinos. Además, hay un considerable riesgo de que los plásticos fragmentados se bioacumulen en la cadena trófica, especialmente en los ambientes marinos [2].

2. Aplicaciones actuales y perspectivas de los bioplásticos

Los bioplásticos tienen día a día un mayor número de áreas de aplicación, siendo la más destacada el envasado de alimentos (con un 52% del mercado total de bioplásticos en 2019). Estos también se utilizan en otras industrias como textiles (10%), bienes de consumo (10%), autopartista (en particular los bio-basados no biodegradables) (7%), agricultura (7%), recubrimientos y adhesivos (7%), construcción (4%) y varios otros (3%).

El crecimiento continuo de la variedad de bioplásticos disponibles, con propiedades aplicables como plásticos de un único uso (biodegradables) así como plásticos de larga duración (versiones bio-basadas de los plásticos convencionales), ha revolucionado el mercado. Algunos autores, como por ejemplo [3], opinan que la sustitución de derivados del petróleo, por plásticos verdes, es técnicamente posible en la mayoría de los casos. Según un estudio realizado por la Universidad de Utrecht, los bioplásticos podrían sustituir técnicamente al 85% de los plásticos convencionales, y éstos podrían sinterizarse realizando sólo pequeñas modificaciones de proceso, en las refinerías que se emplean actualmente [4] La gran limitación actual para imponer los plásticos verdes es la fuerte diferencia en costos, respecto de los plásticos convencionales.

Los costos actuales de producción de materiales de base biológica dependen en gran medida de la materia prima. Cuando éstos se derivan de fuentes de bajo costo (como los residuos de biomasa) es probable que se logre un precio competitivo, siempre que esta biomasa esté disponible en altas cantidades y sea sencilla su recolección. Por otro lado, los obtenidos a partir de microorganismos necesitan mejorar el rendimiento para lograr competir. En ambos casos, hoy en día, se sigue necesitando fuerte investigación para solucionar muchos de los problemas que aún presentan. Por ejemplo, el bioetileno, monómero a partir del cual se sintetiza el bio-PE, es al menos un 30% más caro que su homólogo fósil, y su precio depende en gran medida del precio de la materia prima. El precio del PLA, también es del orden de un 30 % mayor al de los polímeros petroquímicos con los cuales compite. Peor aún es el caso de los compuestos a base de almidón, como por ejemplo el Mater Be, que son aproximadamente un 60% más caros que el LDPE. En el caso de los biodegradables de origen petroquímico, en general son más caros que los convencionales, pero existe una gran gama de precios, entre los que podemos encontrar el PVA, el PCL y el PBAT.

Según la *European Bioplastics*, asociación que representa los intereses de la industria de los bioplásticos, en 2019 la producción mundial de bioplásticos estuvo por debajo del 1% de la producción total de plásticos a nivel global, de este valor, el 52,6% corresponde a bioplásticos biodegradables y el 47,4% a plásticos bio-basados que no son biodegradables [5], Asia representó la mayor parte de la producción, con un 45%, seguida por Europa con un 25%. Se estima que la capacidad de producción mundial de plásticos verdes aumentará de 2,114 millones de toneladas en 2019 a

aproximadamente 2,426 millones de toneladas en 2024. Este crecimiento viene impulsado fuertemente por la introducción de nuevos bio-basados equivalentes a derivados del petróleo ya en el mercado. *European Bioplastics* espera un rápido desarrollo de PEF (furanato de polietileno) y su entrada en el mercado en 2023. El PEF es técnicamente similar al PET, pero completamente de base biológica, reciclable y con una amplia gama de aplicaciones, incluido el embalaje. En 2019, el bio-PP entró en el mercado y se proyecta un fuerte crecimiento debido a la aplicación generalizada del PP en una amplia gama de sectores. Bio-PU es otro bioplástico importante con potencial de producción masivo y con alto crecimiento proyectado debido a su versatilidad.

3. Plásticos verdes vs plásticos convencionales.

La amplia variedad de plásticos verdes existentes impide describir sus ventajas y desventajas en general, por lo que resulta más fácil caracterizar los sub-grupos definidos anteriormente en la Fig. 2.

- **Bio-basados y biodegradables:** Tanto su obtención a partir de materias primas bio-basadas como su carácter biodegradable son las principales ventajas de estos materiales frente a los plásticos convencionales. Por un lado, su origen a base de fuentes renovables y abundantes en la naturaleza los hace no depender de los derivados fósiles petroquímicos. Por el otro, su carácter biodegradable hace que si son desechados de manera correcta logren disminuir la cantidad de basura acumulada en rellenos sanitarios o fuentes hídricas (ríos y mares). Varios de los bio-basados y biodegradables, como el almidón, la celulosa y el PHA, logran biodegradarse en ambientes con condiciones variadas, a diferencia de la mayoría de los biodegradables petroquímicos, que suelen tener un rango muy acotado de condiciones en las que lo logran. La reducción de la huella de carbono (cantidad de gases de efecto invernadero que implica por su producción) es otra importantísima ventaja respecto a los plásticos convencionales, con un 80% menos de producción de CO₂. Sin embargo, estos materiales también tienen desventajas, siendo una de las principales su elevado costo. Además, algunos de los plásticos verdes son elaborados a partir de materias primas comestibles, que son usadas también para la producción de alimentos, lo que, para un grupo de investigadores, resulta un problema. Sin embargo, hoy en día el área de tierra cultivada para la producción de bioplásticos es solo un 0.02 % del total de la tierra agrícola [5]. A pesar del crecimiento del mercado de bioplásticos previsto para los próximos años, se espera que la cuota de uso de la tierra se mantenga en torno a ese porcentaje, demostrando claramente que no hay competencia entre la materia prima renovable para alimentos y la producción de bioplásticos. Más aún, la transformación de un comestible en un “envase comestible” (*edible film*) es la solución que no solo aporta valor al producto primario, sino que es lo óptimo para el medio ambiente. Otra posible desventaja ocurre si no son descartados de manera correcta. Los bio-basados y biodegradables no deben disponerse en rellenos sanitarios dado que

en este caso no sólo liberarían metano al ambiente (por la ausencia de oxígeno), sino que podrían generar serias inestabilidades, al igual que el efecto que produce en estas instalaciones el depósito de restos de alimentos. Un caso particularmente problemático es el PLA dado que este no degrada en suelo ni en ambiente marino, por lo cual, en estos dos casos, generará MP, problemática particular que se detallará más adelante.

- **Bio basados y no biodegradables:** Su principal ventaja es justamente el carácter bio-basado de los mismos, y la posibilidad de su uso como sustitutos de los plásticos convencionales en aplicaciones de larga duración. Sin embargo, desde el punto de vista de la biodegradabilidad, estos no presentan ninguna ventaja respecto de su homónimo petroquímico. Si bien no son biodegradables, debe recalarse que pueden ser reciclados junto con sus equivalentes fósiles. En aquellos casos en que la cadena de reciclaje esté bien instrumentada su implementación es fuertemente beneficiosa. Un claro ejemplo es el de una reconocida marca de gaseosa que desde 2009 está implementando el reemplazo de parte del PET utilizado para sus botellas por bio-PET.
- **Biodegradable no bio-basados:** Si bien son de origen petroquímico, su gran ventaja respecto a los plásticos convencionales es su biodegradabilidad. Esta ventaja debe ser evaluada con cuidado, ya que depende de que se dispongan correctamente, y como se mencionó anteriormente, suelen tener un rango acotado de posibles ambientes para biodegradarse. Algunos ejemplos de estos son el PBAT o el PVA, el primero se degrada en suelo, pero no en agua, mientras que el PVA degrada en agua, pero no en suelo. Si el medio de degradación no es el adecuado, el tiempo de degradación es prolongado y durante el proceso pueden generarse MP que resultan contaminantes para el medio ambiente, problemática que se abordará en profundidad en la siguiente sección.

3.1 Microplásticos generados por plásticos verdes.

Los efectos de los MP generados a partir de los polímeros petroquímicos no biodegradables se han convertido en un importante tema político y académico, y serán detallados en otro capítulo de este libro. En cuanto a las versiones bio-basadas de dichos polímeros, la problemática es equivalente, ya que como se detalló anteriormente la estructura polimérica y consecuentes mecanismos de degradación son los mismos. Por esa razón, en esta sección se describirá la problemática asociada a los MP generados a partir de plásticos biodegradables, también denominados bio-microplásticos (bio-MP).

Uno de los primeros y más importantes pasos de degradación es la biofragmentación, que depende del tipo y número de enzimas. Las enzimas se producen de forma intracelular y se requieren condiciones relativamente específicas para su excreción. Si un polímero es por ejemplo biodegradable en un determinado ambiente marino, una pequeña variación en la temperatura o el pH puede hacer que la biodegradación no se de en forma completa y se generen bio-MP.

Anteriormente se creía que los bio-MP producirían consecuencias menos dañinas que los MP convencionales; pero los resultados experimentales son contradictorios, independientemente de los tipos y tamaños de los bio-MP estudiados. En algunos casos se ha demostrado que los bio-MP pueden exhibir características similares y causar efectos análogos a los de los MP convencionales, mientras que en otros el efecto de los biodegradables es mucho menor y hasta inexistente. En particular, desde 2015 se están estudiando sus consecuencias ecotoxicológicas en hábitats marinos y de agua dulce. Se ha reportado que la presencia de PLA induce estrés y eleva las tasas de respiración en ostras (*Ostrea edulis*) y *Arenicola marina L*). El estado de salud, los comportamientos alimenticios y los procesos ecológicos de estas especies se han visto afectados por el estrés inducido debido a la presencia de micropartículas de este bioplástico [6]. En cambio, fue reportado que MP de PLA no mostraron ningún efecto significativo sobre la salud de pulgas de agua (dáfidos), mientras que MP de PS causaron una alta mortalidad, disminución de la tasa de alimentación y rendimiento reproductivo [7].

Estos resultados, demuestran que aún hay mucho por entender respecto al efecto de los bio-MP, pero es clara la necesidad de al desecharlos exponerlos a las condiciones específicas necesarias para su biodegradación. En este sentido, las regulaciones internacionales, detalladas más adelante, exigen demostrar que los MP que se forman con la degradación del material no sean tóxicos para certificar su biodegradabilidad en cada medio específico.

4. Nuevos desafíos en la gestión de residuos

Dentro de los plásticos verdes, aquellos bio-basados no biodegradables se comportarán en su disposición final de la misma manera que sus equivalentes derivados del petróleo. Como se mencionó anteriormente, estos materiales (por ejemplo, el bio-PET) se pueden mezclar con sus homólogos basados en combustibles fósiles (por ejemplo, PET industrial) y reciclar en las instalaciones de reciclaje existentes. Teniendo esto en cuenta, en esta sección se abordará el tema de los nuevos desafíos planteados en la gestión de residuos por la inclusión de plásticos biodegradables, teniendo en cuenta la amplia variedad existente.

Para estudiar si los plásticos biodegradables realmente pueden reducir la problemática asociada a la acumulación de basura plástica en el planeta, debe analizarse que ocurre en su etapa final de vida útil, al ser tratados mediante las tecnologías y prácticas de gestión de residuos predominantes. La tasa de biodegradación de estos materiales depende de las condiciones físico-químicas a las que se exponen en dichos tratamientos (por ejemplo, presencia de oxígeno, temperatura, presencia de luz, presencia de microorganismos específicos).

Los principales medios de tratamiento de desechos son el reciclaje, el compostaje, la digestión anaeróbica, la incineración y el vertido en rellenos sanitarios. Cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas desde un punto de vista operativo, económico y ecológico, y tendrá nuevos desafíos técnicos impuestos por los plásticos biodegradables.

4.1 Reciclaje y procesamiento

El reciclaje de plásticos biodegradables es un tema controvertido. Por un lado, solo algunos pueden ser reciclados por medios mecánicos y químicos, como el PLA, PHA, el PHB y el PHBV [8]. Si bien esta metodología no aprovecha la biodegradabilidad de estos materiales, los partidarios del reciclaje afirman que muchos de los polímeros biodegradables comerciales (como el PLA) solo se biodegradan en condiciones muy particulares, por lo que sus residuos pueden crear problemas ambientales en el futuro. En este sentido proponen el reciclaje como una forma de cumplir con los requisitos de economía circular.

Sin embargo, los opositores al reciclaje afirman que además de no aprovechar la biodegradabilidad, los polímeros biodegradables plantean un problema grave cuando entran en corrientes de reciclaje de plásticos convencionales. Los sistemas ópticos actualmente utilizados para la separación de residuos no permiten diferenciar los plásticos convencionales de los biodegradables. Separarlos mediante la tecnología de detección del infrarrojo cercano es posible, pero su puesta en funcionamiento es costosa. Además, todos los plásticos en general tienen densidades similares, lo que evita cualquier separación mecánica sencilla. El proceso típico de reciclaje de plástico implica altas temperaturas, que pueden provocar la descomposición de los biodegradables, haciendo imposible su procesamiento posterior. La mezcla de plásticos biodegradables en la materia prima de reciclaje dañará así el proceso y la calidad de los productos reciclados. Un número creciente de recicladores de PET, asociaciones de reciclado y funcionarios han expresado su preocupación por la posible contaminación del flujo de reciclado de PET por las botellas de PLA, la pérdida de rendimiento, el aumento de los costos de clasificación y el impacto en la calidad y el procesamiento del PET reciclado [8]. Es necesaria una masa crítica de PLA (de al menos 200 millones de kg producidos anualmente) para que el reciclado independiente de envases rígidos sea rentable.

Por estos motivos, los productos fabricados con plásticos biodegradables deberían etiquetarse como tales, de modo que puedan separarse de los reciclables.

4.2 Incineración con recuperación de energía

Los plásticos biodegradables pueden incinerarse de la misma manera que los plásticos convencionales, siendo su capacidad energética similar. En particular, la fibra de celulosa natural y el almidón tienen un valor calorífico bruto relativamente más bajo que el carbón, pero similar a la madera, por lo que son considerables para la incineración. La principal diferencia entre los bio-basados y los derivados del petróleo es que el balance de CO₂ es mucho más favorable en el caso de los primeros, ya que durante el crecimiento de las plantas se consume dicho gas. En el caso de los plásticos compostables certificados también se tiene un impacto medioambiental menor tras la incineración, ya que la certificación requiere que se demuestre que el plástico contiene niveles bajos de metales pesados [9]. Si bien la recuperación de energía mediante incineración puede ser una opción técnicamente viable para los plásticos biodegradables, desaprovecha muchos de los beneficios de la biodegradabilidad del material.

4.3 Relleno Sanitario

Los rellenos sanitarios o vertederos presentan condiciones de biodegradación anaeróbicas, temperatura ambiente, y presencia de distintos consorcios bacterianos. En este ambiente, muchos de los biodegradables, como el PLA, tendrán bajas tasas de degradación, mientras que otros como el TPS lograrán descomponerse casi por completo. Esta biodegradación que puede parecer a priori positiva debe ser estudiada con mucho cuidado. La falta de oxígeno durante la degradación producirá la generación de gas metano, un gas de efecto invernadero con 25 veces el efecto del CO₂. En un vertedero ideal, donde los gases producidos sean recolectados y los desechos no tengan la posibilidad de contaminar ningún ecosistema, el único problema a resolver es la posible generación de inestabilidades en el apilamiento. Sin embargo, en rellenos sanitarios deficientes la entrada de plásticos biodegradables aumentará la biodegradación ya existente al generar más lixiviados y gases y, por lo tanto, empeorará la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales y el medio ambiente. En este contexto se puede decir que los plásticos biodegradables no están hechos para ser depositados en vertederos, demostrando una vez más la importancia del correcto etiquetado de estos materiales.

4.4 Tratamientos de residuos orgánicos: Compostaje / digestión anaeróbica

El compostaje ha sido identificado como la tecnología de tratamiento de residuos más relevante disponible para plásticos biodegradables. Durante este proceso la materia orgánica se transforma en CO₂, agua, calor y biomasa en condiciones aeróbicas por acción de microorganismos, lo cual se considera un mecanismo de reciclaje biológico para plásticos biodegradables.

El compostaje industrial ocurre cuando bacterias y hongos degradan la biomasa en condiciones aeróbicas y a altas temperaturas (50–60 °C). Esta condición se conoce como fase termofílica, que es crucial para asegurar la destrucción de patógenos humanos y vegetales termosensibles, larvas de mosca y semillas de malezas. Si bien en esta metodología se aprovecha completamente la biodegradabilidad de los materiales, pueden existir complicaciones introducidas por el tiempo de compostaje de determinados plásticos. Por ejemplo, el PLA tarda alrededor de 3 meses en compostarse, mientras que hojas y ramas tardan menos de 1 mes. Esto genera una ecuación económica que en países como Alemania se está cuestionando. La disponibilidad de instalaciones de compostaje industrial en el mundo y en particular en Argentina es limitada.

Por otro lado, el compostaje doméstico ocurre cuando bacterias y hongos degradan la biomasa en condiciones aeróbicas a temperatura ambiente (≤ 35 °C). Esta metodología es ideal para el tratamiento de residuos orgánicos, ya que no tiene costo y genera un subproducto útil a la comunidad. Debido a una baja temperatura y una mezcla menos frecuente, la biomasa se degrada lentamente en comparación con el compostaje industrial. En tales condiciones, ciertos materiales compostables certificados para compostaje industrial, como el PLA, pueden no biodegradarse lo suficiente. Por el contrario, el almidón es completamente degradable en composteras hogareñas.

Aunque es un sistema más complejo y caro que el compostaje, la digestión anaeróbica tiene el beneficio de la producción de energía. Esta tecnología para la biodegradación de residuos orgánicos en condiciones anaeróbicas permite generar biogás (CO₂ y metano), y se puede dar a temperaturas menores a 35°C (mesofílica) o entre 50 y 60 °C (termofílica). Los materiales residuales (> 40% de la materia orgánica) permanecen en el digestato y, en la mayoría de los casos, se convierten en abono para que se degrade aeróbicamente. Si bien esta metodología es bastante popular en Europa, la digestión anaeróbica no se ha aplicado en gran medida en otras partes del mundo debido a que tiene un coste de capital más alto que otras opciones de gestión de residuos. En Argentina, esta tecnología está empezando a utilizarse para la transformación de residuos agroindustriales.

El éxito de los plásticos biodegradables en general dependerá de la disponibilidad de instalaciones de compostaje / digestión. En este sentido, mejorar la recolección separada de desechos orgánicos y plásticos biodegradables para separarlos de materiales no compostables es vital, ya que se ha demostrado que el compostaje de residuos mixtos tiene un gran efecto negativo en la calidad y comerciabilidad del compost. Además, para que sea económicamente viable debe haber un mercado o uso para el compost generado.

5. Normativas internacionales

A partir de toda la información descrita hasta aquí es clara la necesidad de regulaciones, normas y estándares que detallen metodologías claras y confiables para determinar tanto el origen de los plásticos verdes (bio-basados o no) así como su comportamiento en las distintas posibles condiciones de disposición final. La conflictividad del tema es clara a partir del gran número de normas que en vez de actualizarse se dan de baja y surgen versiones diferentes de las mismas. En esta sección describiremos las normas existentes en la actualidad que permiten regular estos aspectos.

Como se explicó en los incisos anteriores, los plásticos verdes pueden o no ser bio-basados. Para una comunicación clara con respecto a la fracción bio-basada en materiales plásticos, las normas ASTM D6866-20, ISO 16620-5 y EN 16785-1 regulan las metodologías propuestas para determinar contenido de carbono de base biológica. Éstas se basan en la medición del contenido de C14, un isótopo de carbono radiactivo que solo está presente en materiales que estaban recientemente vivos (el componente de base biológica) y no en aquellos de origen fósil (derivados del petróleo). Los materiales certificados como de base biológica, basados en estas normas, pueden llevar etiquetas que incluyen el porcentaje de material bio-basado (puede ir desde un 20 hasta el 100 %), siendo las más importantes las otorgadas por DIN CERTCO, TÜV AUSTRIA y el departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA).

Paralelamente al origen de los plásticos verdes, también interesa certificar que les ocurrirá al ser desechados. La biodegradabilidad es una cuestión clave al caracterizar estos materiales, pero como se discutió anteriormente, si no son

detalladas las condiciones en las que fue evaluada, el término puede causar confusión sobre la forma adecuada de eliminación del plástico por parte del consumidor. Cada medio en el que se puede evaluar la biodegradabilidad tendrá condiciones únicas como temperatura, presencia de oxígeno y presencia de determinados microorganismos. En la Fig. 3 se observan las diferentes condiciones de los destinos usuales para residuos plásticos, así como una lista de cuales resultan biodegradables en cada caso. Como se puede observar tanto las condiciones como los materiales realmente biodegradables en cada tratamiento son muy diferentes, y solo algunos logran biodegradarse en todas las posibilidades, como el almidón y el PHA.

Existen entonces normas y estándares para certificar biodegradabilidad en diferentes condiciones. En un principio las normas se basaban en evaluar la biodegradabilidad en compostajes industriales, donde las temperaturas son relativamente altas y existen variadas comunidades de microorganismos. Sin embargo, esto no garantizaba bajo ningún concepto que el material se biodegrade en suelo o en una compostera hogareña. Tal es el caso de la EN 13432, titulada “Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje”. Esta norma requiere que la muestra a evaluar se mezcle con desechos orgánicos y se mantenga en condiciones de compostaje de prueba durante 12 semanas, después de lo cual no se permite que más del 10% de los fragmentos de material sean mayores de 2 mm, y se exige la ausencia de cualquier efecto negativo en el proceso de compostaje. Además, pide el 90% de biodegradación en 6 meses. Basándose en esta norma junto a otras preexistentes, la ISO 17088 especifica los procedimientos y requisitos para la identificación y etiquetado de plásticos y productos fabricados a partir de plásticos que son adecuados para la recuperación mediante compostaje aeróbico. Del mismo modo, la ASTM D6400 especifica las propiedades necesarias para determinar si los plásticos y los productos fabricados con plásticos se compostarán satisfactoriamente en las instalaciones de compostaje comerciales y municipales, incluida la biodegradación a una velocidad comparable a la de los materiales compostables conocidos (por ejemplo, celulosa microcristalina). Otras normativas regulan requerimientos para ciertos sistemas específicos, como la ASTM D6868, que detalla los requisitos para que un material laminado con un recubrimiento de plástico biodegradable sea etiquetado como compostable en compostaje aeróbico industrial; o las EN 14045 y EN 14806 que avalúan la desintegración de envases en este tipo de instalaciones. También existen otras normativas abocadas a compostajes en diferentes escalas, como de laboratorio o planta piloto (ISO 20200, ASTM D5338, ISO 16929).

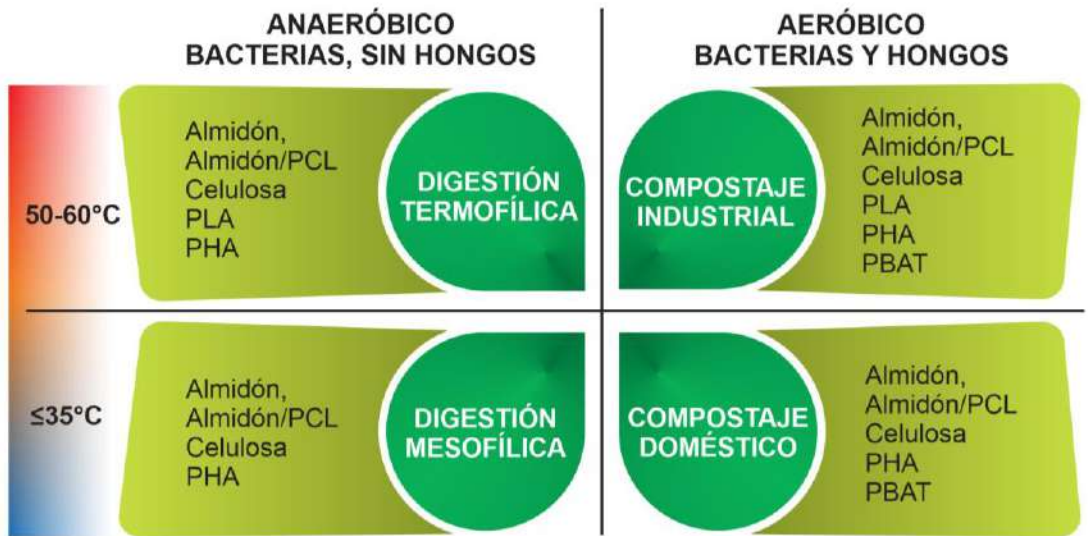


Fig. 3. Principales bioplásticos biodegradables en las condiciones de compostaje doméstico e industrial y digestión mesofílica y termofílica.

Actualmente está en discusión una norma a nivel internacional que regule la compostabilidad doméstica de bioplásticos (proyecto PNE-prEN 17427), pero ya existen varios estándares nacionales y esquemas de certificación, que se basan principalmente en la EN 13432. Para confirmar el cumplimiento de estos estándares y esquemas, los bioplásticos se prueban de acuerdo con las condiciones propensas a encontrarse en el compostaje doméstico, en particular, temperaturas más bajas y tiempos de permanencia más largos en comparación con las condiciones en las instalaciones de compostaje industrial. Los materiales o productos que cumplen con estos estándares pueden ser reconocidos por una marca de conformidad que indique su compostabilidad en el hogar. El certificador TÜV AUSTRIA BELGIUM, por ejemplo, ofrece un esquema de certificación de compostabilidad en el hogar de este tipo, y DIN CERTCO ofrece una certificación de compostabilidad en el hogar de acuerdo con la norma australiana AS 5810. Italia tiene una norma nacional para el compostaje a temperatura ambiente, UNI 11183. En noviembre de 2015, se introdujo la Norma francesa NF T 51-800 Plásticos: especificaciones para plásticos aptos para el compostaje doméstico. Esta norma está incluida en el esquema DIN CERTCO.

Otro medio en el que se puede testear la biodegradabilidad es el suelo. Este tipo de biodegradación tiene un rol importantísimo en la agricultura, en especial en las películas de acolchado plástico “mulch”. Los primeros estándares nacionales relacionados con la biodegradación en suelos fueron emitidos por las organizaciones nacionales de normalización de Francia e Italia: AFNOR NFU 52-001 y UNI 11495, respectivamente. Estas normas se usaron como base para el desarrollo de un estándar internacional europeo, el EN 17033, que regula los requisitos para las películas de acolchado de plástico biodegradables: su composición, biodegradabilidad en el suelo, ecotoxicidad, propiedades mecánicas y ópticas y los procedimientos de prueba para cada una de las categorías enumeradas. En particular la

biodegradabilidad se prueba según la ISO 17556 (equivalente a la ASTM D5988-18) que pide más de un 90% de conversión del carbono del material en CO₂ en 2 años en condiciones ambientales del suelo. Para asegurar esto se mide la demanda de oxígeno en un respirómetro o la cantidad de dióxido de carbono desprendido.

A diferencia de la biodegradabilidad en suelo, que es un proceso aeróbico, en los digestores anaeróbicos justamente hay ausencia de oxígeno, por lo que la biodegradabilidad debe probarse separadamente. La norma ASTM D5511 regula la determinación de la biodegradabilidad anaeróbica final bajo condiciones de digestión anaeróbica de alto contenido en sólidos estáticos a través del análisis del biogás liberado. Si bien esta norma no da un límite de tiempo, para otorgar el sello se pide más de un 60% de degradación 2 meses y más de un 90 % de desintegración en 5 semanas. Las condiciones planteadas por esta norma también simulan las de un relleno sanitario donde se recupere el biogas generado. Existe también una ASTM específica para la degradación en rellenos sanitarios anaeróbicos, la ASTM D5526, que plantea condiciones propias de este tipo de disposición final.

Otro medio muy importante en donde evaluar biodegradabilidad es el agua, pero por supuesto también dependerá en qué tipo de agua. Por un lado, la biodegradación en aguas residuales puede evaluarse tanto para condiciones aeróbicas como anaeróbicas. Para simular plantas de tratamiento donde hay aireación y presencia de organismos mesófilos (que crecen entre los 20 y los 45 °C) se puede exponer el material a un inóculo de lodo activado y evaluar biodegradabilidad a partir de la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado, como indica la ISO 14851. Otra posibilidad es analizar el CO₂ emitido como propone la ISO 14852. Ambas piden más de un 60% de demanda de oxígeno o emisión de CO₂ respecto a una referencia, respectivamente, y dan un tiempo máximo de evaluación de 6 meses. En otro tipo de plantas de tratamiento las condiciones son anaeróbicas, por lo que la biodegradación se puede medir evaluando el biogas emitido, tal como proponen las ISO 14853 y ISO 13975.

Por otro lado, la biodegradación marina es más lenta debido a las condiciones particulares del sistema (alta salinidad, bajas temperaturas, baja carga microbiana, bajas concentración de micronutrientes). Todas las normativas para este medio evalúan condiciones aeróbicas, pero varía el método para validar la degradación, así como el medio donde se estudia. La ASTM D6691 se usa para determinar el grado y la velocidad de degradación de plásticos en agua con al menos diez microorganismos marinos a una temperatura alrededor de los 30 °C evaluando la emisión de CO₂. Otras normas, como la ASTM D7473 avalúan la biodegradación en el sedimento marino. En particular determina la pérdida de masa de plásticos que no flotan en función del tiempo, teniendo en cuenta la ausencia de luz solar (tal como ocurre en el lecho marino). También determinan la biodegradabilidad de plásticos en suelo marino la ASTM D7991 y la ISO 19679. Ambas se basan en mediciones de CO₂ a temperaturas de entre 15 y 28°C durante menos de 24 meses. La ISO 18830 estudia el mismo fenómeno, pero a partir de mediciones del oxígeno consumido. Existe actualmente un certificado de biodegradable en ambientes marinos otorgado por Vinçotte, "*OK Biodegradable MARINE*". Esta certificación pide un 90 % de biodegradación después de 6 meses de exposición, según la Norma ASTM D6691.

En los últimos 15 años Argentina, presenta sus normas IRAM dedicadas a biodegradabilidad y compostabilidad de plásticos. Este tema así como el de residuos sólidos urbanos (RSU) son desarrollados en otros capítulos de este libro.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Para que la aplicación de plásticos verdes alivie la problemática actual de acumulación de residuos es vital que vaya de la mano de políticas públicas que acompañen su implementación desde variados puntos de vista. Por un lado, es necesario que se exija un etiquetado claro, para que el usuario sepa como disponer los residuos. Esto implica la necesidad de educar al consumidor respecto de las alternativas posibles, así como la implementación de las metodologías de gestión de residuos necesarias para aprovechar la potencialidad de estos materiales (plantas de compostaje, digestores anaeróbicos, métodos eficientes de separación de residuos). También es fundamental transformar los desechos orgánicos en recursos, ya sea para la obtención de abono como para la generación de biogas.

Es importante recalcar que, si bien estas nuevas gestiones son importantes para lograr el éxito de los plásticos biodegradables, su importancia medioambiental excede este campo. Lograr el tratamiento de los residuos orgánicos por separado (preferentemente en composteras hogareñas, pero también en plantas de compostaje industrial y digestores) permite aliviar fuertemente la presión de rellenos sanitarios y evitar las dañinas emisiones de metano. Para que un sistema de recolección de desechos orgánicos por separado sea posible, estos deberían disponerse por los usuarios en bolsas biodegradables, y aquí vuelve a aparecer la importancia de estos materiales.

Por último, para que la implementación sea exitosa en el país es necesario que los productores locales puedan formular y procesar materiales a base de bioplásticos. Para ello, es precisa la instalación de plantas piloto accesible para desarrollos conjuntos de investigadores y pymes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción científica y Tecnológica (ANPCyT PICT 2017-2362) y la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020170100381BA).

REFERENCIAS

- [1] M. A. Elsayy, K.-H. Kim, J.-W. Park, y A. Deep, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **79**, 1346 (2017).
- [2] Comisión Europea 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX%3A52018DC0035>

- [3] R. E. Putri, *The water and land footprint of bioplastics*, University of Twente, Países Bajos, 2018.
- [4] J. Brizga, K. Hubacek, y K. Feng, *One Earth*, **3**, 515 (2020)
- [5] European Bioplastics, nova-Institute 2019. <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- [6] D. S. Green, B. Boots, J. Sigwart, S. Jiang, y C. Rocha, *Environ. Pollut.* **208**, 426 (2016)
- [7] V. C. Shruti & G. Kuttralam-Muniasamy, *Sci. Total Environ.* **697**, 134139 (2019)
- [8] M. Niaounakis, *Eur. Polym. J.* **114**, 464 (2019)
- [9] R. Ciriminna y M. Pagliaro, *ChemistryOpen*, **9**, 8 (2020)