





Publicaciones en Ciencias y Tecnología. Vol 15. Nº 1, enero-junio (2021) 15-26

Artículo de revisión

Desafío de los polihidroxialcanoatos como solución al problema de los plásticos de un solo uso

Challenge of polyhydroxyalkanoates as a solution to the problem of single-use plastics

Héctor Zambrano Castro^a, Maria Antonieta Riera^a

^aUniversidad Técnica de Manabí, Ecuador

DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30750.25923 Recibido: 06-10-2021 Aceptado: 22-11-2021

Resumen

Los polihidroxialcanoatos (PHAs) son biopolímeros de origen bacteriano que presentan variedades de aplicaciones, dadas sus características de bioabsorbibilidad, hidrofobicidad biocompatibilidad y biodegradabilidad. Su producción y comercialización en la actualidad es limitada, debido a que existen variables en su proceso de producción que deben ser optimizadas, para que sea un proceso económicamente atractivo. En este sentido se realizó una revisión bibliográfica partiendo de la consulta en artículos científicos indexados, con el propósito de describir los PHAs, exponer las clasificaciones existentes, propiedades, principales aplicaciones, etapas propuestas en el proceso de fabricación y variables relacionadas, a fin de reducir los costos de fabricación asociados. Se conoció que la selección del sustrato, además de los microorganismos utilizados en la síntesis microbiana, es una de las etapas más importantes en el proceso de fabricación del biomaterial, pues de esto dependen las etapas de fabricación y costos asociados al mismo.

Palabras clave: biopolímeros, bioplásticos, PHAs, polímeros bacterianos. Código UNESCO: 2304.03 - Química macromolecular, polímeros compuestos.

Abstract

Polyhydroxyalkanoates (PHAs) are biopolymers of bacterial origin that present varieties of applications, given their characteristics of bioabsorbability, hydrophobicity, biocompatibility and biodegradability. Its production and commercialization at present is limited, due to the fact that there are variables in its production process that must be optimized, so that it is an economically attractive process. In this sense, a bibliographic review was carried out based on the consultation of indexed scientific articles, with the purpose of describing the PHAs, exposing the existing classifications, properties, main applications, proposed stages in the manufacturing process and related variables, so that reduce associated manufacturing costs. It was known that the selection of the substrate, in addition to the microorganisms used in microbial synthesis, are one of the most important stages in the biomaterial manufacturing process, since the manufacturing stages and costs associated with the process depend on this.

Keywords: biopolymers, bioplastics, PHAs, bacterial polymers. UNESCO Code: 2304.03 - Macromolecular chemistry, composite polymers.

1. Introducción

La producción y consumo de plásticos derivados del petróleo registra un incremento en los últimos años, pasando de una producción mundial de 270 millones de toneladas métricas (*Mt*) en el 2010 a 368 *Mt* en el 2019 [1]. Se estima que un 40% de esta producción se destina al embalaje de productos, siendo un material de un solo uso con una vida útil de pocos minutos [2]. Esta situación contribuye con el aumento indiscriminado de residuos plásticos, calculado en 6300 Mt hasta el año 2015 [3]. Un 55% de estos residuos son desechados y al menos unas 8 Mt llegan a los océanos cada año. Esta disposición inadecuada de los residuos plásticos por parte de los generadores, ha traído consecuencias no sólo estéticas, sino también la muerte de distintas especies marinas debido a heridas, asfixia y malformaciones. La basura marina conformada en un 80 % por plástico, está presente en todos los océanos, afectando la cadena trófica hasta llegar a los seres humanos en forma de microplásticos [4,5,6].

Adicionalmente está presente la contaminación atmosférica generada durante la producción global de plásticos y su posterior incineración, en el año 2019 fue equivalente a las emisiones de 189 centrales eléctricas a carbón [7]. Ante esta problemática se han desarrollado alternativas prometedoras de biopolímeros. Uno de estos son los polihidroxialcanoatos (PHAs), que en una de sus definiciones son descritos como poliésteres lineales, renovables y biodegradables [8]. Es una macromolécula biológica, de ácidos grasos sintetizados en muchas bacterias [9], caracterizados por poseer muchas de las propiedades de los siete tipos de petroplásticos más vendidos (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, PA) [10].

Estos poliésteres de nueva generación son prometedores, por sus características de biodegradabilidad, bioabsorbibilidad, hidrofobicidad y biocompatibilidad intrínsecas. Así mismo se caracterizan por tener liberación neutral de carbono en su ciclo de vida al generar CO_2 proveniente de biomasa [11,12,13]. Sin embargo su producción depende del tipo de cultivo y sustratos utilizados, condiciones fisiológicas, procesos de fermentación, métodos empleados para la separación y purificación de los productos finales [14].

Atendiendo a esta premisa se realizó esta revisión, la cual describe los principales bioprocesos realizados para la obtención de estos poliésteres [15]. Asimismo, se centra en exponer los desafíos y las tendencias actuales que existen para la implementación de tecnologías orientadas a disminuir los costos de producción de este biopolímero.

2. Desarrollo

2.1 Metodología

Esta investigación bibliográfica se realizó a través de la revisión de fuentes de información primarias, secundarias y terciarias, priorizando las fuentes primarias con resultados de trabajos experimentales. Se utilizó como motor de búsqueda Google Scholar, empleando como descriptores o palabras claves: biopolímeros y PHA. Se seleccionaron artículos publicados en los últimos 10 años, escritos en idioma inglés o español, e indexados en las bases de datos Redalyc, Latindex, SciELO y Scopus. Se excluyeron trabajos sin validación científica, o de mayor antigüedad.

2.2 Clasificación y propiedades del PHA

Los biopolímeros naturales de acuerdo a su origen se clasifican en animal, vegetal, marino o bacteriano. Entre los de procedencia animal, se encuentran el colágeno y la gelatina. Los polímeros de fuente vegetal, se derivan de plantas o actividades agrícolas, constituidos por lípidos, grasas,

proteínas y polisacáridos. Los de origen marino incluye la quitina y el quitosano, por último los microbianos, son sintetizados por ciertas bacterias utilizando fuentes de carbono y nitrógeno como glucosa y extracto de levadura respectivamente [16,17]. Los PHAs son biopolímeros bacterianos cuyos primeros estudios datan de la década de 1980. Actualmente siguen siendo un tema de investigación importante, sobre todo como sustitutos de los plásticos de origen petroquímico, por ser completamente biodegradables y producirse a partir de fuentes de carbono renovables [18].

Dependiendo de la estructura química, el PHA se divide en dos tipos: los PHA de cadena corta (scl) que contienen 5 o menos carbonos y los de cadena media PHA de longitud (mcl) que poseen 6 a 14 carbonos [19]. El tamaño de cadena es la que le confiere las propiedades físicas, químicas y biológicas del material [20]. La estructura química del PHA tiene un grupo radical(R), del cual dependerán no sólo las características del polímero sino también su nombre (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estructura general de los PHA más conocidos.

N°	R	R Nombre del	
		polímero	
1	Hidrógeno	Poli(3-hidroxipropionato)	PHP
2	Metil	Poli(3-hidroxibutirato)	Р3НВ
3	Hidrógeno	Poli(4-hidroxibutirato)	P4HB
4	Hidrógeno	Poli(5-hidroxivalerato)	P5HV

Fuente: López [21].

En relación a las propiedades de los PHA, son materiales termoplásticos, biocompatibles, biodegradables, enantiómeros puros, no tóxicos con piezoelectricidad, inertes, indefinidamente estables en el aire e insolubles en agua. Sus propiedades pueden variar en función de su composición química. Generalmente la masa molar (MM) de los PHA varía entre 200 y 3000 kDa y depende del microorganismo utilizado, composición de los medios, inóculo, condiciones y modos de fermentación, además de las técnicas de procesamiento posteriores [21]. La longitud de la cadena lateral y su grupo funcional en los monómeros determinan en gran parte propiedades físicas de los PHA, como la temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión, cristalinidad, fuerza de tensión y extensión hasta quiebre (Cuadro 2).

Cuadro 2. Propiedades de los principales PHA.

Parámetro	PHB	РЗНВ	P4HB	P5HV
Temperatura de fusión, °C	177	169	60	79,8
Temperatura de transición vítrea, °C	2	1.9	51	50
Cristalinidad, %	60	59	50	60
Fuerza de tensión, MPa	43	40	50	40
Extensión hasta quiebre, %	5	3	1000	6

Fuente: González et al. [18], Lemos y Mina [22], Misra et al. [23], Quintanar-Gómez et al. [24].

2.3 Aplicaciones del PHA

Una de las principales aplicaciones dadas en la actualidad al PHA es la elaboración de dispositivos médicos como suturas, tornillos, materiales dentales, mallas quirúrgicas, clavijas ortopédicas, implantes óseos y de oídos. Dada la propiedad de piezoelectricidad que posee el PHA, hace que esta sea de gran utilidad en las aplicaciones ortopédicas, contribuyendo en la recuperación de enfermedades como la Osteoporosis, Parkinson y Alzheimer. Asimismo, por la naturaleza intrínseca de los PHA han sido utilizados en la fabricación de nanopartículas y nanocompuestos como agentes antibacterianos y bioingeniería [25].

Recientemente el empleo de PHA para nanoarquitectura se ha convertido en una tendencia emergente entre los investigadores. También pueden ser utilizados como cubierta de materiales tales como papel o cartón para mejorar la resistencia de estos materiales frente al deterioro causado por la humedad. En la agricultura se emplea para la elaboración de tubos de irrigación y matrices para la liberación controlada de insumos tales como herbicidas o plaguicidas, necesarios en los cultivos [22]. Otras investigaciones señalan que los oligómeros PHA se pueden utilizar como en la industria de alimentos [26]. Por su alta resistencia a la tracción, menor fragilidad, propiedades adecuadas de barrera al gas, aroma, luz ultravioleta (UV) y al agua, la biodegradabilidad y el enorme rango de propiedades, han calificado PHA microbianos como competidores prometedores en la fabricación de envases [27].

Las aplicaciones incluyen en general, fabricación de dispositivos médicos, productos de higiene personal y de cuidado de la piel, como películas de acolchado en la agricultura y como envases de plástico. Dadas sus características se convierten en el mejor sustituto en las aplicaciones mencionadas, los cuales son plásticos de un solo uso con alto consumo y por tanto principales responsables en la generación de residuos plásticos [28].

2.4 Procesos de obtención del PHA

La producción de PHA incluye el desarrollo de cepas, optimización de fermentadores de laboratorios y planta piloto, para posteriormente llevarlos a escala industrial. A su vez la producción de cepas microbianas productoras de PHA depende de factores que incluyen, la densidad final alcanzada por los microorganismos, la tasa de crecimiento bacteriano, el porcentaje de PHA. El proceso de producción de PHA empieza con el aislamiento y selección de microorganismos, centrándose en la modificación genética y posteriormente en la fermentación por diferentes condiciones anaeróbicas-aeróbicas para separar, purificar y obtener el PHA (Figura 1).

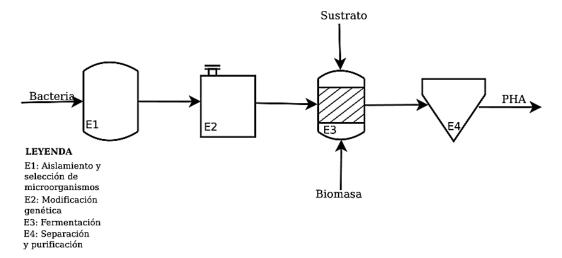


Fig. 1. Proceso de obtención de los PHA. **Fuente:** Calero [29], Dutt Tripathi et al. [30], Montoya et al. [31].

Se reportan más de 300 bacterias y arqueas que producen PHAs, las cuales se clasifican en dos grupos: asociadas o no asociadas al crecimiento. En el primer grupo, se necesitan condiciones de estrés para el crecimiento de las bacterias, limitación de nutrientes como el nitrógeno y carbono en exceso. Entre ellas se encuentran *Pseudomonas oleovorans* y *Cupriavidus necator*. En el segundo

grupo el PHA se acumula directamente en la fase de crecimiento. Dentro de esta clasificación están la Escherichia coli, Alcaligenes latus, Azotobacter vinelendii y Actinobacillus sp EL-9 [30].

Por otra parte, para la obtención de PHA se necesita el crecimiento de la cepa en un reactor, donde la flora microbiana se somete a un proceso de selección y modificación genética para conseguir un producto de interés que alcance los máximos niveles de reserva del polímero. El sustrato utilizado en el proceso de fermentación es comúnmente un residuo agroindustrial, ya que contiene la materia prima necesaria para transformarlo y ser contenido de reservas para los microorganismos genéticamente utilizados en la obtención de PHAs [29]. Las bacterias en combinación con los sustratos son capaces de producir una gran cantidad de PHA. Las bacterias, sustratos y método de extracción más interesantes involucrados en la producción de PHA se resumen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Bacterias comúnmente utilizadas para la producción de PHA.

Bacteria	Sustrato	Métodos de extracción	Productividad	Fuente
Bacillus	Almidón	Convencional	10 a 70 %	[32]
Fototrófica morada	Agua residual	Fotobioreactores- escalalaboratorio	85%	[33]
Azoarcous	Agua residual	Reactores biológicos de secuencia	9,257g/g	[34]
Halófilas nativas	Almidón de cáscaras de Solanum tuberosum L.	Birreactores tipo tanque con sistema discontinuo y flujo de airedescendente	0,144 g/g le corresponde 10g.L-1 de almidón	[34]
Bacteria Azospirillum sp.155	Asparagos officinalis L.	Reactores biológico	0,767 g/g	[35]
Haloferax mediterranei	Biomasa de microalga	Reactor por lote	3,8 g/g	[36]
Ulva sp	Macroalga verdes	Reactores	61 % (p/p)	[37]
Bacillus cereus	Desechos alimenticio	Reactores	0,42 g/l	[38]
Synechococcus elongatus cscB y Pseudomonas putida cscAB	Microalgas	Fotobiorreactor	150 mg/l	[39]
Ralstonia eutropha	Harina de yuca	Reactores biológicos	0,62 g/l	[40]
Ralstonia eutropha	Paja de arroz	Reactor con agitación	4.76 g/l	[41]
Zoogloea	Las aguas residuales de lasbodegas de arroz	Reactores con un OLR	0.23 g/g	[42]
Cepas recombinantes de E. coli	Sacarosa	Fermentaciones por lotes	0.93 g/l	[43]
Aspergillus niger , Saccharomyces cerevisiae L2612, Acetobacter orientalis y Pseudomonas putida KT2440- acs	Almidón	Ciclo de fermentación corto	16,67 mg/g	[44]

Comercialmente, se reporta a nivel mundial la existencia de 24 empresas que se dedican a la producción y aplicaciones de PHAs [45]. Entre las empresas pioneras de producción en el mundo está Biopolímero de Tianan, una empresa Asiática con una capacidad anual de 2000 *Mt* en la que abastece su producción del PHAs con aplicaciones termoplásticas: moldeo por inyección, extrusión, termoformado, películas sopladas. NaturePlast por su parte es el único distribuidor de Europa de todos los bioplásticos producidos en el mundo.

En Latinoamérica se reportan algunas experiencias a nivel de planta piloto. En Colombia se encuentran Biopolab Ltda y el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con una planta piloto cuya capacidad es de 2000 litros [46]. En el caso de Ecuador, al igual que algunos países del continente Americano, no presenta avances significativos en la orientación y producción de PHA en comparación con los países Europeo y Asiático. En el último año se han desarrollado avances a escalas de laboratorio, a través del aislamiento de bacterias productoras de PHAs en aguas residuales provenientes de dos (2) industrias lácteas, mostrando resultados significativos porque tiene un impacto a nivel de conservación y sustentabilidad.

2.5 Tendencias y desafíos en la producción de PHA

El principal desafío de los PHAs está asociado a los altos costos de producción que acarrea en relación a los plásticos sintéticos. Por tanto se requieren alternativas de fermentación de bajo costo, nuevas estrategias de producción y etapas de purificación [30]. A escala industrial, el costo de producción se puede reducir con el desarrollo de nuevas cepas capaces de producir grandes cantidades de PHAs [47]. El uso optimizado de consorcios microbianos mixtos para la biosíntesis de PHAs, es una alternativa para producir el biopolímero con alta productividad y bajos costos. Estas opciones reducen las demandas de esterilidad, requisitos para equipos y dispositivos de control y brinda la posibilidad de utilizar materias primas complejas y económicas, como efluentes carbonosos de origen doméstico o industrial [48].

Las cepas recombinantes de *E. coli* modificada es otra opción que se pueden utilizar para biorrefinería rentable para la producción de polihidroxialcanoatos a partir de sacarosa, la cual es una fuente de carbono abundante y económica [49]. Otra alternativa es el uso de cianobacterias que generalmente crecen en modo fotoautótrofo; sin embargo, muchas de estas cepas de también pueden exhibir un crecimiento mixotrófico que aumenta el rendimiento de biomasa así como el potencial de acumulación de PHAs [50]. El uso de fuentes de carbono renovables basadas en residuos agrícolas o industriales, y el desarrollo de los procesos que requieren una menor inversión pueden contribuir a reduciendo los costos de producción. El rendimiento por sustrato consumido es menor en condiciones anóxicas que en condiciones aeróbicas. Por lo tanto, rutas de síntesis alternativas, empleando se requieren sustratos de carbonomás baratos [51].

La utilización de residuos con alto contenido de ácidos grasos volátiles, es otra alternativa para producir el bioplástico de una manera más económica [52,53]. Entre estos tipos de residuos se encuentran los de origen alimenticio, los cuales alcanzan anualmente 1.300 millones de toneladas a nivel mundial y generan un impacto ambiental negativo, si se gestionan de manera incorrecta [19]. El suero de la leche, por ejemplo, es un subproducto del proceso de fabricación de queso, compuesto por lactosa, proteínas, grasas, vitaminas solubles en agua, sales minerales y otros nutrientes esenciales para el crecimiento microbiano, que no requiere un pretratamiento extenso para su uso en la fermentación mediante hidrólisis química o enzimática. Los residuos con contenido de almidón, aceite, así como los lignocelulosos tales como el bagazo de la caña de azúcar, paja de arroz, paja de trigo y salvado, son fuentes ricas de carbono para utilizarlos como sustratos [54].

Sin embargo el uso de las corrientes residuales tiene algunas limitaciones. En el caso del suero de leche se asocian altos requisitos de energía para el proceso de fermentación y una baja cantidad

de producción de PHAs por kg de entrada de suero. En los materiales lignocelulosos, se encuentran los costos asociados por el pretratamiento para la extracción de azúcares fermentables y posterior desintoxicación, para eliminar los compuestos inhibidores producidos durante la hidrólisis. Por su parte, los aceites son agentes espumantes natural, requiriendo la adición de otros aceites vegetales que sirvan tanto de fuentes de carbono como agentes antiespumantes [54].

La glucosa y/o los ácidos grasos se utilizan habitualmente como sustratos para la síntesis de PHAs. Por ejemplo, la formación de PHAs que consiste en monómeros que no son 3-hidroxubutirato (3HB) necesita ácidos grasos como precursores para la formación de otros monómeros de cadena corta (scl) o de cadena media (mcl). Las células llevarán a cabo la β -oxidación para convertir la mayoría de los ácidos grasos en *acetil-CoA* para el crecimiento celular, los costosos ácidos grasos se desperdician para generar *acetil-CoA* pero no para la síntesis de mcl, mientras que la *acetil-CoA* también se puede generar a partir de sustratos más baratos como la glucosa. Debido a la β -oxidación, la conversión de ácidos grasos a PHA es muy ineficaz, lo que conduce al alto costo de producción de mcl PHAs. Por lo tanto, la ingeniería de la β -oxidación podría ayudar a mejorar la eficiencia del PHAs [49].

Otra metodología común en el proceso de producción de PHAs, es mejorar el proceso de fermentación y recuperación existente para ganar valor a través de la salida de bajo costo. En los últimos años se han descubierto mejores técnicas de fermentación y termo separación, purificación y recuperación que depende de muchos factores como el tipo de célula, la composición del medio de crecimiento, el pH, la presión y la viabilidad del proceso [55,56]. El uso de halófilo disminuye los costos en la etapa de fermentación y recuperación, convirtiéndola en una alternativa prometedora y sostenible porque es más rentable su utilización [57]. Otras fuentes indican que el rendimiento es mayor si se utiliza más tiempo en la preparación del sustrato [58].

Todas estas limitaciones afectan la producción a escala industrial de los PHAs y por ende su comercialización [59]. Sin embargo, su fabricación ofrece un potencial para recuperar recursos valiosos de desechos orgánicos y reducciones considerables en nuestra dependencia de los combustibles fósiles y en los impactos ambientales de los desechos plásticos [60,61]. Por otro lado, los polihidroxialcanoatos son buenos candidatos para la fabricación de elementos rígidos con alta rotación, así como también de empaques de un solo uso como envases de alimentos, además de productos farmacéuticos, cosméticos, tapas, botellas plásticas, entre otros [31].

3. Conclusiones

Los PHAs son biopolímeros cuyas características lo convierten en una alternativa de reemplazo para los plásticos sintéticos. La revisión realizada expone las múltiples aplicaciones que tiene este bioplástico estando entre ellas su uso como material de embalaje. Aunque es un material capaz de competir con sus parientes sintéticos, aún es tema de investigación los parámetros del proceso de fabricación a escala industrial, para que sea tanto económico como ambientalmente sostenible. Una de las alternativas propuestas para tal fin, es la utilización de residuos agrícolas como sustrato, brindando la oportunidad de hacer un uso sostenible de las corrientes de desechos, al tiempo que se reduce el impacto ambiental actual que generan. Sin embargo, durante su selección se deben tener en cuenta las limitaciones que presentan, a fin de reducir los costos asociados a pretratamiento y purificación. Finalmente se deben considerar las etapas de selección del microorganismo o consorcio microbiano a emplear en la producción del PHA, además de las condiciones de fermentación del proceso, para asegurar el éxito en la producción de este bioplástico.

Referencias

- [1] Statista. Producción de plástico a nivel mundial de 1950 a 2019, 2021, https://es.statista.com/estadisticas/636183/produccion-mundial-de-plastico/
- [2] Y. Chen, A. Kumar Awasthi, F. Wei, Q. Tan, J. Li. Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts, Science of The Total Environment, 752:141772, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772
- [3] R. Geyer; J. R. Jambeck; K. Lavender Law. Production, use, and fate of all plastics ever made, Science Advances. 3(7): e1700782, 2017. Disponible: https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
- [4] J. Hansen; J. Melchiorsen; N. Ciacotich; L. Gram; E. Sonnenschein. Effect of polymer type on the colonization of plastic pellets by marine bacteria, FEMS Microbiol. Lett. 368(5): 1-9, 2021. https://doi.org/10.1093/femsle/fnab026
- [5] A. Sánchez. Antiplastic, Trabajo final de grado. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2019. https://riunet.upv.es/handle/10251/148169
- [6] M. Jaén; P. Esteve; I. Banos. Los futuros maestros ante el problema de la contaminación de los mares por plásticos y el consumo, Rev. Eureka sobre Enseñanza y Divulg. las Ciencias, 16(1): 1–17, 2019. https://doi.org/10.25267/RevEurekaensendivulgcienc.2019.v16.i1.1501
- [7] National Geograpic. 20 datos sobre el problema del plástico en el mundo, 2020. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/20-datos-sobre-problema-plastico-mundo 15282
- [8] S.K. Bhatia; S.B. Otari; J-M. Jeon; R. Gurav; Y-K. Choi; R.K. Bhatia; A. Pugazhendhi; V. Kumar; J.R. Banu; J-J. Yoon; K-Y. Choi; Y-H. Yang. Biowaste-to-bioplastic (polyhydroxyalkanoates): Conversion technologies, strategies, challenges, and perspective, Bioresour. Technol., 326:124733, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124733
- [9] G. Madhusoodanan; S. Selvaraj; S. Kuthethur; R. Hariharapura; D. Mysore. Steering of *β* oxidation intermediates to polyhydroxyalkanoate copolymer biosynthesis by fatty acids and inhibitors using Taguchi design, Int. J. Environ. Sci. Technol., 17: 2853–2864, 2020. https://doi.org/10.1007/s13762-020-02700-5
- [10] M. Koller; R. Bona; G. Braunegg; C. Hermann; P. Horvat; M. Kroutil; J. Martinz; J. Neto; L. Pereira; P. Varila. Production of polyhydroxyalkanoates from agricultural waste and surplus materials, Biomacromolecules, 6(2): 561–565, 2005. https://doi.org/10.1021/bm049478b
- [11] S. Philip; T. Keshavarz; I. Roy. Polyhydroxyalkanoates: Biodegradable polymers with a range of applications, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 82(3): 233–247, 2007. https://doi.org/10.1002/jctb.1667
- [12] J.C. Lan; C.Y. Yeh; C.C. Wang; Y.H. Yang; H.S. Wu. Partition separation and characterization of the polyhydroxyalkanoates synthase produced from recombinant Escherichia coli using an aqueous two-phase system, J. Biosci. Bioeng., 116(4): 499–505, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.04.010
- [13] N. Khan; N. Jamil. Biosynthesis of poly-3-hydroxybutyrate by Rhodococcus pyridinivorans using unrelated carbon sources, Adv. Life Sci., 8(2): 128–132, 2021. http://www.als-journal.com/826-21/
- [14] L. Kaur; R. Khajuria; L. Parihar; G.D. Singh. Polyhydroxyalkanoates: Biosynthesis to commercial production- A review, J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci., 6(4): 1098–1106, 2017. Disponible: https://doi.org/10.15414/jmbfs.2017.6.4.1098-1106
- [15] K. Sudesh; H. Abe; Y. Doi. Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: Biological polyesters, Progress in Polymer Science, 25(10): 1503–1555, 2000. https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6
- [16] H.S. Villada; H.A. Acosta; R.J. Velasco. Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables, Temas agrarios, 12(2): 5-13, 2007. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5002436.pdf
- [17] S. Sivakanthan; S. Rajendran; A. Gamage; T. Madhujith; S. Mani. Antioxidant and antimicrobial applications of biopolymers: A review, Food Res. Int., 136: 109327, 2020. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109327

- [18] Y. González; J. Meza; O. González; J. Córdova. Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: Plásticos de origen microbiano, Rev. Int. Contam. Ambient. 29(1), 77–115, 2013. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000100007
- [19] E. Martínez; C. Saavedra; L. Palacios; O. Tovar; G. Roja. Identificación molecular y bioquímica de una cepa productora de Polihidroxialcanoatos (PHAs) y evaluación de su producción bajo distintas fuentes de carbono. IV Simposio Nacional de Ciencias Farmacéuticas y Biomedicina II Simposio Nacional de Microbiología Aplicada. Pág 24, México, 2018. https://rcfb.uanl.mx/index.php/rcfb/article/view/94/90
- [20] Y.F. Tsang; V. Kumar; P. Samadar; Y. Yang; J. Lee; Y.S. Ok; H. Song; K.H. Kim; E.E. Kwon; Y.J. Jeon. Production of bioplastic through food waste valorization, Environ. Int., 127: 625–644, 2019. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.076
- [21] B.L. López. Optimización de la producción de polihidroxialcanoato (PHA) por brevibacterium halotolerans empleando suero de leche derivado de la producción de queso como sustrato. Trabajo de grado para optar al título de Maestría en Ciencias con orientación en Microbiología Aplicada. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 2017. http://eprints.uanl.mx/16032/
- [22] A.C. Lemos; A. Mina. Polihidroxialcanoatos (PHA's) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial, Informador Técnico, 79(1):83-101, 2015. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/139
- [23] S. Misra; S. Nazhat; S. Valappil; M. Moshrefi-Torbati; R. Wood; I. Roy; A. Boccaccini.Fabrication and Characterization of Biodegradable Poly(3-hydroxybutyrate) Composite Containing Bioglass, Biomacromolecules, 8(7): 2112-2119, 2007. https://doi.org/10.1021/bm0701954
- [24] S. Quintanar-Gómez; A. Abreu-Corona; E. Zamudio-Pérez; G. Vargas-Hernández; A. Téllez-Jurado; J. Gracida-Rodríguez. Production of medium chain length polyhydroxyalkanoates from Cupriavidus necator with beeswax hydrolyzates as carbon source, Contaminación ambiental, 34(3): 467-474, 2018. https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.03.09
- [25] R. Tarrahi; Z. Fathi; Ö. Seydibeyoğlu; E. Doustkhah; A. Khataee. Polyhydroxyalkanoates (PHA): From production to nanoarchitecture. Int. J. Biol. Macromol., 146(1): 596–619, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.181
- [26] H. Pakalapati; C. Chang; P.L. Show; S.K. Arumugasamy; J.C.W. Lan. Development of polyhydroxyalkanoates production from waste feedstocks and applications, J. Biosci. Bioeng. 126(3): 282–292, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.03.016
- [27] N. Israni; S. Shivakumar. Polyhydroxyalkanoates in packaging. In V. Kalia (eds) Biotechnological Applications of Polyhydroxyalkanoates, Singapore, 363-388, 2019, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3759-8 14
- [28] R.A. Ilyas; S.M. Sapuan; A. Kadier; M.S. Kalil; R. Ibrahim; M.S.N. Atikah; N.M. Nurazzi; A. Nazrin; C.H. Lee, M.N. Faiz Norrrahim; N.H. Sari; E. Syafri; H. Abral; L. Jasmani; M.I.J. Ibrahim. Properties and Characterization of PLA, PHA, and other types of biopolymer composites. In: Faris M. Al-Oqla, S.M. Sapuan (eds) Advanced Processing, Properties, and Applications of Starch and Other Bio-Based Polymers, 111-138, 2020 https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819661-8.00008-1
- [29] R. Calero. Obtención de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de cultivos mixtos microbianos usando efluentes ricos en ácidos grasos volátiles como sustrato, Revista Científica y Tecnológica UPSE, 2(1), 2014. https://doi.org/10.26423/rctu.v2i1.36
- [30] A. Dutt Tripathi; V. Paul, A. Agarwal, R. Sharma, F. Hashempour-Baltork, L. Rashidi, K. Khosravi Darani. Production of polyhydroxyalkanoates using dairy processing waste A review, Bioresource Technology, 326:124735, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124735
- [31] D. Montoya Castaño; N. Moreno Sarmiento; A. Espinoza Hernández; G. Buitrago Hurtado; F. Aristizábal Gutiérrez; M. Bernal Morales; I.A. García Romero. Grupo de bioprocesos y bioprospección, Revista Colombiana de Biotecnología. 1(1): 14-19, 2017. https://www.redalyc.org/pdf/776/77653191003.pdf
- [32] L. De Donno; S. Moreno; E. Rene. Polyhydroxyalkanoate (PHA) production via resource recovery from industrial waste streams: A review of techniques and perspectives, Bioresour. Technol, 331:124985, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124985

- [33] C. García-Reyna; V. Almaguer; E. Martínez; G. Rojas; E. Aleman. Efecto de diferentes condiciones de cultivo en la producción y rendimiento de polímeros biodegradables por una cepa nativa del genero Bacillus. VI Simposio Nacional de Ciencias Farmacéuticas y Biomedicina IV Simposio Nacional de Microbiología Aplicada. Pág 40-41, México, 2019. https://rcfb.uanl.mx/index.php/rcfb/article/view/247/238
- [34] D. Meng; C. Gong; R. Kumar; D. Dionysiou; Z. Huang; R. Li; Y. Liu, Y. Ji; P.Gu, X. Fan; Q.Li. Production of polyhydroxyalkanoates from propylene oxide saponification wastewater residual sludge using volatile fatty acids and bacterial community succession. Bioresour. Technol., 329:124912, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124912
- [35] L. Altamirano; E. Ramos; S. Iglesias; C. Carreño. Potencialidades de bacterias productoras de polihidroxialcanoatos (PHA) aisladas de Asparagus officinalisL, 2018. https://preprints.scielo.org/index.php/scielo/preprint/view/646/830
- [36] S. Ghosh; R. Gnaim; S. Greiserman; L. Fadeev; M. Gozin; A. Golberg. Macroalgal biomass subcritical hydrolysates for the production of polyhydroxyalkanoate (PHA) by Haloferax mediterranei, Bioresour. Technol., 271: 166–173, 2019. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.108.
- [37] R. Gnaim; M. Polikovsky; R. Unis; J. Sheviryov; M. Gozin; A. Golberg. Marine bacteria associated with the green seaweed Ulva sp. for the production of polyhydroxyalkanoates. Bioresour. Technol. 328: 124815, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124815
- [38] P. Wang; X.T. Chen; Y.Q. Qiu; X.F. Liang; M.M. Cheng; Y.J. Wang; L.H. Ren. Production of polyhydroxyalkanoates by halotolerant bacteria with volatile fatty acids from food waste as carbon source. Biotechnology and Applied Biochemistry, 67: 307-316, 2020. https://doi.org/10.1002/bab.1848
- [39] H. Löwe; K. Hobmeier; M. Moos; A. Kremling; K. Pflüger-Grau. Photoautotrophic production of polyhydroxyalkanoates in a synthetic mixed culture of Synechococcus elongatus cscB and Pseudomonas putida cscAB, Biotechnol. Biofuels, 10: 190, 2017. https://doi.org/10.1186/s13068-017-0875-0
- [40] E. Rojas; J.L. Hoyos; S.A. Mosquera. Producción de polihidroxialcanoatos (PHAs) a partir de Ralstonia eutropha en un medio con harina de yuca como fuente de carbono, Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14(1): 19-26, 2016. https://doi.org/10.18684/BSAA(14)19-26
- [41] J. Aravind; M. Sandhya. Optimization of Media Components for Production of Polyhydroxyalkanoates by Ralstonia eutropha Using Paddy Straw as Cheap Substrate. In: Prashanthi M., Sundaram R., Jeyaseelan A., Kaliannan T. (eds) Bioremediation and Sustainable Technologies for Cleaner Environment. Environmental Science and Engineering, 239-251, 2013 Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48439-6_18
- [42] F. Fang; X. Run-Ze; H. Yan-Qiu; W. Su-Na; Z. Lu-Lu; D. Jin-Yun; X. Wen-Ming; C. Xueming; C. Jia-Shun. Production of polyhydroxyalkanoates and enrichment of associated microbes in bioreactors fed with rice winery wastewater at various organic loading rates. Bioresour. Technol., 292: 121978, 2019. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121978
- [43] Y. Sohn; H. T. Kim; K-A. Baritugo; H.M. Song; M.H. Ryu; K.H. Kang; S. Y. Jo; H. Kim; Y. J. Kim; J. Choi; S.K. Park; J. C. Joo; S. J. Park. Biosynthesis of polyhydroxyalkanoates from sucrose by metabolically engineered Escherichia coli strains, Int. J. Biol. Macromol., 149: 593-599, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.254
- [44] X. Yang; S. Li; X. Jia. A four-microorganism three-step fermentation process for producing medium-chain-length polyhydroxyalkanoate from starch. 3 Biotech, 10(8): 352, 2020. https://doi.org/10.1007/s13205-020-02347-6
- [45] G.Q. Chen. Industrial Production of PHA. In: Chen GQ. (eds) Plastics from Bacteria. Microbiology Monographs, vol 14, 121-132, 2010. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5_6
- [46] A.B. Pillai; H.K. Kumarapillai. Bacterial Polyhydroxyalkanoates: Recent Trends in Production and Applications. In: Shukla P. (eds) Recent advances in Applied Microbiology, 19-53, 2017. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5275-0_2

- [47] A. Arumugam; T.S. Anudakshaini; R. Shruthi; K. Jeyavishnu; S. Sundarra Harini; J.S. Sharad. Low-cost production of PHA using cashew apple (Anacardium occidentale L.) juice as potential substrate: optimization and characterization. Biomass Conv. Bioref. 10: 1167–1178, 2020. https://doi.org/10.1007/s13399-019-00502-5
- [48] M. Koller. A Review on Established and Emerging Fermentation Schemes for Microbial Production of Polyhydroxyalkanoate (PHA) Biopolyesters. Fermentation, 4(2):30, 2018. https://doi.org/10.3390/fermentation4020030
- [49] G.Q. Chen; X. Chen; F. Wu; J. Chen. Polyhydroxyalkanoates (PHA) toward cost competitiveness and functionality, Adv. Ind. Eng. Polym. Res. 3(1): 1–7, 2020. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.001
- [50] A. Singh; N. Mallick. Advances in cyanobacterial polyhydroxyalkanoates production, FEMS Microbiol. Lett., 364(20): fnx189, 2017. https://doi.org/10.1093/femsle/fnx189
- [51] J. Almagro. Aislamiento de bacterias productoras de polihidroxialcanoatos (PHAs) en aguas residuales provenientes de dos industrias lácteas. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería en Procesos Biotecnológicos. Universidad San Francisco de Quito, 2020. https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/8732/1/146089or.pdf
- [52] H. Al-Battashi; S. Al-Kindi; V.K. Gupta; N. Sivakumar. Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production Using Volatile Fatty Acids Derived from the Anaerobic Digestion of Waste Paper, J Polym Environ, 29: 250–259, 2021. https://doi.org/10.1007/s10924-020-01870-0
- [53] S.W. Kariuki; J.W. Muthengia; M.K. Erastus; G.M. Leonard; J.M. Marangu. Characterization of composite material from the copolymerized polyphenolic matrix with treated cassava peels starch, Heliyon, 6(7): e04574, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04574
- [54] C. Nielsen; A. Rahman; A.U. Rehman; M.K. Walsh; C.D. Miller. Food waste conversion to microbial polyhydroxyalkanoates, Microb. Biotechnol., 10(6):1751-7915, 2017. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12776
- [55] S. Y. Lee. Bacterial polyhydroxyalkanoates, Biotechnol. Bioeng., 49(1), 1–14, 1996. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19960105)49:1<1::AID-BIT1>3.0.CO;2-P
- [56] M. Mohammadi; M. A. Hassan; Y. Shirai; H. Che-Man; H. Ariffin; L.N. Yee; T. Mumtaz; M.L. Chong; L.Y. Phang, Separation and Purification of Polyhydroxyalkanoates from Newly Isolated Comamonas sp. EB172 by Simple Digestion with Sodium Hydroxide, Separation Science and Technology, 47(3): 534-541, 2012. https://doi.org/10.1080/01496395.2011.615788
- [57] R. Takahashi; N. Castilho; M. Silva; M.C. Miotto; A. Lima. Prospecting for Marine Bacteria for Polyhydroxyalkanoate Production on Low-Cost Substrates, Bioengineering (Basel, Switzerland), 4(3): 60, 2017. https://doi.org/10.3390/bioengineering4030060
- [58] P.C. Sabapathy; S. Devaraj; A. Parthiban; A. Pugazhendhi; P. Kathirvel. Aegle marmelos: A novel low cost substrate for the synthesis of polyhydroxyalkanoate by Bacillus aerophilus RSL-7. Biocatal. Agric. Biotechnol. 18: 101021, 2019. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101021
- [59] M. Kumar; R. Rathour; R. Singha; Y. Sund; A. Pandey; E. Gnansounouc; A. Kun-Yi; D. C.W. Tsang; I. S. Thaku. Bacterial polyhydroxyalkanoates: Opportunities, challenges, and prospects, J. Clean. Prod., 263.121500, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121500
- [60] Á. Estévez-Alonso; R. Pei; M. Loosdrecht; R. Kleerebezem; A. Werker. Scaling-up microbial community- based polyhydroxyalkanoate production: status and challenges, Bioresource Technology, 327:124790, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124790
- [61] S. Andreasi; A. Boldrin; G. Frenna; T. Astrup. An environmental and economic assessment of bioplastic from urban biowaste. The example of polyhydroxyalkanoate, Bioresour. Technol., 327: 124813, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124813

Sobre los autores

Héctor Fernando Zambrano Castro

Licenciado en Ciencias de la Educación, Mención Química y Biología. Estudiante de la Maestría Profesional en Química, mención Química Ambiental, Instituto de Posgrado. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Correo: hzambrano9175@utm.edu.ec

Perfil en Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?user=9GsViGoAAAAJ&hl=es

Código ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1132-5551

María Antonieta Riera

Ingeniero Industrial. Magister Scientarium en Ingeniera Química. Docente auxiliar en el Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

Correo electrónico: maria.riera@utm.edu.ec

Perfil en Google Scholar: https://scholar.google.es/citations?user=Z_E0KXoAAAAJ&hl=es

Código ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7195-2821

Forma de citar:

H Zambrano Castro y M.A. Riera. Desafío de los polihidroxialcanoatos como solución al problema de los plásticos de un solo uso. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*. 15(1): 15-26, 2021. https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt