

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE POLI(HIDROXIALCANOATO)S A PARTIR DE VINAZA COMO FUENTE DE CARBONO

D. V. Trapé^{1,2}, F. D. Ramos^{1,2}, M. S. Díaz^{1,2}, O. V. López¹, M. A. Villar^{1,2}

¹ Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (UNS-CONICET), Camino La Carrindanga km. 7, (8000) Bahía Blanca, Argentina- dtrape@plapiqui.edu.ar

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS), Av. Alem 1253, (8000) Bahía Blanca, Argentina

ABSTRACT

El objetivo de este trabajo fue determinar la viabilidad económica del proceso de producción de poli(hidroxicanoato)s (PHAs) a partir de vinaza como fuente de carbono. Para tal fin, se empleó una superestructura previamente desarrollada para el diseño óptimo de producción de estos biopolímeros a partir de diferentes cepas microbianas y diversas fuentes de carbono. De acuerdo a los resultados, la alternativa más prometedora es la obtenida a partir de un medio de cultivo con una combinación de vinaza y melaza como fuente de carbono, empleando *Cupriavidus necator* como microorganismo productor. El costo de producción estimado de este biopolímero sería de 2,27 USD/kg, levemente inferior al costo de producción a escala industrial; mientras que el valor presente neto (VPN) sería de 24034 millones de USD con un consumo de energía de 14,29 MJ/kg PHA.

1. INTRODUCCIÓN

En respuesta a los efectos nocivos de los residuos plásticos en el medio ambiente, ha habido un interés considerable en el desarrollo de polímeros biodegradables capaces de descomponerse en CO₂, CH₄, H₂O y biomasa residual (Roohi et al., 2018). Particularmente, los poli(hidroxicanoato)s (PHAs) son sustitutos atractivos de los plásticos petroquímicos convencionales ya que poseen propiedades físicas similares a varios termoplásticos y elastómeros (Mannina et al., 2020). Son sintetizados naturalmente por bacterias en condiciones de crecimiento desequilibradas y se acumulan intracelularmente como compuestos de almacenamiento de energía y carbono (Gonzalez et al., 2021). Aunque han sido reconocidos como buenos candidatos para reemplazar los plásticos petroquímicos convencionales, su alto costo de producción ha limitado su uso. De los costos totales de producción, la fuente de carbono podría representar entre el 70 y el 80 % del gasto total (Carpine et al., 2020). En este sentido, la vinaza, residuo de la industria del alcohol de caña de azúcar, podría utilizarse como sustrato económico para producir PHAs a menor costo. Es un efluente de color oscuro, pH ácido y se generan entre 10 y 16 L por litro de etanol producido, por lo que su disposición representa un serio problema ambiental.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la viabilidad económica del proceso de producción de PHAs a partir de vinaza como fuente de carbono, empleando una superestructura desarrollada previamente por Ramos et al. (2019), suponiendo diferentes escenarios reportados en la literatura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 1 muestra el proceso de producción de PHAs utilizando vinaza como fuente de carbono (Ramos et al., 2019).

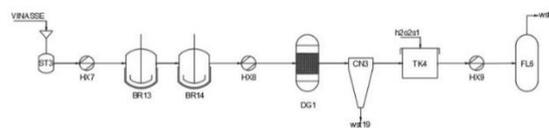


Figura 1. Proceso de producción de PHAs.

El proceso inicia con la esterilización del medio de cultivo en autoclave (ST3) y luego se realiza la fermentación en dos etapas. En la primera etapa tiene lugar el crecimiento de la biomasa (BR13) y en la segunda (BR14) ocurre la producción de PHAs, en donde se impuso una limitación de nutrientes para incrementar la producción del biopolímero. Para la recuperación del PHA se realiza una digestión enzimática la cual comienza con un tratamiento térmico a 85 °C (HX8). Luego ingresa al digestor (DG1) donde se lleva a cabo la lisis de la membrana celular mediante la enzima pancreatina en una concentración del 2 % p/p. Se asume que este proceso es capaz de extraer el 90 % del biopolímero acumulado intracelularmente. La biomasa residual, disuelta en una solución de NaOCl, se retira mediante centrifugación (CN3). La corriente de PHA re-suspendida se trata en un tanque (TK4) con una solución concentrada de H₂O₂ (1,73 % p/p), con una relación en peso de solución a PHA de 3,05:1, para blanquear el polímero. Finalmente, el agua se elimina parcialmente mediante evaporación instantánea (FL6) para obtener una corriente de PHA.

En la Tabla 1 se muestran los diferentes escenarios y los principales parámetros de la biosíntesis de PHAs contemplados en este análisis económico.

Tabla 1. Principales parámetros de la biosíntesis de PHAs.

Escenario	Bacteria	Fuente de Carbono	$Y_{p/s}$	PHA (%)	Referencia
1	<i>B. megaterium</i>	10 % vinaza cruda	0,26	25,5	(Trapé et al., 2019)
2	<i>C. necátor</i>	Vinaza	0,34	15	(Zanfonato et al., 2018)
3	<i>H. marismortui</i>	Vinaza pretratada	0,32	30	(Pramanik et al., 2012)
4	<i>C. necátor</i>	Vinaza-melaza	0,25	58	(Dalsasso et al., 2019)
5	<i>C. necátor</i>	Vinaza-melaza	0,17	69	(Acosta et al., 2018)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de los diferentes escenarios se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del modelo para la producción de PHAs.

Escenario	VPN (MM USD)	Inversión (USD)	PHA Cost (USD/kg PHA)	Consumo energía (MJ/kg)
1	-5500	12,1 10 ⁶	3,02	17,6
2	-5245	11,5 10 ⁶	3,02	21,0
3	-5083	19,2 10 ⁶	3,02	16,2
4	13307	11,7 10 ⁶	2,56	13,8
5	24034	13,4 10 ⁶	2,27	14,3

A partir del modelo se pudo determinar el costo de producción de PHAs, el cual varió entre 2,27 y 3,02 USD según el escenario. El escenario 5 presentó el menor costo de producción el cual fue de 2,27 USD/kg. Este valor es levemente menor respecto al costo de los PHAs obtenidos industrialmente en plantas de igual capacidad a la planteada en el modelo (10000 tn/año), cuyo valor está en el rango de 2,97-3,91 USD (Jimenez, 2011). El valor de la inversión varió de 11,7 a 19,2 millones de dólares de acuerdo al escenario. Este valor es superior a las alternativas actuales para la disposición de la vinaza tales como la concentración de vinaza con una inversión inicial de 4 millones de dólares, la digestión anaeróbica para la producción de gas renovable cuya inversión inicial es de 8,1 millones y la producción de energía eléctrica a partir del biogás producido cuya inversión requerida es de 7,8 millones (de Abreu et al., 2019). El consumo de energía varió entre 13,8 y 21 MJ/kg PHA. Estos valores son comparables con los valores disponibles en la literatura. Lopez-Arenas et al., (2017) informó un consumo de 10,1 MJ/kg para una planta de capacidad de 1000 tn/año que utiliza sacarosa como fuente de carbono. Por otro lado, Leong et al. (2017) reportaron un mayor consumo de energía de 32 MJ/kg utilizando un sustrato más complejo como el glicerol. El valor presente neto (VPN) es el valor de todos los flujos de efectivo futuros (positivos y negativos) durante toda la vida útil de una inversión descontados al presente. Como se puede observar, varios valores de VPN fueron negativos, indicando que no se están obteniendo beneficios y por lo tanto no cumplen con las expectativas del proyecto de inversión. El valor negativo puede atribuirse a valores bajos de

acumulación y rendimiento de PHAs. Además, la elección del microorganismo sería otro factor a tener en cuenta a la hora de diseñar un proyecto de producción de PHAs. Para los escenarios 4 y 5 se obtuvieron VPN positivos, siendo el escenario 5 el que presentó el mayor VPN de 24034 MM USD.

4. CONCLUSIÓN

La acumulación de PHAs por el microorganismo es fundamental para que el proceso de producción a partir de vinaza sea viable. Las alternativas estudiadas tienen una inversión inicial superior a las existentes, sin embargo el uso de vinaza para la producción de PHAs generaría un beneficio económico ya que se trataría un residuo y se obtendría un producto de alto valor agregado. La alternativa más prometedora, cuyo VPN sería de 24034 MM USD, es la obtenida a partir de un medio de cultivo de vinaza y melaza como fuente de carbono, empleando *C. necátor*.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Cárdenas, A., Alcaraz-zapata, W., Cardona-betancur, M., 2018. Sugarcane molasses and vinasse as a substrate for polyhydroxyalkanoates (PHA) production. *Revistas.Unal.Edu.Co* 85, 220–225.
- Carpine, R., Olivieri, G., Hellingwerf, K.J., Pollio, A., Marzocchella, A., 2020. Industrial production of poly-β-hydroxybutyrate from CO₂: Can cyanobacteria meet this challenge? *Processes* 8,1–23.
- Dalsasso, R.R., Pavan, F.A., Bordignon, S.E., Aragão, G.M.F. de, Poletto, P., 2019. Polyhydroxybutyrate (PHB) production by *Cupriavidus necator* from sugarcane vinasse and molasses as mixed substrate. *Process Biochem.* 85, 12–18.
- de Abreu, F.V., Gaya de Figueiredo, M.A., Alberton, A.L., 2019. The Weight of Environment Aspect in the Choice of Vinasse Processing with New Technology through Economic Assessment. *J. Environ. Sci. Eng. A* 8, 113–129.
- Gonzalez, K., Navia, R., Liu, S., Cea, M., 2021. Biological Approaches in Polyhydroxyalkanoates Recovery. *Curr. Microbiol.* 78.
- Jimenez, J.A.L., 2011. Biopolímeros de interés industrial. Síntesis y caracterización de (PHB). Universidad Nacional del Sur.
- Leong, Y.K., Show, P.L., Lan, J.C.W., Loh, H.S., Lam, H.L., Ling, T.C., 2017. Economic and environmental analysis of PHAs production process. *Clean Technol. Environ. Policy* 19, 1941–1953. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1377-2>
- Lopez-Arenas, T., González-Contreras, M., Anaya-Reza, O., Sales-Cruz, M., 2017. Analysis of the fermentation strategy and its impact on the economics of the production process of PHB (polyhydroxybutyrate). *Comput. Chem. Eng.* 107, 140–150.
- Mannina, G., Presti, D., Montiel-Jarillo, G., Carrera, J., Suárez-Ojeda, M.E., 2020. Recovery of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from wastewater: A review. *Bioresour. Technol.* 297, 122478.
- Pramanik, A., Mitra, A., Arumugam, M., Bhattacharyya, A., Sadhukhan, S., Ray, A., Haldar, S., Mukhopadhyay, U.K., Mukherjee, J., 2012. Utilization of vinasse for the production of PHB by *Haloarcula marismortui*. *Folia Microbiol.* 57, 71–79.
- Ramos, F.D., Delpino, C.A., Villar, M.A., Diaz, M.S., 2019. Design and optimization of poly(hydroxyalkanoate)s production plants using alternative substrates. *Bioresour. Technol.* 289.
- Roohi, Zaheer, M.R., Kuddus, M., 2018. PHB and its enzymatic degradation. *Polym. Adv. Technol.* 29, 30–40.
- Trapé, D.V., López, O.V., Villar, M.A. Producción de poli(hidroxibutirato) utilizando vinaza como fuente de carbono: optimización del medio de cultivo, in: Simposio Argentino de Polímeros. Buenos Aires, Argentina, 2019.
- Zanfonato, K., Schmidt, M., Quines, L.K., Gai, C.S., Schmidell, W., Maria, G., Aragão, F. De, 2018. Can vinasse be used as carbon source for PHB Production by *Cupriavidus necator* DSM 545. *Brazilian J. Chem. Eng.* 35, 901–908.