



ANÁLISIS COMPARATIVO DE CICLO DE VIDA CRADLE-TO-GATE DE LA PRODUCCIÓN DE PHA A PARTIR DE LODOS ACTIVOS MUNICIPALES.

COMPARATIVE CRADLE-TO-GATE LIFE CYCLE ANALYSIS OF PHA PRODUCTION FROM MUNICIPAL ACTIVATED SLUDGE.

Resumen

El presente estudio tuvo como propósito evaluar comparativamente los impactos ambientales asociados a la producción de polihidroxiclcanoatos (PHA) a partir de lodos activados municipales, utilizando dos fuentes de carbono diferenciadas: una basada en ácidos grasos volátiles (AGV) y otra en fenol. La evaluación se realizó mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), bajo un enfoque cradle-to-gate y conforme a las normas ISO 14040 y 14044. El modelado se efectuó en el software SimaPro 10.2.0.3, con la base de datos Ecoinvent 3.9, aplicando el método de evaluación ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Los datos experimentales se escalaron a una unidad funcional de 1 kg de PHA purificado, integrando balances de materia y energía, y considerando los lodos como un residuo sin carga ambiental previa. Los resultados indicaron que la ruta AGV presentó un mejor desempeño ambiental global, con menores impactos en las categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad acuática. En contraste, la ruta Fenol mostró mayores cargas debido al uso de surfactantes sintéticos y al elevado consumo energético en las etapas de purificación.

Se identificaron como puntos críticos (hot spots) comunes el consumo eléctrico y los reactivos de separación del polímero. Se concluye que la valorización de



lodos activados mediante rutas biotecnológicas constituye una alternativa ambientalmente más sostenible frente al uso de sustratos petroquímicos, aportando evidencia técnica para el diseño de procesos circulares de producción de biopolímeros.

Palabras clave

PHA, análisis de ciclo de vida, lodos activados, sostenibilidad ambiental, fenol, ácidos grasos volátiles.

Abstract

This study aimed to comparatively evaluate the environmental impacts associated with the production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from municipal activated sludge, using two different metabolic pathways: one based on volatile fatty acids (VFAs) and the other on phenol as a carbon source. The evaluation was performed using Life Cycle Assessment (LCA) methodology, under a cradle-to-gate approach and in accordance with ISO 14040 and 14044 standards. Modeling was carried out using SimaPro 10.2.0.3 software, with the Ecoinvent 3.9 database, applying the ReCiPe 2016 Midpoint (H) assessment method.

The experimental data were scaled to a functional unit of 1 kg of purified PHA, integrating mass and energy balances, and considering the sludge as a waste product with no prior environmental impact. The results indicated that the AGV route exhibited better overall environmental performance, with lower impacts in the categories of human toxicity and aquatic ecotoxicity. In contrast, the Phenol route showed higher burdens due to the use of synthetic surfactants and high energy consumption in the purification stages.

Electrical consumption and polymer separation reagents were identified as common critical points (hot spots). It is concluded that the valorization of activated



sludge through biotechnological routes constitutes a more environmentally sustainable alternative to the use of petrochemical substrates, providing technical evidence for the design of circular processes for biopolymer production.

Keywords

PHA, life cycle assessment, activated sludge, environmental sustainability, phenol, volatile fatty acids.

Introducción

El uso masivo de plásticos derivados de combustibles fósiles ha generado graves impactos ambientales, económicos y sociales a nivel global.(1) La acumulación de residuos plásticos no biodegradables constituye una amenaza persistente para los ecosistemas, impulsando la búsqueda de alternativas sostenibles como los bioplásticos biodegradables y biocompatibles (2)

Entre ellos, los polihidroxicanoatos (PHA) destacan como una familia de poliésteres bacterianos con propiedades comparables a los plásticos convencionales (3). Sin embargo, su desarrollo industrial enfrenta limitaciones económicas asociadas al uso de sustratos puros y equipos especializados, que incrementan los costos de producción frente a los plásticos derivados del petróleo(4) .

En respuesta, la investigación biotecnológica actual se orienta hacia el aprovechamiento de materias primas de bajo costo y origen residual .(5) En este contexto, los lodos activados provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representan una fuente microbiana y de carbono sostenible, permitiendo transformar un diseño urbano en un recurso de valor agregado (4).



Este estudio se enfoca en dos rutas metabólicas que emplean cultivos microbianos mixtos para la producción de PHA

Ruta basada en ácidos grasos volátiles (AGV): los AGV, generados durante la fermentación anaerobia de lodos primarios, constituyen subproductos ricos en carbono (principalmente ácido acético, propiónico y butírico) que promueven la acumulación intracelular de PHA. En condiciones óptimas, se han reportado acumulaciones de hasta el 86% del peso seco celular (≈ 0.7 g/L de AGV) (6).

Ruta basada en fenol: emplea fenol, un contaminante aromático tóxico de origen industrial, de manera agregada como fuente de carbono para consorcios microbianos aclimatados. Esta alternativa busca la valorización de efluentes industriales peligrosos, alcanzando acumulaciones de PHA entre 55% y 60% del peso seco (7).

Para evaluar ambientalmente ambas rutas y determinar su viabilidad comparativa, se aplica la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a las normas ISO 14040 y 14044. El estudio adopta un enfoque cradle-to-gate, que abarca desde la adquisición de materias primas hasta la obtención de 1 kg de PHA purificado, siguiendo las fases de definición de objetivos, inventario, evaluación de impacto e interpretación (8).

Los lodos activados empleados en los escenarios de Shanghai (China) y PTAR Salitre (Bogotá, Colombia) se consideran residuos sin valor económico, por lo cual no se les asigna carga ambiental previa, en concordancia con el criterio de



residuos sin valorización de la norma ISO 14044 (9). Ya que si se homologaba se sobreestimaba el impacto ambiental. De esta manera, los impactos de su generación pertenecen al sistema original (la PTAR) y no al sistema estudiado. Tampoco se homologaron los lodos con materiales comerciales equivalentes, evitando introducir cargas ambientales ajenas al sistema real (9).

Este enfoque metodológico garantiza la comparabilidad entre ambas rutas, asegurando consistencia en los límites del sistema y transparencia en la interpretación de resultados. En última instancia, el estudio busca aportar evidencia técnica que favorezca la optimización de procesos biotecnológicos de valorización de aguas residuales, contribuyendo al desarrollo de una economía circular y la reducción de impactos ambientales asociados a la producción de plásticos convencionales(6).

Materiales y Métodos

Para el desarrollo de la simulación y la evaluación ambiental fue necesario el uso de herramientas tecnológicas especializadas, entre ellas el software SimaPro 10.2.0.3, proporcionado por la Universidad de Cundinamarca, junto con la base de datos Ecoinvent 3.9, la cual proporcionó una base sólida y confiable para la veracidad y trazabilidad del estudio.

Los datos empleados en la simulación se obtuvieron principalmente a partir de dos estudios experimentales que sirvieron como referencia fundamental para el modelado: *Production of Polyhydroxyalkanoates using Volatile Fatty Acids from Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge*(6) y *Polyhydroxyalkanoates (PHA) production from phenol in an acclimated consortium: Batch study and*



impacts of operational conditions.(7). Estos trabajos suministraron la información base sobre materiales, métodos y condiciones operativas a escala de laboratorio.

Adicionalmente, fue necesario complementar la información mediante la revisión de fuentes bibliográficas especializadas y la homologación de flujos de materia y energía dentro del software, debido a que algunos insumos y procesos no se encontraban de manera exacta en la base de datos.(10) Para ello, se elaboraron hojas de cálculo auxiliares donde se desarrollaron los balances de materia, energía e inventarios de ciclo de vida, asegurando coherencia con los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044.

Metodología

La metodología que se desarrolló corresponde a un análisis comparativo de la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de lodos activos municipales, considerando dos rutas metabólicas diferenciadas, una basada en ácidos grasos volátiles (AGV) y otra en fenol como fuente de carbono.

Ambos procesos se modelaron a partir de ensayos experimentales a escala de laboratorio, los cuales fueron escalados a una producción equivalente a 1 kg de PHA purificado, establecida como unidad funcional del estudio. El escalamiento se realizó considerando los parámetros, volumen base (laboratorio), factor de escala, volumen ajustado y las relaciones de conversión de masa y energía, garantizando la coherencia entre ambos sistemas comparados. **(ver tabla 3 y 4)**

El análisis se llevó a cabo bajo el marco metodológico de las normas ISO 14040 y ISO 14044, aplicando la técnica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con un



enfoque cradle-to-gate, es decir, desde la adquisición de los lodos activados hasta la obtención del PHA purificado.

El propósito central del estudio fue identificar los puntos críticos del proceso (hot spots), (ver figura 2 y 3) determinar las etapas con mayor contribución a los impactos ambientales y establecer una base técnica que permita optimizar los procesos biotecnológicos de valorización de residuos. Los resultados del ACV buscan así servir como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el diseño y mejora de procesos sostenibles de producción de biopolímeros.

Definición del objetivo, alcance y límites del sistema

El objetivo del ACV fue comparar los impactos ambientales asociados a la producción de PHA por dos fuentes de carbono, ácidos grasos volátiles y fenol. El alcance del estudio fue cradle-to-gate, comienza desde la aclimatación de los lodos sin tomar en cuenta el transporte y los procesos internos hasta llegar al PHA purificado.

Según la norma ISO 14044 se toma el flujo de lodos activados como residuo valorizado el cual no contiene impactos ambientales ligados, los límites del sistema incluyeron las etapas de aclimatación del lodo, preparación del medio, fermentación, acumulación celular, recuperación y purificación del PHA.

Análisis de inventario

Se elaboraron balances de materia y energía para cada ruta a partir de los datos experimentales, para ajustar la salida del proceso a 1 kg de PHA pesos seco.



Los flujos fueron clasificados en entradas de materia prima, energía, procesos intermedios y emisiones.

El modelado se realizó en el software SimaPro 10.2.0.3, utilizando la base de datos Ecoinvent 3.9.

Cuando no existía correspondencia directa en la base, se generó una homologación esto sin afectar las cargas ambientales y manteniendo la coherencia química y ambiental del sistema. **(ver tabla 5)**

Evaluación del impacto del ciclo de vida

Para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) se seleccionó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H)(11), por su representatividad en procesos biotecnológicos en las que evalúa consumo energético transformaciones biogeoquímicas, lo cual le da mayor relevancia y validez al estudio.

Las categorías analizadas incluyeron, cambio climático, toxicidad humana, eutrofización, uso de recursos fósiles y terrestres, formación de material particulado y acidificación.

Los resultados fueron expresados en valores normalizados y ponderados, permitiendo la comparación directa entre ambas rutas de producción.

Interpretación de resultados

Con base en los resultados proporcionados por el software SimaPro 10.2.0.3, se efectuó un análisis comparativo integral entre ambas rutas de producción de PHA (a partir de ácidos grasos volátiles y fenol). Este enfoque permitió evidenciar que pequeñas variaciones en los parámetros operacionales o en las condiciones de



los flujos de materia generan diferencias significativas en la representación e intensidad de los impactos ambientales.

Los resultados se examinaron bajo un enfoque comparativo, identificando las rutas críticas (hot spots) con mayor contribución ambiental dentro de cada sistema, de acuerdo con las categorías de impacto definidas por el método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Resultados y Discusión

Con base en la metodología previamente descrita, se obtuvieron los resultados de la simulación comparativa de ambas rutas de producción de PHA en el software SimaPro 10.2.0.3, utilizando la base de datos Ecoinvent y el método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Los resultados se presentan de forma estructurada, abordando primero la validación del inventario de ciclo de vida y posteriormente la comparación de las categorías de impacto, la identificación de puntos críticos del proceso.(hot spot)

Validación del inventario de ciclo de vida (ICV)

El inventario base se construyó partiendo de los datos experimentales reportados en las referencias principales y escalando linealmente los consumos y rendimientos hasta 1 kg de PHA purificado. Para cada etapa (aclimatación, preparación de medio, fermentación, cosecha, extracción y purificación) se modelaron entradas de materia y energía y salidas (biomasa, efluentes, PHA crudo). Los insumos puntuales (SDS, surfactante, sales, electricidad, agua) se vincularon a datasets de Ecoinvent o se definieron flujos personalizados cuando fue necesario



La construcción del inventario final se organizó en dos tablas principales que recogen, para cada proceso modelado, los flujos asociados: (i) nombre del proceso utilizado en SimaPro; (ii) flujos implicados (entradas/salidas); (iii) dirección del flujo (entrada/salida); (iv) cantidad del insumo escalada a la unidad funcional; y (v) unidad de medida utilizada en el software. Ambas tablas están normalizadas a la unidad funcional de 1 kg de PHA purificado, aplicando el factor de escala derivado del rendimiento experimental reportado en los estudios de referencia. **(ver tabla 1 y 2)**

Durante la depuración se llevó a cabo una homologación sistemática de compuestos cuando no se halló una correspondencia exacta en la base de datos. La homogeneización se realizó por equivalencia estequiométrica y/o por contenido del elemento funcional (p. ej. Fe, P), aplicando factores de corrección calculados para igualar la capacidad funcional del compuesto sustituto. Como ejemplos representativos: el fluido fosfato monopotásico (KH_2PO_4) fue sustituido por *phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution* ajustando masa molar mediante un factor de 0.72; y el $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ fue sustituido por *Iron(II) chloride {GLO} | market for iron chloride | Cut-off, S*, aplicando un factor de corrección de 0.456 para equiparar el contenido efectivo de Fe^{2+} . Estos factores y su justificación química quedan documentados en las hojas de cálculo anexas. **(ver tabla 3)**

Para garantizar la consistencia del inventario se realizaron las siguientes comprobaciones de calidad: (a) verificación de la aplicación uniforme de la unidad funcional en todos los procesos; (b) cierre de balances de masa principales (C y materia seca) en las etapas críticas; (c) trazabilidad de cada sustitución al dataset Ecoinvent 3.9 empleado (ID y versión); (d) revisión de



unidades y conversiones molares; y (e) estandarización de la red eléctrica y otros insumos agrupados para mantener comparabilidad entre rutas. Los flujos marcados como estimados o sustituidos han sido etiquetados en las tablas para facilitar la trazabilidad.

Límites del sistema

El lodo activado proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se consideró un residuo sin valorización económica, conforme al criterio establecido en la ISO 14044 sección 4.3.3.1.2 para subproductos o residuos de procesos previos. Por tanto, no se le asignaron cargas ambientales previas, ya que los impactos asociados a su generación corresponden al sistema original (tratamiento de aguas residuales) y no al sistema analizado (producción de PHA). Su incorporación al proceso representa una valorización ambiental posterior, y no un consumo de materia prima convencional. **(ver figura 1)**

De igual manera, el transporte del lodo fue excluido del límite del sistema bajo el supuesto de uso local del residuo dentro de la misma instalación o en su área inmediata, tal como se describe en los estudios de referencia (Zhang et al., 2018; Wusiman et al., 2016). Esta exclusión evita sobrecargar el sistema con impactos ajenos al proceso productivo principal y se justifica metodológicamente en el marco del enfoque *cradle-to-gate*, el cual abarca únicamente las etapas comprendidas entre la adquisición del residuo y la obtención del PHA purificado. Estas decisiones de corte no alteran la comparabilidad entre las dos rutas metabólicas (fenol y AGV), ya que ambas parten del mismo tipo de residuo y aplican los mismos criterios de exclusión, manteniendo así la equivalencia funcional y la coherencia metodológica del estudio.

Comparación de impactos por categorías (ReCiPe 2016 Midpoint H)



Al analizar las gráficas comparativas, se observa que las categorías de impacto más relevantes en ambas rutas son:

- Toxicidad humana (cancerígena y no cancerígena)
- Ecotoxicidad acuática (marina y continental)
- Consumo de recursos fósiles y energéticos

En la ruta PHA-Fenol, las categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad presentan los valores más altos, representando la mayor carga ambiental total del sistema. Esto se debe principalmente al uso de fenol como fuente de carbono un compuesto aromático con elevada toxicidad intrínseca, y al empleo de surfactantes sintéticos como el Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) y el Alquilbenceno sulfonato, utilizados en la fase de purificación del polímero.

Además, el consumo eléctrico asociado a la centrifugación, aireación y secado del PHA crudo contribuye de manera significativa al impacto total en categorías como potencial de cambio climático y formación de material particulado.

Por otro lado, la ruta PHA-AGV muestra una reducción considerable en la mayoría de las categorías evaluadas. Los impactos se concentran principalmente en el consumo energético del proceso y en la gestión de los reactivos usados en la purificación, pero la ausencia de fenoles y compuestos aromáticos disminuye notablemente los efectos sobre la toxicidad humana y los ecosistemas acuáticos.

Esto indica que la utilización de ácidos grasos volátiles derivados de lodos activados como fuente de carbono genera un sistema ambientalmente más sostenible, al integrar la valorización de un residuo y evitar el uso de sustratos petroquímicos.



La comparación entre ambas rutas demuestra que, aunque las etapas finales de purificación y secado dominan el perfil ambiental de las dos alternativas, la naturaleza del sustrato de carbono define el comportamiento global del sistema. La ruta AGV resulta más favorable al presentar impactos totales menores en la mayoría de las categorías ReCiPe, mientras que la ruta Fenol exhibe mayores cargas debido a la toxicidad de los compuestos empleados y a la intensidad energética de su purificación.

En síntesis, la ruta basada en AGV se perfila como la opción con mejor desempeño ambiental, especialmente en las categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad, mientras que la ruta Fenol evidencia limitaciones inherentes al uso de sustancias químicas peligrosas, lo que restringe su potencial de escalabilidad industrial bajo criterios de sostenibilidad.

Identificación de rutas críticas o “hot spots”

El análisis de ciclo de vida cradle-to-gate muestra que ambas rutas (fenol y AGV) presentan perfiles ambientales distintos, influenciados principalmente por la naturaleza del sustrato de carbono y el consumo energético asociado a la operación del sistema.

En ambos casos, la unidad funcional se definió como 1 kg de PHA purificado, permitiendo una comparación directa entre procesos.

Rutas críticas y principales contribuyentes (hot spots)

Ruta AGV:

El diagrama de árbol evidencia una mayor complejidad en las etapas del proceso, con varios flujos energéticos y materiales.

Los puntos críticos identificados corresponden principalmente a:



- Consumo eléctrico en operaciones de agitación y aireación (etapas de fermentación y purificación).
- Producción de surfactantes (SDS, Alkylbenzene sulfonate), que aporta significativamente en categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad acuática.
- Uso de agua ultrapura, que genera impactos relevantes en escasez hídrica y consumo de recursos.
- La etapa de obtención de AGV desde los lodos primarios también contribuye a la carga energética del sistema, aunque parte del impacto se atenúa al considerar el lodo como residuo sin carga ambiental (según ISO 14044).

Ruta Fenol:

Este sistema presenta una estructura más lineal y un número menor de flujos, reflejando una simplificación experimental.

Los principales hot spots se concentran en:

Consumo eléctrico durante la extracción y purificación del polímero.

Uso de SDS al 20 %, con influencia directa en categorías de toxicidad humana no cancerígena y eutrofización.

El fenol como fuente de carbono, aunque se considera contaminante y su valorización reduce el impacto neto, genera potencial de toxicidad en fases tempranas del proceso si se considerara su síntesis industrial.

Categorías de impacto ambiental

Según los resultados del método ReCiPe 2016 Midpoint (H):



La toxicidad humana cancerígena representa la categoría dominante en ambas rutas, particularmente en la de fenol, debido a los compuestos aromáticos involucrados y los surfactantes empleados.

En la ruta AGV, se observa mayor contribución en eutrofización de agua dulce y ecotoxicidad acuática, atribuida al uso de soluciones de lavado y aguas residuales generadas en la purificación del PHA.

En comparación, el impacto en calentamiento global (GWP) y uso de recursos fósiles es menor, lo que demuestra la ventaja ambiental del enfoque biotecnológico frente a materiales petroquímicos.

Conclusiones

El análisis comparativo del ciclo de vida (ACV) de la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de lodos activados municipales permite evidenciar la influencia determinante de la fuente de carbono sobre el desempeño ambiental del proceso.

Los resultados obtenidos mediante el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) demostraron que la ruta basada en ácidos grasos volátiles (AGV) presenta un perfil ambiental más favorable en la mayoría de las categorías evaluadas, destacando su menor contribución a la toxicidad humana y ecotoxicidad acuática en comparación con la ruta basada en fenol.

La ruta Fenol, aunque representa una alternativa de valorización de compuestos tóxicos industriales, exhibe mayores impactos asociados al uso de surfactantes sintéticos (como SDS) y al elevado consumo energético en las etapas de recuperación y purificación. Estos factores la convierten en un sistema menos sostenible en escenarios de escalamiento industrial.



Por su parte, la ruta AGV aprovecha un residuo urbano sin valor económico, generando un proceso de bajo costo y menor carga ambiental, especialmente al considerarse los lodos como insumos sin impacto previo, conforme a los lineamientos de la ISO 14044. Su integración refuerza la transición hacia modelos de bioeconomía circular, donde los desechos municipales se convierten en recursos para la producción de biopolímeros biodegradables.(12)

Los resultados también muestran que los principales puntos críticos (hot spots) en ambas rutas corresponden al consumo energético y al uso de reactivos de purificación, lo cual señala oportunidades de optimización mediante el uso de energías renovables y surfactantes de origen biológico.

En conclusión, el estudio valida la pertinencia del ACV como herramienta para la toma de decisiones en biotecnología ambiental y demuestra que la valorización de residuos mediante rutas biológicas sostenibles puede reducir significativamente los impactos asociados a la producción de plásticos convencionales, aportando evidencia técnica útil para futuras estrategias de desarrollo sostenible e industrialización de los PHA.

Agradecimientos

Se agradece a Dios, por la sabiduría, fortaleza y salud concedidas a lo largo de cada etapa del proceso.

A mi compañera de vida, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante cada cambio y desafío.

A la directora de investigación, Ana Catalina Avella, por su guía, conocimientos compartidos y la gestión realizada para la obtención de los medios necesarios, incluyendo el acceso al software especializado.



A mis compañeros y colaboradores, por su compromiso y contribuciones en el desarrollo del trabajo.

A mi madre, por su presencia constante y apoyo inquebrantable, y a mi padre, por las enseñanzas y herramientas que hicieron posible superar las limitaciones económicas del proceso.

Finalmente, se expresa un especial agradecimiento a la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot, por el apoyo institucional brindado, así como por la disposición de los recursos, espacios y herramientas necesarias para la ejecución del estudio y las simulaciones experimentales.

Declaración de conflicto de intereses

En el presente trabajo no se contó con ningún tipo de contribución económica, comercial o particular que pudiera influir en los resultados o en las conclusiones obtenidas.

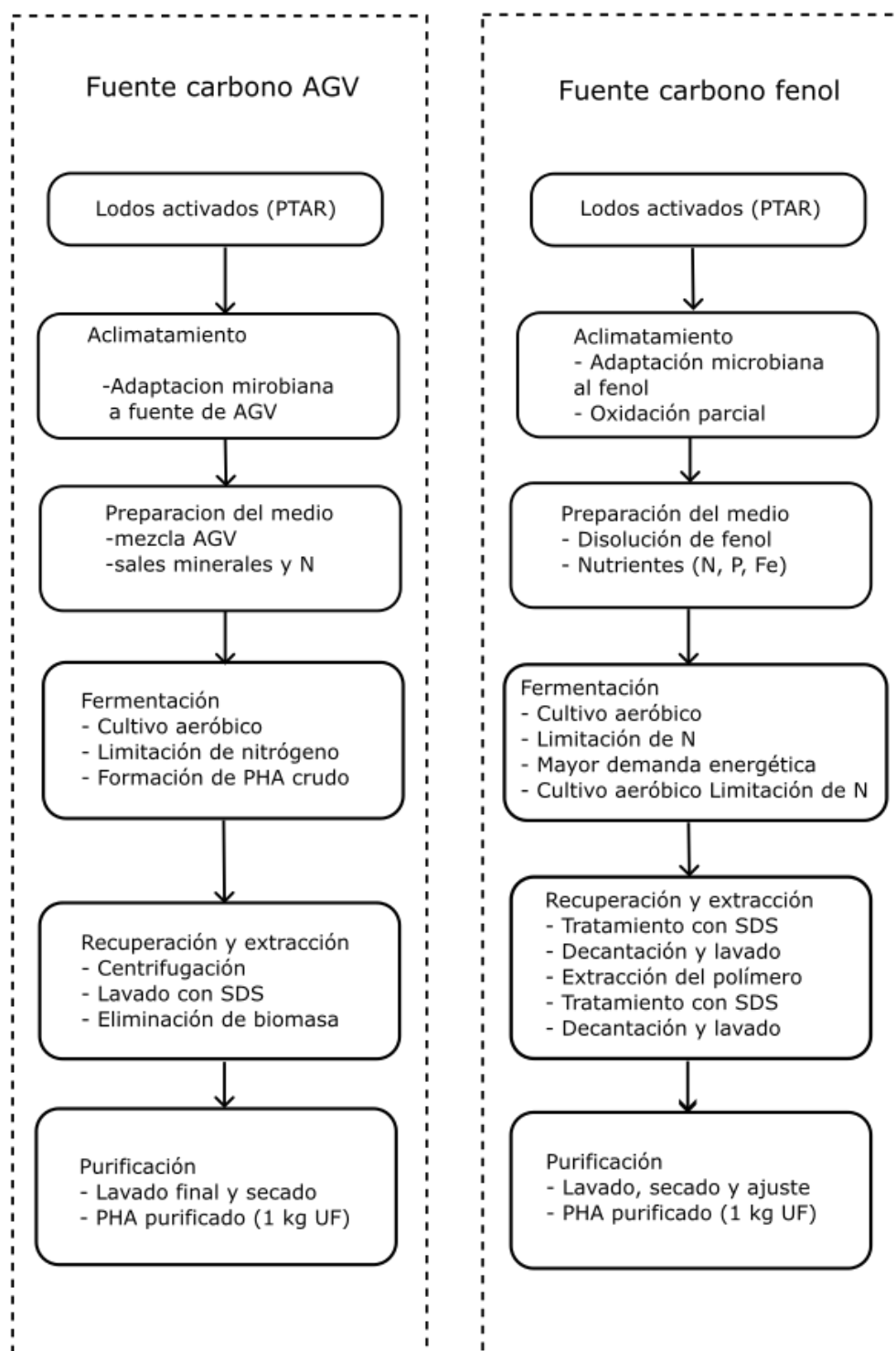
Sin embargo, se contó con el apoyo institucional de la Universidad de Cundinamarca, que facilitó el acceso al software SimaPro v9.5 y a la base de datos Ecoinvent 3.9, herramientas fundamentales para el desarrollo de la simulación y el análisis de ciclo de vida (ACV) realizado

Referencias

1. unfoundation.org [Internet]. 2024 [citado 27 de octubre de 2025]. Protect Our Planet from Plastic Pollution: 5 Things to Know. Disponible en: <https://unfoundation.org/blog/post/protect-our-planet-from-plastic-pollution-5-things-to-know/>
2. Alzate Marín JC. Producción de PHA a partir de subproductos de la industria, lacto suero y glicerina del biodiésel, usando lodos activados [Internet] [Tesis]. Universidad Nacional de La Plata; 2025 [citado 27 de octubre de 2025]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/178000>



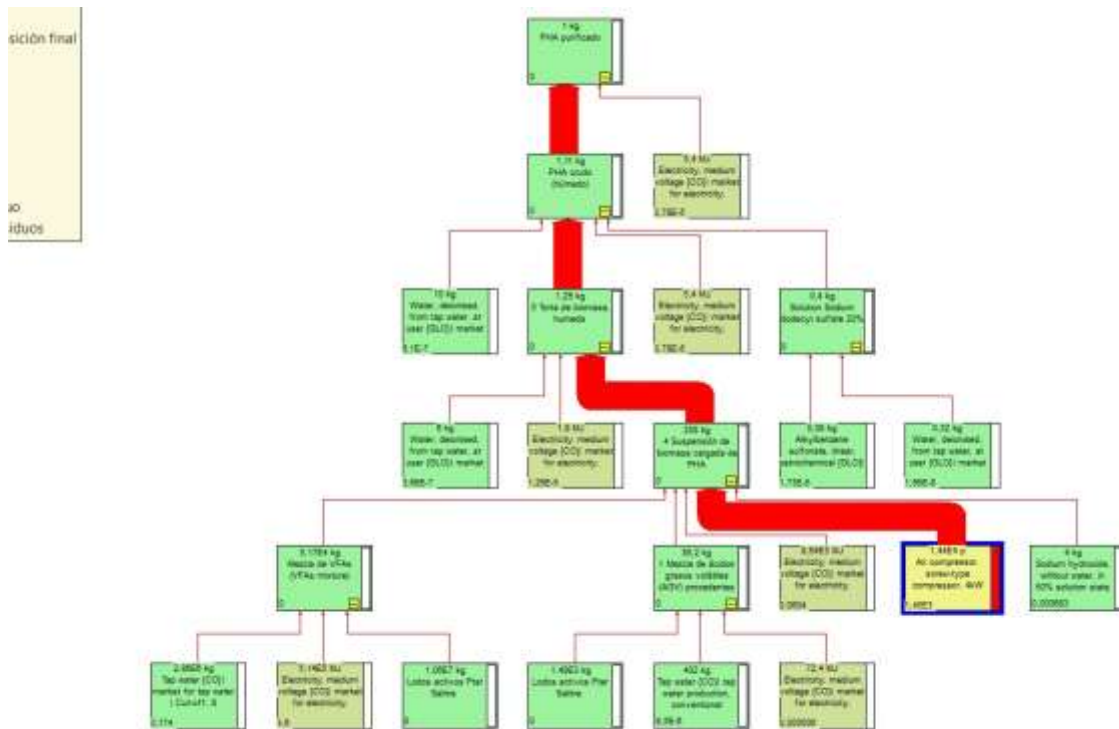
3. Yadav K, Nikalje GC. Comprehensive analysis of bioplastics: life cycle assessment, waste management, biodiversity impact, and sustainable mitigation strategies. *PeerJ*. 11 de septiembre de 2024;12:e18013.
4. González García Y, Meza Contreras JC, González Reynoso O, Córdova López JA. Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano. *Revista internacional de contaminación ambiental*. febrero de 2013;29(1):77-115.
5. Kogje M, Satdive A, Mestry S, Mhaske ST. Biopolymers: a comprehensive review of sustainability, environmental impact, and lifecycle analysis. *Iran Polym J*. 1 de septiembre de 2025;34(9):1481-524.
6. Gracia Jeniffer, Montenegro Carlos, Moreno Nubia, Cabeza Ivan. Production of Polyhydroxyalkanoates using Volatile Fatty Acids from Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge. *Chemical Engineering Transactions*. junio de 2023;100:559-64.
7. Zhang Y, Wusiman A, Liu X, Wan C, Lee DJ, Tay J. Polyhydroxyalkanoates (PHA) production from phenol in an acclimated consortium: Batch study and impacts of operational conditions. *Journal of Biotechnology*. febrero de 2018;267:36-44.
8. Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel HJ. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *Int J Life Cycle Assessment*. 1 de marzo de 2006;11(2):80-5.
9. ISO 14044:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices [Internet]. [citado 28 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
10. SimaPro-Tutorial.
11. Huijbregts MAJ, Steinmann ZJN, Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira M, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess*. 1 de febrero de 2017;22(2):138-47.
12. Castagnoli A, Falcioni S, Touloupakis E, Pasciucco F, Pasciucco E, Michelotti A, et al. Influence of Aeration Rate on Uncoupled Fed Mixed Microbial Cultures for Polyhydroxybutyrate Production. *Sustainability*. enero de 2024;16(7):2961.



FIGURAS La Figura 1 presenta los límites del sistema definidos para ambas rutas metabólicas (fenol y AGV), que abarcan desde la aclimatación de los lodos activados hasta la purificación del PHA, bajo el enfoque cradle-to-gate

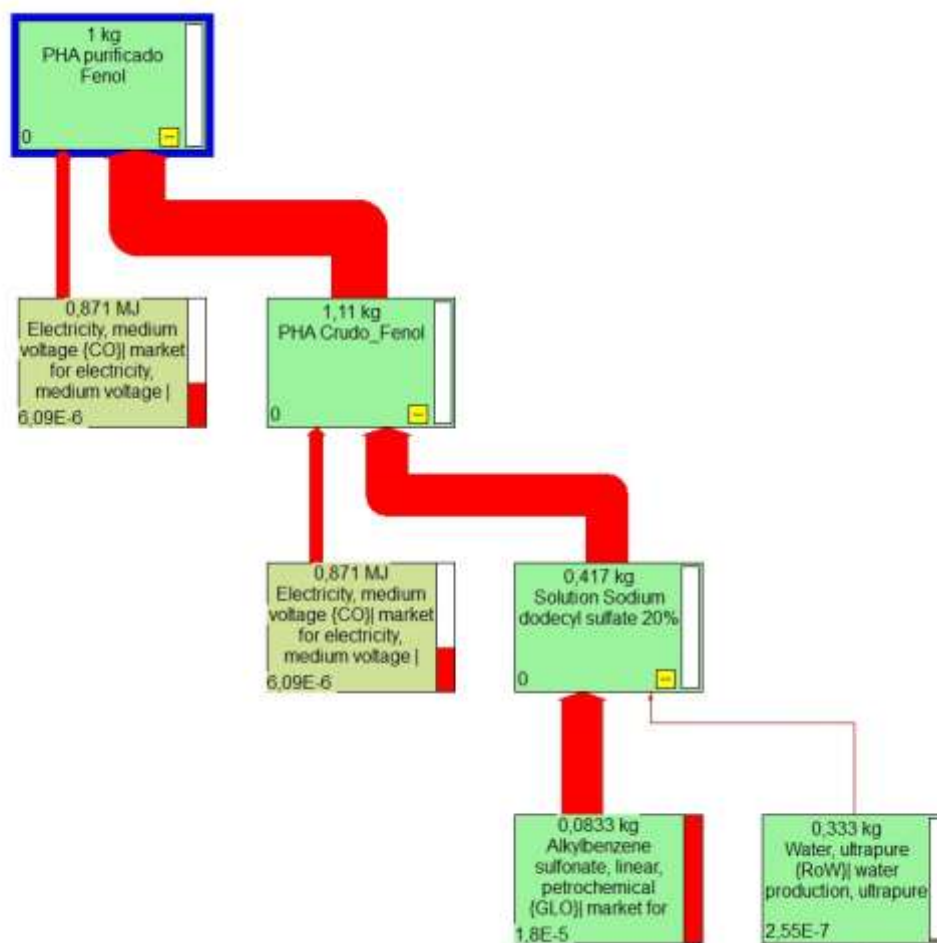


Fuente: elaboración propia



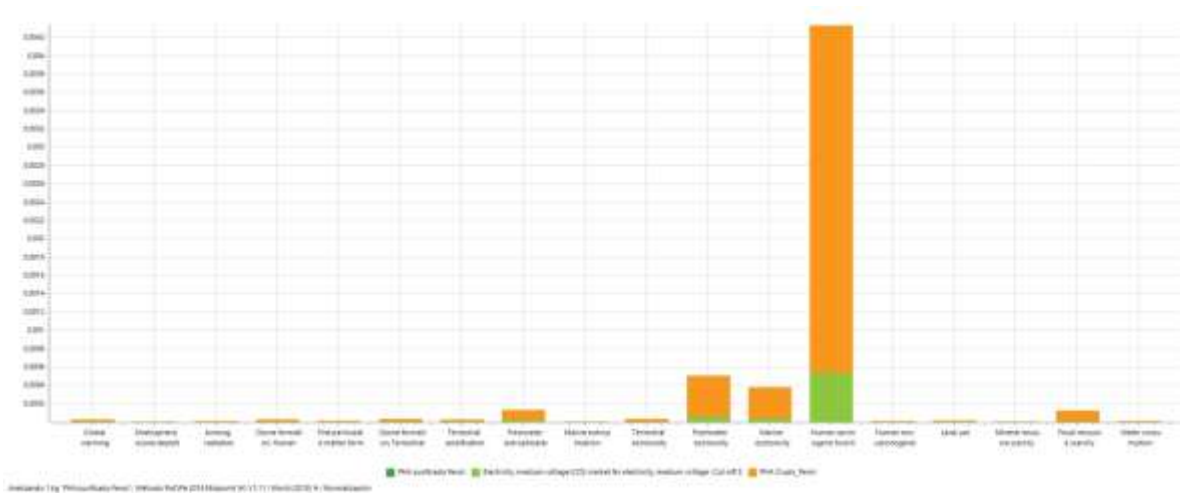
En las Figuras 2 y 3 se muestran los diagramas de árbol generados en SimaPro para cada ruta. En la ruta Fenol se observan mayores contribuciones en las etapas de purificación y consumo eléctrico, mientras que la ruta AGV presenta una distribución más equilibrada de impactos.

Fuente: elaboración propia



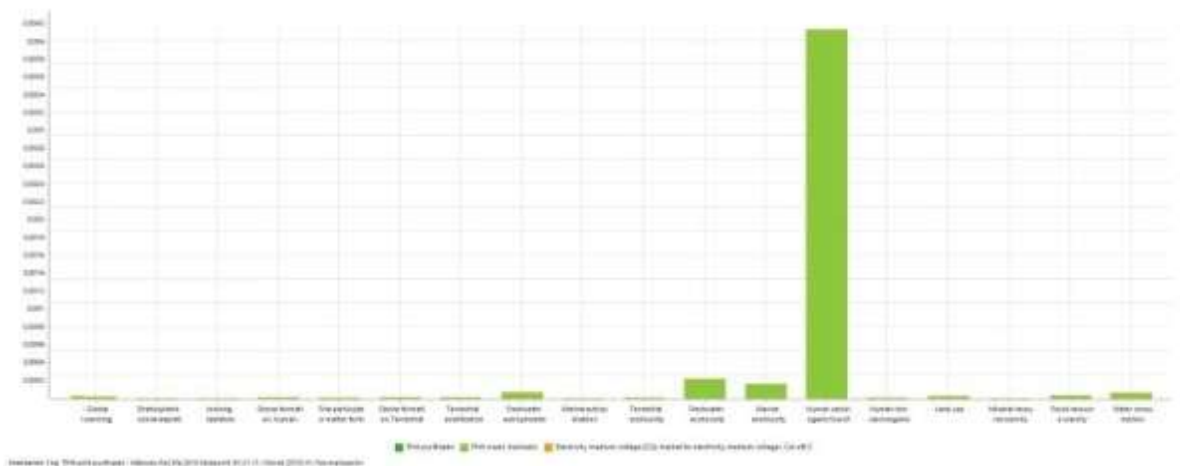
En la Figura 3, el método ReCiPe Midpoint (H) evidencia que la ruta AGV presenta menores cargas en la categoría Human carcinogenic toxicity, lo que sugiere una ventaja ambiental asociada al uso de fuentes carbonadas biodegradables.

Fuente: elaboración propia



La Figura 4 presenta la comparación de las 18 categorías de impacto del método ReCiPe 2016 Midpoint (H) para Fenol, evidenciando una menor carga ambiental total en el sistema basado en AGV.

Fuente: elaboración propia



La Figura 5 presenta la comparación de las 18 categorías de impacto del método ReCiPe 2016 Midpoint (H) para ácidos grasos volátiles, evidenciando una menor carga ambiental total en el sistema basado en AGV

Fuente: elaboración propia



TABLAS

Process Name	Flow Name	Flow Type	Quantity	Unit
Pretratamiento de lodos y fermentación acidogénica (a AGV)	Lodos activados PTAR El Salitre	Input	37	kg
	Electricidad de media tensión	Input	0.5	kWh
	Agua sin especificar	Input	10	L
	Mezcla de ácidos grasos volátiles (AGV)	Output	0.18088	kg
	Digestado húmedo	Output	36.8	kg
Preparación del medio para la fermentación de PHA (por 258,4 L)	KH ₂ PO ₄ (potassium phosphate, monobasic)	Input	684.8	g
	Na ₂ HPO ₄ (sodium phosphate, dibasic)	Input	877.1	g
	(NH ₄) ₂ SO ₄ (ammonium sulfate)	Input	726.4	g
	MgSO ₄ (magnesium sulfate)	Input	77.5	g
	FeSO ₄ (iron(II) sulfate)	Input	516.8	g
	CaCl ₂ (calcium chloride)	Input	516.8	g
	CoCl ₂ ·6H ₂ O (cobalt chloride hexahydrate)	Input	51.7	g
	CuCl ₂ ·2H ₂ O (copper(II) chloride dihydrate)	Input	2.6	g
	NiCl ₂ ·6H ₂ O (nickel salt)	Input	51.7	g
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	Input	7.8	g
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (zinc sulfate heptahydrate)	Input	25.8	g
	H ₃ BO ₃ (boric acid)	Input	77.5	g
	NaMoO ₄ ·2H ₂ O (sodium molybdate dihydrate)	Input	7.8	g
	Water, deionised	Input	258.4	L
Tren de inóculo (LB → sacarosa → adaptación a AGV)	Inóculo, cultivo mixto (iniciador)	Input	0.2	mL
	Medio LB (componentes)	Input	0.65	L
	Sacarosa cruda	Input	5	g
	Electricidad, media tensión, en red/CO ₂	Input	0.2	kWh
	Inóculo para fermentación	Output	0.1	L
Fermentación de acumulación de PHA – cultivo mixto (258,4 L)	Medio de fermentación de PHA, 1x	Input	258.4	L
	Mezcla de AGV	Input	0.18088	kg
	Inóculo, cultivo mixto	Input	0.1	L
	Electricidad, media tensión, en red/CO ₂	Input	12	kWh
	Compressed air (substitute)	Input	72	m ³
	Sodium hydroxide, 1 N	Input	0.02	kg
	Suspensión de biomasa cargada de PHA	Output	1.29199	kg (dry biomass)



Cosecha y lavado celular (centrifugación)	Suspensión de biomasa con PHA	Input	258.4 L
	Electricidad de media tensión	Input	0.5 kWh
	Agua desionizada	Input	6 L
	Torta de biomasa, húmeda (equiv. seco)	Output	1.29199 kg (equiv. biomasa seca)
	Centrado/aguas residuales de proceso	Output	264.4 L
Extracción de PHA – digestión con SDS y lavado	Torta de biomasa (equiv. seco)	Input	1.29199 kg
	Solución Sodium Dodecyl Sulfate SDS 20%	Input	0.4 L
	Calor para digestión (80 °C)	Input	1.5 kWh
	Agua desionizada	Input	10 L
	PHA crudo (húmedo)	Output	1.11111 kg
	Residuo de biomasa (seco)	Output	0.18088 kg
Purificación y secado del PHA	Aguas residuales con SDS	Output	10 L
	PHA crudo	Input	1.11111 kg
	Electricity, medium voltage, at grid/CO	Input	1.5 kWh
	Disolventes (opcional)	Input	0 L
	PHA purificado	Output	1 kg
	Residuos de disolventes / aguas residuales	Output	0 L

En la **Tabla 1** se presentan los flujos validados del sistema basado en fenol, mientras que la **Figura 1** muestra la estructura jerárquica del modelo en SimaPro.

Fuente: elaboración propia

Proceso	Flujo	Tipo	Cantidad	Unidad
Aclimatación de lodo activado	Lodo activado (PTAR)	Entrada	0.1875	kg (dry equiv.)
	Water, deionised	Entrada	41.6667	L
	Air, compressed (est.)	Entrada		m3
	Electricity (agitation & aeration)	Entrada	0.0417	kWh
	Inóculo aclimatado (output)	Salida	0.027083	kg
Preparación de medio (fenol)	Water, deionised	Entrada	41.6667	kg
	Phenol (500 mg/L)	Entrada	0.020833	kg
	NH4Cl (150 mg/L)	Entrada	0.00625	kg
	KH2PO4 (114 mg/L)	Entrada	0.00475	kg
	CaCl2 (20 mg/L)	Entrada	0.000833	kg



	MgSO ₄ (23.4 mg/L)	Entrada	0.000975 kg
	FeSO ₄ ·7H ₂ O (30 mg/L)	Entrada	0.00125 kg
	NaHCO ₃ (tampón) (stock vol)	Entrada	8.3333 L
	Micronutrients trace (stock)	Entrada	kg
	Medio preparado (output)	Salida	41.6667 L
Fermentación - Acumulación PHA	Medio preparado	Entrada	41.6667 L
	Inóculo aclimatado	Entrada	0.027083 kg
	Air, compressed (est.)	Entrada	m ³
	Electricity (aeration & agitation)	Entrada	0.0417 kWh
	Biomasa con PHA (output, dry equiv)	Salida	0.1875 kg
Cosecha y lavado (centrifugación)	Biomasa slurry	Entrada	0.1875 kg (dry equiv)
	Electricity (centrifuge)	Entrada	0.0806 kWh
	Water, deionised (wash)	Entrada	20 L
	Biomasa cake (output)	Salida	0.1875 kg (dry)
	Wastewater (from wash)	Salida	20 L
Extracción (SDS digestion)	Biomasa cake (dry)	Entrada	0.1875 kg
	SDS solution 1%	Entrada	8.33334 L
	Electricity (heating/mixing)	Entrada	0.2419 kWh
	PHA crudo (output)	Salida	1.111 kg
	Residual solids	Salida	0.1875 kg
Purificación y secado	PHA crudo	Entrada	1.111 kg
	Electricity (drying)	Entrada	0.2419 kWh
	PHA purificado (final)	Salida	1 kg
	Wastewater (purif)	Salida	2 L

Las Tablas 1 y 2 muestran los flujos de materia y energía validados para las rutas basadas en fenol y AGV, respectivamente, ajustados a la unidad funcional de 1 kg de PHA purificado.

Fuente: elaboración propia

Parámetros	Valores
Unidad funcional	1 kg de PHA purificado
f (PHA/biomasa)	0.86 (86%)
Recuperación (purificación)	0.90 (90%)
Concentración de biomasa (C_biomass)	5 g biomasa seca / L
Volumen de fermentación	258.40 L
Biomasa seca requerida	1.29199 kg
AGV totales requeridos	180.88 g (0.18088 kg)
Lodo húmedo requerido (caso base)	37.0 kg lodo húmedo (TS 2%, rendimiento VFA/VS=0.35)
Energía estimada	15 kWh (agitación + secado)



Observación

El lodo activado se considera subproducto valorizado sin carga ambiental previa.

En la Tabla 3 se resumen los valores experimentales ajustados y los factores de escala empleados para la modelación de ambas rutas, derivados de los estudios de (7) y (6)

Fuente: elaboración propia

Parámetro	Valor
Unidad funcional	1 kg PHA purificado
Volumen base (laboratorio)	50 mL produce 1.2 g PHA (experimental)
Factor de escala	833.333333
Volumen escalado	41.6667 L
Agua (medio)	41.6667 kg (\approx L)
Fenol (500 mg/L)	0.020833 kg
NH ₄ Cl (150 mg/L)	0.006250 kg
KH ₂ PO ₄ (114 mg/L)	0.004750 kg
CaCl ₂ (20 mg/L)	0.000833 kg
MgSO ₄ (23.4 mg/L)	0.000975 kg
FeSO ₄ ·7H ₂ O (30 mg/L)	0.001250 kg
Lodo activado (4.5 g/L)	0.187500 kg
Inóculo (0.65 g/L)	0.027083 kg
SDS solución 1% (vol)	8.333340 L (contiene 0.083333 kg SDS)
NaClO solución (~wash) vol	16.666680 L
Agua de lavados (estimada)	20.000016 L
Energía total estimada	0.6867 kWh

En la Tabla 4

Fuente: elaboración propia

Flujo	Comentario
Water, deionised	Volumen de medio escalado desde 50 mL
Phenol (500 mg/L)	Fenol técnico, 500 mg/L
NH ₄ Cl (150 mg/L)	



KH ₂ PO ₄ (114 mg/L)	El flujo 'Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)' fue sustituido por 'Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state (GLO)' ajustando su masa molar en un 0.72x, debido a la ausencia del compuesto específico en ecoinvent. El reemplazo conserva la función de fuente de fósforo en el medio de cultivo y cumple con el principio de equivalencia funcional establecido en ISO 14044.
CaCl ₂ (20 mg/L)	
MgSO ₄ (23.4 mg/L)	
FeSO ₄ ·7H ₂ O (30 mg/L)	El compuesto 'FeSO ₄ ·7H ₂ O' (sulfato ferroso heptahidratado) fue sustituido por 'Iron(II) chloride {GLO} market for Cut-off, S'. Se aplicó un factor de corrección de 0.456 para igualar el contenido de Fe ²⁺ . La sustitución mantiene la función nutricional de hierro ferroso en el medio de cultivo y cumple con la equivalencia funcional según ISO 14044 §4.2.3.6.
NaHCO ₃ (tampón) (stock vol)	10 mL stock por 50 mL -> escalado
Medio preparado (output)	Volumen de medio listo para fermentación

En la Tabla 5 La homogeneización se realizó por equivalencia estequiométrica y/o por contenido del elemento funcional (p. ej. Fe, P), aplicando factores de corrección calculados para igualar la capacidad funcional del compuesto sustituto

Fuente: elaboración propia