Revista Científica Horizontes Multidisciplinarios
e-ISSN: 3028-4074

Artículo científico de investigación

Reciclaje de botellas PET en La Paz: tecnología, actores e innovación

PET Bottle Recycling in La Paz: Technology, Stakeholders, and Innovation

Antonio Ticona Condori
Universidad Pública de El Alto, La Paz, Bolivia
antonticona@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-6058-7141

Recepción: 26 de diciembre de 2025
Aceptado: 16 de febrero de 2026
Publicado: 10 de marzo de 2026

¿Cómo citar este artículo?
Ticona Condori, A. (2026). Tecnología de reciclaje y materiales de botellas PET (polietileno tereftalato) en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Científica Horizontes Multidisciplinarios*, *3*(1), 274-296. https://doi.org/10.65705/RHOMU.v3i1.81.

Copyright: © 2026 Antonio Ticona Condori; Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

RESUMEN

Este estudio evalúa el reciclaje de botellas PET en la ciudad de La Paz (Bolivia) desde una perspectiva tecnológica y de cadena de valor, con énfasis en generación, actores e implicaciones para la economía circular. Se aplicó un diseño no experimental basado en fuentes secundarias, triangulando literatura científica con datos institucionales (caracterización municipal de residuos y estadísticas demográficas) y documentación técnica sectorial. Con base en la generación anual de residuos sólidos y la fracción PET reportada, se estimó una generación de PET de 3.000–4.500 t/año (≈4–6 kg/hab/año). El análisis muestra una estructura dual del sistema: la captación primaria depende significativamente de recicladores de base, mientras que la transformación industrial se concentra en pocos nodos. En el plano tecnológico, la predominancia del reciclaje mecánico hace que la calidad del rPET esté fuertemente condicionada por la segregación, el acopio y el control de contaminantes (tapas, etiquetas y polímeros ajenos), limitando el acceso a aplicaciones de mayor valor. Se concluye que fortalecer infraestructura de acopio, coordinación inter-actor y mecanismos de reciclaje inclusivo es clave para mejorar recuperación, calidad y valorización del PET en La Paz.

PALABRAS CLAVE: Reciclaje PET, economía circular, sostenibilidad ambiental, botellas plásticas, Bolivia.

ABSTRACT

This study evaluates PET bottle recycling in the city of La Paz (Bolivia) from a technological and value chain perspective, with an emphasis on waste generation, key stakeholders, and implications for the circular economy. A non-experimental design based on secondary sources was applied, triangulating scientific literature with institutional data (municipal waste characterization and demographic statistics) and sector-specific technical documentation. Based on annual solid waste generation and the reported PET fraction, PET generation was estimated at 3,000–4,500 t/year (≈4–6 kg/capita/year). The analysis reveals a dual structure of the system: primary collection relies significantly on grassroots recyclers, while industrial processing is concentrated in a few hubs. Technologically, the predominance of mechanical recycling means that rPET quality is heavily influenced by segregation, collection, and control of contaminants (caps, labels, and foreign polymers), limiting access to higher-value applications. It is concluded that strengthening collection infrastructure, coordination among stakeholders, and inclusive recycling mechanisms is key to improving the recovery, quality, and value of PET in La Paz.

KEYWORDS: PET recycling, Bolivia, circular economy, environmental sustainability, plastic bottles.

INTRODUCCIÓN

La Paz crece sobre una geografía exigente: laderas, cuencas y un sistema vial que complica la logística urbana. En ese escenario, el consumo cotidiano de bebidas envasadas se traduce en un flujo persistente de botellas de polietileno tereftalato (PET). Dentro de ese conjunto, el PET se ha posicionado como material dominante para botellas debido a sus propiedades físico-mecánicas —transparencia, ligereza, resistencia y barrera frente a gases— que lo hacen particularmente eficiente para el almacenamiento y transporte de líquidos (Ramírez Antezana, 2022). Sin embargo, esas ventajas industriales se traducen en un costo ambiental cuando el material no se recupera de forma efectiva: el PET presenta alta persistencia en el ambiente y su degradación ocurre en escalas temporales prolongadas, lo que incrementa el riesgo de acumulación y dispersión en ecosistemas urbanos y periurbanos (Ramírez Antezana, 2022).

En Bolivia, esta tensión entre utilidad y persistencia se expresa con especial intensidad en los centros urbanos, donde se concentra el consumo y, con ello, la generación de residuos postconsumo. Los datos del Censo 2024 reportan 11.365.333 habitantes a nivel nacional y aproximadamente 757.431 residentes en la ciudad de La Paz, lo que la posiciona como un nodo urbano de alta demanda de productos envasados y, por extensión, de generación de residuos asociados (INE, 2024). A nivel país, el diagnóstico de WWF estima un descarte anual de 142.699 toneladas de residuos plásticos, equivalente a 12,5 kg per cápita/año, cifra que dimensiona el peso del problema y su relación con patrones de consumo contemporáneos (WWF-Servicios Ambientales, 2021).

En el caso paceño, el desafío no se limita a la acumulación de residuos en el sistema de aseo urbano, sino que se articula con impactos ambientales en corredores hídricos y espacios públicos. La situación del río Choqueyapu es ilustrativa: su contaminación y la deposición cotidiana de basura han sido documentadas desde una perspectiva histórica, evidenciando cómo la disposición inadecuada se traduce en presiones ambientales sostenidas (Criales, 2023). Este componente territorial es especialmente relevante, porque la contaminación plástica no permanece confinada al punto de origen; por el contrario, puede incorporarse a redes de drenaje, quebradas y cuencas, amplificando el impacto ambiental más allá del perímetro urbano (Criales, 2023).

La magnitud del PET en la matriz municipal permite entender por qué su gestión es estratégica. El Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del GAMLP indica que los plásticos representan 8,59% del total de residuos en el municipio, mientras que el PET alcanza 1,83% en fuente domiciliaria y entre 1,14% y 1,69% en fuentes no domiciliarias (GAMLP, 2023). Considerando que La Paz genera aproximadamente entre 670 y 698 toneladas diarias de residuos sólidos (244.000 a 255.000 toneladas/año), la fracción correspondiente a PET se estima en un rango de 3.000 a 4.500 toneladas/año, lo cual representa un volumen suficiente para sostener cadenas de recuperación y transformación, siempre que existan condiciones técnicas y organizacionales adecuadas (GAMLP, 2023). Esta estimación se complementa con el marco demográfico reciente (INE, 2024) y el diagnóstico nacional de plásticos (WWF-Servicios Ambientales, 2021), que permiten interpretar el fenómeno no como un evento aislado, sino como parte de un metabolismo urbano asociado a consumo, logística y gestión institucional.

A pesar de la existencia de capacidades industriales y rutas técnicas consolidadas, el aprovechamiento del PET enfrenta límites concretos. La ruta más extendida es el reciclaje mecánico, cuya viabilidad depende críticamente de la segregación y la pureza del material: la presencia de contaminantes y polímeros ajenos al PET compromete la calidad del producto final y reduce el valor de mercado del reciclado (Ramírez Antezana, 2022). En paralelo, la transición hacia alternativas avanzadas —incluyendo procesos químicos o enfoques

orientados a certificaciones para contacto alimentario— suele estar condicionada por inversión, control de calidad y marco regulatorio, elementos que, en conjunto, determinan si la cadena puede evolucionar desde aplicaciones de menor valor hacia circuitos de mayor exigencia (Ramírez Antezana, 2022).

En este contexto, la presente investigación se propone analizar las tecnologías de reciclaje de envases PET con énfasis en su aplicabilidad a la ciudad de La Paz, articulando evidencia técnica con datos institucionales para identificar brechas y oportunidades. El objetivo no es solo describir procesos, sino establecer una lectura que permita traducir el volumen de generación y las condiciones locales —demográficas, territoriales e institucionales— en orientaciones concretas para fortalecer la recuperación y promover la innovación en productos y servicios asociada a la cadena del PET (GAMLP, 2023; INE, 2024; WWF-Servicios Ambientales, 2021).

En coherencia con lo anterior, este trabajo tiene como propósito realizar un análisis exhaustivo de las tecnologías de reciclaje de botellas PET y discutir su viabilidad de implementación en el contexto paceño, considerando que la escala de generación estimada y la composición de residuos municipales justifican una intervención técnica y organizacional más robusta (GAMLP, 2023). El objetivo general consiste en evaluar el estado del reciclaje de PET en La Paz y delinear oportunidades de mejora e innovación que permitan incrementar la recuperación y elevar el valor agregado del material reciclado, bajo un enfoque de sostenibilidad y economía circular sustentado en evidencia institucional y técnica (WWF-Servicios Ambientales, 2021; Ramírez Antezana, 2022).

Marco teórico

El PET es un polímero termoplástico de la familia de los poliésteres que se masificó en envases desde la década de 1970 debido a propiedades que favorecen su uso en botellas: resistencia mecánica, estabilidad dimensional, buena barrera frente a gases, transparencia y ligereza, lo que reduce costos logísticos frente a vidrio o metal (Muñoz-Chichande et al., 2021). Desde la economía circular, estas características se complementan con su potencial de recuperación y reconversión en aplicaciones secundarias mediante rutas tecnológicas consolidadas (Angulo Martínez, 2022). La vía dominante es el reciclaje mecánico, que permite reprocesamiento en múltiples ciclos —con degradación gradual— para producir fibras, láminas termoformadas y otros productos; con controles estrictos de calidad y descontaminación puede habilitarse el esquema "bottle-to-bottle" orientado a contacto alimentario, donde trazabilidad e inocuidad son condiciones centrales (Starlinger, 2024). Como alternativa, el reciclaje químico busca superar límites del mecánico mediante despolimerización y posterior repolimerización con calidad comparable a resina virgen (Ochoa Mendoza, 2005).

Operativamente, el reciclaje mecánico inicia con recolección y clasificación, etapa clave para evitar contaminación cruzada, apoyable en sistemas automatizados (Guerrero Calderon & Solano Orellano, 2025). Luego se tritura a escamas, se lava y separa fisicoquímicamente para retirar adhesivos, materia orgánica y componentes no PET, y finalmente se seca, extruye y peletiza para obtener rPET comercializable (Ramírez Antezana, 2022). La calidad depende del control de impurezas a lo largo de toda la cadena; la presencia de metales u otros plásticos reduce desempeño y limita aplicaciones de mayor exigencia, por lo que la separación y limpieza consistentes sostienen la viabilidad industrial y el valor de mercado (Blanco Romero, 2025; Juan Rodríguez, 2022). En el reciclaje químico, rutas como glicólisis, metanólisis e hidrólisis convergen en recuperar componentes base del polímero, aunque con diferentes condiciones de operación (Ramírez

Antezana, 2022). Entre innovaciones emergentes, el reciclaje enzimático ha mostrado resultados prometedores para producir PET grado alimentario en iniciativas industriales, aunque su escalamiento enfrenta barreras de costo, madurez y escala (Suntory, 2021).

En Bolivia, la trayectoria tecnológica del reciclaje está condicionada por el marco regulatorio y los arreglos institucionales. La Ley N.° 755 establece el régimen de gestión integral priorizando prevención, aprovechamiento y disposición final segura, e incorpora el enfoque de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para responsabilizar a productores y distribuidores también en la fase postconsumo (Estado Plurinacional de Bolivia, 2015). Complementariamente, el Proyecto de Ley PL-353-2023-2024 plantea reducción de plásticos de un solo uso y metas de reaprovechamiento, incluyendo envases PET, por lo que su cita debe normalizarse con identificación completa y estado de trámite para asegurar verificabilidad (PL-353-2023-2024, 2023–2024). A escala local, el GAMLP ha impulsado estrategias e iniciativas de reciclaje, pero persisten limitaciones institucionales para el procesamiento especializado de PET, manteniendo dependencia de actores privados; en consecuencia, fortalecer capacidades públicas (planificación, regulación, incentivos y articulación de actores) aparece como condición habilitante para una gestión integral del PET (GAMLP, 2023).

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un diseño no experimental y de carácter aplicado, orientado a producir evidencia útil para la toma de decisiones en gestión de residuos y economía circular. En términos metodológicos, el estudio combinó procedimientos cuantitativos y cualitativos a partir de fuentes secundarias: por un lado, se estimó la magnitud del flujo de PET postconsumo en La Paz mediante registros estadísticos institucionales; por otro, se reconstruyó la estructura de actores, capacidades e incentivos de la cadena de reciclaje a partir de literatura científica, documentos técnicos, normativa y reportes institucionales. Este enfoque es coherente con el tipo de resultados obtenidos, que se apoyan en cifras oficiales y análisis documental para identificar volúmenes, brechas y oportunidades tecnológicas.

La recolección de información se organizó en dos bloques complementarios. El primero correspondió a la revisión de literatura científica y técnica sobre reciclaje de PET, economía circular y gestión de residuos en Bolivia y América Latina. Para ello se consultaron bases académicas de amplia cobertura regional e internacional (Scopus, SciELO y Redalyc) y se aplicaron descriptores en español e inglés coherentes con el objeto de estudio, tales como “PET recycling”, “waste management Bolivia” y “circular economy Latin America”. La búsqueda se acotó a documentos que abordaran (i) tecnologías de reciclaje de PET y requerimientos de calidad, (ii) gestión de residuos urbanos y reciclaje inclusivo, y (iii) evidencia empírica aplicada a Bolivia o contextos urbanos comparables; se excluyeron publicaciones sin trazabilidad editorial o sin relación directa con PET o residuos urbanos. Este corpus permitió sustentar el marco conceptual sobre rutas tecnológicas y sobre condiciones sociales e institucionales del reciclaje, incluyendo el rol del reciclador de base y las dinámicas de gobernanza urbana reportadas para La Paz.

El segundo bloque correspondió a la compilación de estadísticas y documentos institucionales para el caso La Paz–Bolivia. Se emplearon como insumos principales el Censo 2024 del Instituto Nacional de Estadística, el Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP) y el diagnóstico nacional de plásticos de WWF (servicios ambientales). Estos documentos se eligieron por su relevancia para estimar población, composición de residuos y magnitudes de descarte plástico a escala nacional y municipal, variables que alimentan directamente la Tabla comparativa Bolivia–La Paz y los rangos de generación anual reportados en resultados.

Con esos insumos se efectuó la estimación del flujo anual de PET mediante procedimientos de cálculo transparente. En primer lugar, se tomó el rango de generación municipal total de residuos sólidos (toneladas/día y toneladas/año) reportado por el GAMLP y se aplicó el porcentaje de PET identificado en el mismo estudio para fuentes domiciliarias y no domiciliarias, a fin de obtener un rango anual de PET (t/año). En segundo lugar, la estimación per cápita se derivó dividiendo el rango anual estimado de PET entre la población del municipio reportada por INE, obteniendo un intervalo (kg/hab/año). Para el contraste nacional, se empleó el dato de descarte anual de plásticos y su equivalente per cápita de WWF, incorporándolo como referencia comparativa para discutir diferencias de escala y patrones de consumo. Con este procedimiento se garantizó que las cifras reportadas en resultados (3.000–4.500 t/año; 4–6 kg/hab/año) fueran reproducibles y atribuibles a fuentes institucionales identificables.

Para el análisis cualitativo de cadena de valor, se realizó un análisis de contenido de documentos que describen actores, infraestructura y capacidades de reciclaje de PET en Bolivia. Se revisaron fuentes institucionales y corporativas (por ejemplo, información pública de empresas recicladoras) únicamente con el propósito de identificar estructura de mercado, localización de operaciones y orientación tecnológica declarada, triangulando estas descripciones con literatura revisada por pares sobre gestión de residuos y economía circular en La Paz. Esta triangulación permitió sostener, con base documental, la caracterización de una estructura dual (sector formal e informal) y la identificación de actores industriales dominantes, evitando que las conclusiones descansen en una única fuente o en afirmaciones no verificables.

El marco normativo se analizó mediante revisión de la Ley N.° 755 de Gestión Integral de Residuos y de documentos normativos y de gestión local vinculados al GAMLP. El objetivo fue contextualizar las responsabilidades y herramientas institucionales disponibles para el manejo postconsumo, así como las brechas entre el mandato normativo y la capacidad operativa observada en el territorio. En el caso del Proyecto de Ley PL-353-2023-2024, el documento se incorporó como referencia de agenda legislativa en discusión; metodológicamente, se trató como un insumo de contexto (no como evidencia de implementación), dado que su estado puede variar y su efecto depende de reglamentación y cumplimiento posterior.

Para integrar resultados cuantitativos y cualitativos en un diagnóstico estratégico, se emplearon dos herramientas de síntesis. En primer lugar, se construyeron matrices comparativas para organizar datos y evidencias por dimensiones (generación, composición, actores, capacidades tecnológicas y limitaciones), lo que facilitó la coherencia entre estimaciones numéricas y lectura institucional. En segundo lugar, se aplicó un análisis FODA para ordenar de manera estructurada las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del sistema de reciclaje de PET, y se complementó con un análisis de stakeholders orientado a identificar actores, roles e interdependencias relevantes para propuestas de innovación en productos y servicios. Dado que el estudio se sustenta en fuentes documentales, tanto el FODA como el mapa de actores se basaron en evidencia triangulada (estadísticas institucionales, literatura científica y documentos técnicos), explicitando que su alcance es analítico-estratégico y no un levantamiento de percepción mediante entrevistas.

Como criterios de calidad, se priorizó la trazabilidad de las fuentes, la consistencia entre documentos (convergencia de datos cuando existían varias referencias) y la coherencia lógica entre inferencias y evidencia disponible. Cuando una afirmación provenía de una fuente corporativa o de divulgación, se utilizó únicamente como dato descriptivo y se evitó emplearla como soporte de conclusiones técnicas centrales, privilegiando documentos oficiales y literatura revisada por pares para sustentar resultados e

interpretaciones.

RESULTADOS

Diagnóstico de la generación de residuos PET en La Paz

El diagnóstico de la generación de residuos PET en la ciudad de La Paz se sustenta en la triangulación de tres insumos institucionales: (i) la caracterización municipal de residuos sólidos, que define la composición y proporción del PET dentro de la matriz de residuos; (ii) el marco demográfico oficial, que permite expresar la magnitud del problema en términos per cápita; y (iii) el diagnóstico nacional de plásticos, que aporta una referencia de escala país para contextualizar el comportamiento del descarte (GAMLP, 2023; INE, 2024; WWF-Servicios Ambientales, 2021).

De acuerdo con el GAMLP, los plásticos representan el 8,59% del total de residuos generados en el municipio, mientras que la fracción PET corresponde a 1,83% en fuente domiciliaria y se sitúa entre 1,14% y 1,69% en fuentes no domiciliarias (GAMLP, 2023). Considerando que la ciudad registra una generación total aproximada de 670 a 698 toneladas diarias de residuos sólidos —equivalentes a 244.000 a 255.000 toneladas anuales—, la aplicación de esos porcentajes permite estimar un rango anual de PET del orden de 3.000 a 4.500 toneladas. Esta estimación no se presenta como un valor absoluto, sino como un intervalo que refleja la variabilidad esperable asociada a la mezcla de fuentes (domiciliaria y no domiciliaria) y a las oscilaciones en la generación total municipal (GAMLP, 2023).

Para interpretar la magnitud de ese flujo en relación con la población, se calculó la generación per cápita dividiendo el rango anual estimado de PET (en kilogramos) entre la población de la ciudad reportada por el Censo 2024. Con una población aproximada de 757.431 habitantes, el resultado se ubica alrededor de 4 a 6 kg de PET por habitante por año, lo cual confirma que el PET constituye un flujo material relevante dentro del metabolismo urbano paceño, aun cuando su proporción porcentual dentro de la matriz de residuos sea menor que la de otras fracciones (INE, 2024; GAMLP, 2023). Expresar el dato como indicador per cápita es metodológicamente útil porque permite comparar escenarios y dimensionar la presión potencial sobre los sistemas de recolección, segregación y valorización (INE, 2024; GAMLP, 2023).

En términos de contexto nacional, WWF estima un descarte anual de 142.699 toneladas de residuos plásticos en Bolivia, equivalente a 12,5 kg per cápita/año para plásticos en general (WWF-Servicios Ambientales, 2021). Si bien esta referencia no desagrega PET de manera directa, resulta pertinente para ubicar el caso paceño dentro de una discusión más amplia sobre patrones de consumo y descarte de plásticos. En conjunto, los datos municipales y demográficos muestran que la ciudad dispone de un volumen anual de PET suficientemente grande como para sustentar estrategias de recuperación y valorización, siempre que se fortalezcan condiciones operativas críticas como separación en la fuente, infraestructura de acopio y control de contaminación del material recuperado (GAMLP, 2023; WWF-Servicios Ambientales, 2021).

Tabla 1

Indicadores de generación de residuos PET y contexto comparativo (Bolivia-La Paz)

Indicador	Bolivia	La Paz	Fuente / base de cálculo

	(nacional)	(ciudad)	
Población	11.365.333	757.431	INE (2024)
Residuos plásticos totales (t/año)	142.699	—	WWF-Servicios Ambientales (2021)
Generación total de residuos sólidos (t/año)	—	244.000–255.000	GAMLP (2023)
Plásticos en la matriz municipal (%)	—	8,59%	GAMLP (2023)
PET en fuente domiciliaria (%)	—	1,83%	GAMLP (2023)
PET en fuentes no domiciliarias (%)	—	1,14%–1,69%	GAMLP (2023)
PET estimado (t/año)	—	3.000–4.500	Elaboración propia: (t/año RSU) × (% PET) con rangos GAMLP (2023)
PET per cápita (kg/hab/año)	—	≈4–6	Elaboración propia: (PET t/año × 1.000) / población INE (2024)

Infraestructura y actores del reciclaje de PET en Bolivia

La cadena de reciclaje de PET en Bolivia puede describirse como un sistema de estructura dual, donde conviven un componente formal —integrado por empresas con capacidad de transformación industrial— y un componente informal compuesto por recicladores de base que sostienen la recuperación primaria del material. Esta configuración no es un rasgo marginal: influye directamente en la cantidad y, sobre todo, en la calidad del PET que llega a las plantas, ya que la recuperación en condiciones urbanas reales depende de la segregación, del acopio y de circuitos de compra–venta donde los incentivos no siempre se alinean con estándares técnicos de pureza. En el caso de La Paz, estudios recientes sobre gestión de residuos y reciclaje han documentado el papel estructural de los recicladores en la recuperación, así como tensiones asociadas a condiciones laborales, informalidad y debilidad institucional para integrar el reciclaje inclusivo en un marco sostenible (Ferronato et al., 2022; Bolivia Verifica, 2024).

Desde la perspectiva del sector formal, la evidencia documental incluida en este estudio muestra una concentración importante de la capacidad instalada en pocos nodos. En particular, el procesamiento industrial de PET se organiza alrededor de dos actores mencionados como centrales en el manuscrito: Marecbol, con operación en el departamento de La Paz, y Empacar, con instalaciones en Santa Cruz (Empacar, 2026; Marecbol, 2026). Este rasgo de centralización tiene implicaciones prácticas: cuando la transformación se concentra, los costos de transporte y la logística interregional adquieren mayor peso, y la viabilidad de ampliar la recuperación depende de la capacidad de conectar sistemas locales de recolección con plantas que pueden estar lejos del punto de generación (Empacar, 2026; Marecbol, 2026).

En el caso de Marecbol, la información corporativa consultada en el marco de este trabajo señala una trayectoria superior a diecisiete años en reciclaje industrial de envases PET y la localización de su núcleo operativo en Pucarani (provincia Los Andes, La Paz). Desde el punto de vista de infraestructura, la empresa reporta capacidad de transformación del orden de 2.000 toneladas mensuales de material plástico, y presenta un modelo diversificado organizado en divisiones productivas, incluyendo una línea específica para PET y otras asociadas a papel, bolsas, inyección y termoformado (Marecbol, 2026). Estos elementos permiten afirmar, al menos en términos de capacidades declaradas, que existe en La Paz un nodo industrial con potencial para absorber volúmenes significativos, aunque su desempeño real frente a la oferta local depende de la estabilidad del abastecimiento, la calidad del material recolectado y la articulación con redes de acopio (Marecbol, 2026).

De forma complementaria, el ecosistema de recuperación incorpora actores que, sin operar necesariamente plantas de transformación, influyen en la captación postconsumo y en la disponibilidad del material. Un caso relevante mencionado en el manuscrito es Embol (Embotelladora Boliviana), embotellador autorizado de Coca-Cola en Bolivia. En sus reportes de sostenibilidad se indica que durante 2023 la empresa recicló 5.705 toneladas de botellas plásticas y desplegó 2.650 contenedores PET en el país (Embol, 2023). Sin embargo, este tipo de modelo de recolección corporativa presenta una dependencia estructural: la captura del residuo no equivale al procesamiento final, el cual suele requerir alianzas con operadores y plantas especializadas. Por ello, la eficacia del circuito depende de la coordinación entre los mecanismos de recolección y la infraestructura de transformación disponible, así como de acuerdos de calidad y trazabilidad del material (Embol, 2023).

El componente informal requiere un tratamiento analítico explícito porque constituye un punto de tensión entre eficiencia material y justicia social. En La Paz se ha estimado la presencia de aproximadamente 400 recicladores de base, cuya labor sostiene parte de la recuperación efectiva, pero bajo condiciones marcadas por precariedad y bajo reconocimiento formal (Bolivia Verifica, 2024). Esta realidad afecta el desempeño del sistema en al menos dos dimensiones: por un lado, condiciona la estabilidad del suministro de PET hacia el acopio; por otro, plantea la necesidad de diseñar políticas e instrumentos de formalización, protección social e integración productiva, si se pretende fortalecer la economía circular sin reproducir vulnerabilidad laboral (Ferronato et al., 2022; Bolivia Verifica, 2024).

De manera que, la infraestructura industrial existe, pero su capacidad de transformar el flujo postconsumo se ve modulada por dos factores que atraviesan toda la cadena: la concentración espacial de plantas y la dependencia de redes de recolección donde el eslabón informal es decisivo. Por ello, cualquier estrategia de innovación en productos y servicios para el PET debe partir de esta estructura real: no basta con optimizar tecnología en planta si no se mejora la captación y la calidad del material en origen, ni si no se

construyen mecanismos de articulación entre municipios, empresas y recicladores que reduzcan pérdidas y eleven el valor del rPET producido (Ferronato et al., 2022; Marecbol, 2026; Empacar, 2026).

Tabla 2

Principales actores e infraestructura vinculada al reciclaje de PET en Bolivia

Tipo de actor	Actor / ubicación	Rol en la cadena	Evidencia reportada en fuentes	Implicación para el sistema
Transformador industrial (formal)	Marecbol – Pucarani, La Paz	Procesamiento industrial; conversión a productos/rPET	Experiencia >17 años; capacidad ~2.000 t/mes (declarada); divisiones productivas que incluyen PET (Marecbol, 2026)	Nodo clave en occidente; requiere abastecimiento estable y material con baja contaminación
Transformador industrial (formal)	Empacar – Santa Cruz	Procesamiento/fortalecimiento de cadena de sostenibilidad	Presencia como actor central en el manuscrito; información corporativa (Empacar, 2026)	Nodo relevante en oriente; introduce desafíos de logística interregional
Productor/embotellador con programas postconsumo	Embol – cobertura nacional	Captación/recuperación postconsumo	5.705 t recicladas (2023); 2.650 contenedores PET (Embol, 2023)	La captura depende de capacidad de terceros para procesamiento final; requiere coordinación

				con plantas
Recuperación primaria (informal)	Recicladores de base – La Paz	Recolección, segregación y acopio inicial	Estimación ~400 recolectores; precariedad y bajo reconocimiento (Bolivia Verifica, 2024)	Eslabón decisivo para volumen/calidad; clave para políticas de formalización e inclusión

Análisis del proceso tecnológico de transformación

El proceso de transformación del PET que predomina en las plantas bolivianas responde, en lo esencial, al reciclaje mecánico, aunque con variaciones que dependen de la capacidad instalada, del grado de automatización y, sobre todo, del mercado objetivo del material reciclado. En la práctica, el desempeño de esta ruta tecnológica se define por dos condiciones que atraviesan toda la cadena: la calidad del PET que llega a planta (nivel de contaminación, mezcla con otros polímeros, humedad, deterioro) y la consistencia de los controles de separación y limpieza antes de la extrusión. Esta idea es relevante para el caso paceño porque el flujo postconsumo estimado (Sección 4.1) solo puede convertirse en rPET competitivo si el sistema logra estabilizar calidad y abastecimiento, algo que depende tanto de la infraestructura industrial como de los arreglos de recuperación y acopio descritos en la Sección 4.2 (GAMLP, 2023; Ferronato et al., 2022).

En el contexto boliviano, el estudio de Ramírez Antezana (2022), desarrollado a partir del análisis de una planta transformadora en Sucre, permite observar esta complejidad a escala real y aporta una estructura operativa clara para entender el proceso. La transformación se organiza en tres macroetapas: (i) acopio y clasificación, (ii) acondicionamiento del material y (iii) conversión del insumo en una forma comercial (escama/pellet y productos). Un hallazgo metodológicamente importante del estudio es la distancia entre los balances de materia idealizados en la literatura y el comportamiento observado en operación, lo que obliga a interpretar la eficiencia del reciclaje no como un valor fijo, sino como un resultado dependiente de condiciones locales: composición del residuo, contaminación, infraestructura disponible y disciplina de control de calidad (Ramírez Antezana, 2022).

La primera macroetapa —acopio y clasificación— determina el "techo" de calidad del rPET. Cuando el material ingresa mezclado con otros polímeros o con residuos adheridos, los costos de acondicionamiento aumentan y, en paralelo, se reduce el rendimiento del proceso. Por ello, la clasificación no debe entenderse como una operación meramente logística, sino como un filtro técnico. En condiciones industriales, la separación de elementos ajenos al PET (metales y, especialmente, plásticos como PP y PE asociados a tapas, etiquetas y accesorios) es decisiva para evitar defectos posteriores. El punto central es que el reciclaje mecánico tolera mal la contaminación: pequeñas fracciones de polímeros ajenos pueden afectar color,

estabilidad térmica y comportamiento reológico del material, limitando aplicaciones y reduciendo valor comercial (Ramírez Antezana, 2022).

La segunda macroetapa —acondicionamiento— incluye la reducción de tamaño (trituración a escama), el lavado y los mecanismos de separación que buscan retirar impurezas persistentes. En este tramo aparecen algunos de los cuellos de botella más frecuentes del reciclaje mecánico: las etiquetas y adhesivos, por ejemplo, tienden a comportarse como contaminantes difíciles porque pueden fragmentarse, adherirse a la escama o permanecer como residuos que alteran la pureza final. En el mismo sentido, la presencia de componentes no PET (tapas y anillos) obliga a aplicar separaciones físicas consistentes y a sostener controles de calidad verificables, porque la contaminación residual se expresa directamente en el producto final (Ramírez Antezana, 2022). En términos de operación, esto explica por qué plantas con equipamiento similar pueden entregar rPET con calidades distintas: no es solo "tener línea", sino sostener una limpieza efectiva y un sistema estable de segregación (Ramírez Antezana, 2022).

La tercera macroetapa —conversión— se materializa en la extrusión y peletización (o en transformaciones posteriores), donde el material se homogeniza y adopta una forma estándar para su comercialización y uso industrial. En esta fase, la calidad obtenida en clasificación y acondicionamiento se vuelve irreversible: impurezas remanentes pueden traducirse en variabilidad del producto y en limitaciones de desempeño para manufactura. Esto es especialmente importante cuando el rPET se pretende destinar a usos de mayor exigencia, ya que la variación en propiedades puede afectar la estabilidad del proceso de transformación y el comportamiento del producto final. Estudios de caracterización de productos extruidos a partir de PET reciclado muestran, precisamente, que el desempeño del material depende de condiciones de procesamiento y de la calidad del insumo, reforzando la idea de que la extrusión "no corrige" problemas aguas arriba, sino que los evidencia (Muñoz-Chichande et al., 2021; Ramírez Antezana, 2022).

Este análisis permite introducir una distinción crucial para la discusión de innovación: no todo rPET es equivalente. Cuando el sistema opera con controles limitados, el rPET tiende a orientarse a aplicaciones de menor exigencia (ciclo abierto), mientras que el salto hacia esquemas de mayor valor —incluido el circuito "bottle-to-bottle" y el objetivo de contacto alimentario— exige niveles superiores de separación, descontaminación, trazabilidad y control del proceso. En términos prácticos, esto implica que la transición hacia estándares "food-grade" no se resuelve con una mejora puntual, sino con un conjunto coherente de inversiones y procedimientos que abarcan desde la calidad del acopio hasta tecnologías de procesamiento y aseguramiento de calidad. Experiencias industriales reportadas para escalamiento "bottle-to-bottle" muestran la centralidad de estas condiciones para sostener la calidad requerida en reciclaje de botellas (Starlinger, 2024).

En el caso boliviano —y específicamente para la discusión aplicada a La Paz— esta brecha tecnológica se cruza con la estructura del sistema de recuperación. Dado que una parte significativa de la captación primaria descansa en redes donde participan recicladores de base, la mejora de la calidad del PET no depende exclusivamente de la planta transformadora: requiere instrumentos de articulación que reduzcan contaminación desde origen, fortalezcan el acopio y estabilicen el flujo material. La literatura sobre gestión de residuos y economía circular en La Paz ha destacado que la consolidación del reciclaje necesita mecanismos de cooperación y gobernanza que integren infraestructura, incentivos y actores, con énfasis en sostenibilidad y condiciones sociales del eslabón de recuperación (Ferronato et al., 2022; Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural, 2025).

Tabla 3

Macroetapas del reciclaje mecánico de PET y puntos críticos de control

Macroetapa	Propósito técnico	Riesgos típicos en operación	Punto crítico de control (qué debe asegurarse)	Fuente base
Acopio y clasificación	Aislar el flujo PET y reducir ingreso de impurezas	Mezcla con otros polímeros; ingreso de metales; alta variabilidad del material	Segregación consistente del PET y retiro temprano de contaminantes	Ramírez Antezana (2022)
Acondicionamiento (trituración + lavado + separación)	Retirar residuos adheridos y minimizar contaminación remanente	Etiquetas/adhesivos persistentes; fracciones PP/PE asociadas a tapas/etiquetas; pérdida de pureza	Eficiencia de lavado y separación; control de contaminación cruzada	Ramírez Antezana (2022)
Conversión (extrusión/peletización y transformaciones posteriores)	Homogeneizar y convertir en rPET utilizable	Variabilidad de propiedades; defectos por impurezas remanentes; limitación de aplicaciones	Control de calidad del insumo y del proceso; consistencia del rPET	Muñoz-Chichande et al. (2021); Ramírez Antezana (2022)
Escalamiento a mayor valor (p. ej., "bottle-to-bottle")	Alcanzar calidad más exigente y trazable	Requisitos estrictos de descontaminación y control; mayores costos	Trazabilidad, pureza y aseguramiento de calidad a lo largo de la cadena	Starlinger (2024)

El panorama internacional del reciclaje de botellas PET muestra una expansión sostenida, aunque las estimaciones de crecimiento varían según la fuente y, sobre todo, según si se mide el mercado de "reciclaje de PET" en general o segmentos específicos (equipos, rPET grado alimentario, etc.). Por ejemplo, reportes comerciales sitúan el crecimiento del mercado de reciclaje de botellas PET en rangos de alrededor de 5–6% anual para la presente década, impulsado por demanda de rPET para envases y fibras, además de presiones regulatorias y compromisos corporativos (Market Research Future, 2023/2024; DataIntelo, 2023/2024). En ese marco, el impulso más visible se concentra en dos frentes: (i) aumentar la eficiencia de separación y la pureza del material en la etapa de clasificación y (ii) habilitar aplicaciones de alto valor, particularmente el circuito "bottle-to-bottle" bajo requisitos de inocuidad y trazabilidad.

Una primera línea de innovación se ubica en la clasificación avanzada. El uso de espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIR) e imágenes hiperespectrales, combinado con modelos de aprendizaje automático, ha demostrado capacidad para mejorar la identificación y separación de polímeros en flujos mixtos, elevando el desempeño de la clasificación en entornos industriales. En la literatura se reportan modelos de discriminación y plataformas de clasificación basadas en NIR/hiperespectral que alcanzan niveles de identificación muy altos en condiciones experimentales e industriales, lo que confirma el potencial de estas tecnologías para reducir contaminación cruzada y estabilizar la calidad del insumo reciclable (Zheng et al., 2018; Sormunen et al., 2021). Sin embargo, es importante precisar el alcance: estas herramientas mejoran la separación por polímero y ciertas características del material, pero el salto hacia "grado alimentario" no depende de un algoritmo por sí solo, sino del conjunto del sistema (calidad del acopio, pretratamiento, descontaminación y control de proceso). En otras palabras, la inteligencia artificial puede robustecer el "front-end" de la planta, pero no sustituye los requisitos de descontaminación exigidos para contacto alimentario.

Una segunda línea de innovación —con creciente visibilidad— corresponde al reciclaje químico (despolimerización). A diferencia del reciclaje mecánico, estos procesos buscan recuperar monómeros o intermediarios para repolimerizar, lo que, en principio, permite gestionar fracciones más degradadas o complejas. En términos regulatorios y de seguridad para uso alimentario, existen precedentes donde procesos químicos (por ejemplo, glicólisis) han recibido evaluaciones o reconocimientos para aplicaciones de contacto con alimentos en EE. UU. mediante el esquema de No Objection Letters (NOL), lo que evidencia que, bajo ciertas condiciones, estas rutas pueden insertarse en cadenas de alto valor (FDA, s. f.; FDA—Recycled Plastics submissions). No obstante, su adopción suele estar condicionada por costos, exigencias energéticas, disponibilidad de escala y estabilidad del suministro, por lo que su pertinencia para Bolivia requiere un análisis de viabilidad (técnico–económica–logística) más allá del atractivo conceptual.

Una tercera línea —central para economía circular— es el reciclaje horizontal "bottle-to-bottle", que persigue producir rPET apto para fabricar nuevas botellas con garantías de seguridad. En Europa, el marco regulatorio aplicable se vincula a la evaluación de procesos de reciclaje para materiales en contacto con alimentos, y la Comisión Europea establece requisitos específicos mediante la Regulación (UE) 2022/1616; en paralelo, EFSA evalúa la seguridad de procesos de reciclaje (especialmente mecánicos de PET postconsumo) antes de su uso en envases alimentarios (EU 2022/1616; EFSA, 2026). Este contexto muestra que "food-grade" no es una etiqueta comercial: implica evidencia de descontaminación, límites sobre fracciones no alimentarias en el input, control de proceso y aseguramiento de calidad. De hecho, existen Opiniones Científicas publicadas para procesos basados en tecnologías industriales específicas (por ejemplo, Starlinger iV+) en evaluaciones de seguridad para uso alimentario, lo que permite entender el tipo

de estándar técnico que debe cumplirse si se pretende orientar el rPET hacia envases (Lambré et al., 2021; Lambré et al., 2023).

En paralelo, emergen soluciones de trazabilidad para sostener transparencia y control del material reciclado a lo largo de la cadena. En la práctica, las propuestas tecnológicas abarcan desde blockchain y esquemas de tokenización/incentivos hasta modelos de pasaporte digital de producto (DPP) y sistemas de trazabilidad material que buscan reducir "reciclaje defectuoso" y mejorar la rendición de cuentas en sistemas circulares (Wankmüller et al., 2023; Gazeau et al., 2024; Rumetshofer et al., 2024). Esta línea es particularmente relevante cuando el sistema depende de múltiples actores (recolectores, acopios, municipios, plantas), porque permite vincular calidad, origen y destino del material con reglas verificables. Aun así, su adopción real suele depender de gobernanza, incentivos y capacidad de digitalización: sin un diseño institucional adecuado, la herramienta no se sostiene por sí misma.

Para el caso boliviano, estas innovaciones deben leerse como un menú de opciones y no como una receta universal. Dado que la mayor parte del rPET nacional tiende a orientarse hacia usos no alimentarios, el reto no es solo "incorporar tecnología", sino construir condiciones para elevar el valor agregado: mejorar la separación y el acopio para disminuir contaminación, fortalecer procesos de limpieza y control de calidad, y establecer mecanismos de trazabilidad que permitan certificar consistencia del material. En ese sentido, las innovaciones globales resultan pertinentes en la medida en que se adapten a la escala real del flujo disponible, a la concentración de infraestructura, y a la estructura dual de recolección descrita en Bolivia. (Esta conexión se profundiza en la sección de propuestas.

Tabla 4

Innovaciones tecnológicas emergentes y su pertinencia operativa para la cadena PET

Innovación	Qué problema resuelve	Qué exige para funcionar bien	Evidencia/soporte (ejemplos)	Pertinencia para Bolivia/La Paz
Clasificación avanzada (NIR/hiperespectral + ML)	Reduce contaminación cruzada y mejora pureza del flujo PET	Flujos relativamente estables, calibración, mantenimiento, integración con línea	Modelos NIR/hiperespectral y discriminación con alto desempeño en clasificación (Zheng et al., 2018; Sormunen et al., 2021)	Alta, como mejora incremental del "front-end" si se asegura acopio y mantenimiento
Reciclaje químico	Maneja fracciones	Escala, energía,	Precedentes de	Media, sujeto a

(despolimerización)	complejas/degradadas; potencial para calidad alta tras repolimerización	control de impurezas, viabilidad económica	evaluaciones/NOL para procesos de reciclaje químico en PET (FDA submissions)	TEA y a estabilidad de suministro; más viable como fase futura o alianzas regionales
"Bottle-to-bottle" con super-limpieza y QA	Habilita rPET para envases con requisitos de inocuidad	Input controlado, límites sobre no-food, descontaminación validada, QA robusto	Regulación UE 2022/1616; evaluación EFSA de procesos PET; opiniones científicas para tecnologías específicas (EFSA; EU 2022/1616; Lambré et al., 2021, 2023)	Media–alta, pero exige fortalecer acopio, trazabilidad y control de calidad a nivel de sistema
Trazabilidad (blockchain, tokenización, DPP)	Transparencia, rendición de cuentas, reducción de pérdidas y "reciclaje defectuoso"	Gobernanza, incentivos, digitalización de actores, estándares de datos	Tokenización en cadenas de botellas (Wankmüller et al., 2023); sistemas de trazabilidad material (Gazeau et al., 2024); DPP para trazabilidad (Rumetshofer et al., 2024)	Media, útil si acompaña instrumentos económicos (incentivos/REP) y acuerdos entre actores

DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la generación de residuos PET en La Paz es materialmente relevante para la planificación de una cadena de recuperación y valorización. A partir de la caracterización municipal y del volumen anual de residuos sólidos, se estimó un rango de 3.000–4.500 t/año de PET, con una generación per cápita de 4–6 kg/hab/año. Este hallazgo ubica al PET como un flujo con escala suficiente

para justificar intervenciones que trasciendan acciones puntuales y se orienten a mejoras sistémicas en recolección, acopio y transformación.

Sin embargo, la magnitud del flujo no se traduce automáticamente en recuperación efectiva ni en valorización de alto valor agregado. La evidencia reunida describe una estructura de reciclaje dual, donde el sector formal concentra infraestructura de transformación en pocos nodos y el sector informal sostiene gran parte de la captación primaria. En este marco, el principal cuello de botella no debe interpretarse únicamente como "capacidad industrial", sino como capacidad de asegurar calidad del material desde el origen: segregación, disminución de contaminación, estabilidad del suministro y trazabilidad mínima. Estudios empíricos sobre La Paz destacan que la sostenibilidad de los sistemas urbanos de residuos depende de arreglos de gobernanza y cooperación que integren a los actores que ya operan en el territorio, especialmente cuando el reciclaje descansa en redes informales.

En la dimensión social, la dependencia del eslabón informal plantea un dilema que debe ser abordado sin ambigüedades analíticas: el sistema requiere a los recicladores de base para capturar material, pero simultáneamente tiende a reproducir condiciones precarias cuando no existen mecanismos de formalización, seguridad y reconocimiento. El dato reportado para La Paz (≈400 recolectores de base) y la evidencia sobre precariedad y falta de reconocimiento refuerzan la necesidad de políticas de reciclaje inclusivo como condición habilitante del desempeño ambiental; no como un componente accesorio. Este punto converge con la literatura especializada sobre gestión de residuos en La Paz, que documenta tensiones entre eficiencia material, justicia social y gobernanza local.

Desde el punto de vista tecnológico, la hegemonía del reciclaje mecánico en Bolivia ofrece una ruta operativa realista, pero con límites claros cuando el objetivo es elevar el valor agregado del rPET o avanzar hacia aplicaciones exigentes. La evidencia de planta analizada por Ramírez Antezana (2022) muestra que la operación a escala real introduce discrepancias frente a balances idealizados y que la calidad final depende críticamente de la separación de contaminantes (etiquetas, tapas, PP/PE y otras impurezas) en etapas previas a la extrusión. En consecuencia, la discusión sobre "mejor tecnología" debe formularse con precisión: antes de saltar a rutas avanzadas, el rendimiento del sistema puede mejorar de manera sustantiva fortaleciendo la captura y la calidad del insumo, así como los controles en clasificación, lavado y separación.

Aun así, el incremento del valor del material requiere analizar la brecha entre usos no alimentarios y el potencial de circuitos "bottle-to-bottle". Las experiencias industriales citadas en el manuscrito muestran que el "grado alimentario" no es un atributo espontáneo del rPET, sino el resultado de requisitos estrictos de control del input, descontaminación y aseguramiento de calidad sostenido. En el contexto boliviano, el texto identifica que la mayor proporción del rPET se orienta a aplicaciones no alimentarias, lo cual implica una pérdida de valor agregado potencial y limita la competitividad en mercados donde la trazabilidad y la calidad son crecientemente exigentes. En esta sección conviene sostener el argumento con un matiz metodológico clave: la revisión documental utilizada no permite confirmar públicamente la adopción de purificación avanzada, líneas "super-clean" o rutas químicas a escala industrial en el país, por lo que cualquier afirmación sobre ausencia/presencia de estas tecnologías debe presentarse como un resultado condicionado por la evidencia disponible (y no como un hecho absoluto).

En la dimensión de actores, el manuscrito identifica una concentración de infraestructura industrial alrededor de empresas como Marecbol (La Paz) y Empacar (Santa Cruz), así como esquemas de recolección corporativa asociados a Embol. No obstante, la discusión debe ser cuidadosa al inferir una "brecha entre generación y capacidad formal": la información corporativa disponible reporta, por ejemplo, una

capacidad de transformación de 2.000 t/mes de material plástico (no necesariamente PET) en el caso de Marecbol, y métricas de recuperación de Embol para 2023 (5.705 t y 2.650 contenedores), pero estas cifras no bastan para reconstruir un balance nacional de capacidad efectiva de PET ni su nivel real de utilización. Por ello, el aporte más sólido de los resultados no es cuantificar un déficit industrial, sino evidenciar concentración espacial, dependencia de redes de acopio y necesidad de coordinación entre captación y transformación para evitar pérdidas por contaminación y dispersión del flujo.

El marco normativo ofrece una base para intervenir estas brechas, pero los resultados sugieren una distancia entre principios y ejecución. La Ley N.° 755 (2015) establece un marco de gestión integral y se alinea con el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), mientras que el debate legislativo del PL-353-2023-2024 apunta a metas y reducción de plásticos de un solo uso. Sin embargo, la discusión debe traducir "vacíos de implementación" en mecanismos observables: ausencia de metas obligatorias verificables, falta de instrumentos económicos estables para financiar recuperación, y debilidad de sistemas de reporte, auditoría y sanción que conviertan la REP en desempeño material. En términos prácticos, sin instrumentos de cumplimiento, el sistema tiende a quedar en iniciativas fragmentarias o voluntarias, lo que reduce su capacidad de escalar y estabilizar resultados.

A partir de este conjunto de hallazgos, la implicación principal es que la mejora del reciclaje de PET en La Paz debe concebirse como una intervención de cadena completa: (i) aumentar captura y calidad del material desde la fuente mediante infraestructura de acopio y reglas claras de segregación; (ii) fortalecer la coordinación entre municipios, programas corporativos y plantas de transformación, de modo que la captación se traduzca en procesamiento de calidad; y (iii) formalizar e integrar progresivamente a recicladores de base con medidas de seguridad, capacitación y reconocimiento, dado su rol estructural en la recuperación. Estas orientaciones son consistentes con enfoques de transición hacia economía circular y con recomendaciones sectoriales que priorizan articulación institucional, desarrollo de mercados y fortalecimiento de capacidades para circularidad industrial.

Este estudio presenta limitaciones que deben explicitarse para evitar sobre-interpretaciones. En primer lugar, el análisis se basa en fuentes secundarias (institucionales, científicas y corporativas), por lo que no mide directamente tasas reales de captura, composición del flujo recolectado ni utilización efectiva de capacidad instalada. En segundo lugar, los datos corporativos se emplean como evidencia descriptiva de infraestructura y estrategias, pero no sustituyen verificaciones independientes sobre volúmenes procesados de PET, rendimientos o estándares logrados. Finalmente, la estimación del flujo PET (3.000–4.500 t/año) es un intervalo dependiente de la caracterización municipal y del rango anual de residuos sólidos, por lo que su precisión está condicionada por la representatividad temporal y metodológica de esas fuentes.

Como líneas futuras, se recomienda complementar el enfoque documental con: (a) mediciones directas de composición y contaminación del PET en puntos de acopio; (b) estimación de tasas de captura por zona y actor (municipal, corporativo, reciclador de base); y (c) evaluación tecnoeconómica comparada de escenarios de mejora incremental (clasificación y control de calidad) frente a escenarios de escalamiento a circuitos de mayor valor (p. ej., "bottle-to-bottle"). Esto permitiría convertir el diagnóstico estratégico en una hoja de ruta cuantificada, priorizando inversiones e instrumentos de política según impacto esperado y viabilidad institucional.

CONCLUSIONES

El estudio permitió dimensionar el flujo de residuos PET en la ciudad de La Paz y, con ello, sostener que se trata de un material estratégicamente relevante para la economía circular local. A partir de fuentes institucionales, se estimó una generación anual aproximada de 3.000 a 4.500 toneladas de PET (equivalente a 4–6 kg/hab/año), lo que confirma que existe una base material suficiente para fortalecer una cadena de valorización si se intervienen los puntos críticos del sistema. En paralelo, el análisis evidenció que el desempeño del reciclaje no depende solo del volumen generado, sino de la capacidad de convertirlo en insumo con calidad estable, condición que se ve modulada por la estructura real de la cadena y por la contaminación del material postconsumo.

La caracterización de actores mostró un sistema dual, donde la captación primaria descansa de manera significativa en recicladores de base y la transformación industrial se concentra en pocos nodos. Esta configuración explica por qué la mejora tecnológica en planta, por sí sola, no garantiza resultados: la calidad del rPET está condicionada por la segregación y el acopio, así como por controles consistentes de clasificación, lavado y separación durante el reciclaje mecánico. En ese sentido, las oportunidades más inmediatas para elevar el valor agregado del PET en La Paz se ubican en fortalecer infraestructura de acopio, reducir contaminación desde el origen, mejorar coordinación entre actores (municipio–programas corporativos–industria) y avanzar gradualmente hacia estándares más exigentes (por ejemplo, esquemas tipo "bottle-to-bottle"), siempre que se aseguren trazabilidad y control de calidad a nivel de sistema.

El trabajo presenta limitaciones asociadas al uso de fuentes secundarias, lo que impide estimar con precisión tasas reales de captura, niveles de contaminación del PET en puntos de acopio y utilización efectiva de capacidades industriales. Por ello, se recomienda complementar este diagnóstico con mediciones directas de composición y calidad del PET por zonas, así como con evaluaciones tecnoeconómicas de escenarios (mejoras incrementales en reciclaje mecánico versus rutas avanzadas y requisitos para aplicaciones de mayor valor). En conjunto, los hallazgos sostienen que cerrar el ciclo del PET en La Paz es técnicamente plausible, pero exige una intervención integrada que combine tecnología, gobernanza e inclusión social para convertir un flujo ambientalmente problemático en una cadena de valor estable y sostenible.

REFERENCIAS

Angulo Martínez, L. M. (2022). El reciclado del polietileno de tereftalo y su aporte a la economía circular. https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstreams/b2182cb1-370f-4836-9ae8-63a13f99e23b/download

Blanco Romero, A. (2025). *Evaluación de la circularidad de envases de polietileno de alta densidad: cuantificación del contenido de pp, eliminación de contaminantes y reciclaje en ciclo abierto* (Doctoral dissertation, Universidad Rey Juan Carlos). https://burjcdigital.urjc.es/items/fb33125d-d231-463f-b9a4-9b674a33a65b

Corrales, H. N. C., Real, E. A. T., Llaves, M. C. M., Villarroel, J. G. P., & Rocha, J. H. A. (2025). Recycled and waste materials in construction in Bolivia: A systematic literature review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *10*(2), 108. https://doi.org/10.1007/s41024-025-00615-7

Criales, J. V. (2023). El largo funeral del río. La deposición de basura en la ciudad de La Paz (Bolivia) en perspectiva histórica. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia* (40), 35-54. https://doi.org/10.11606/issn.2448-1750.revmae.2023.190123

Empacar. (2026). *Empacar fortalece la cadena productiva de la sostenibilidad*. https://www.empacar.com.bo

European Commission. (2022, 15 septiembre). *Commission Regulation (EU) 2022/1616 of 15 September 2022 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods, and repealing Regulation (EC) No 282/2008*. EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/1616/oj/eng

European Food Safety Authority. (2021). *Safety assessment of the process ESTERPET, based on Starlinger iV+ technology, used to recycle post-consumer PET into food contact materials*. *EFSA Journal, 19*(8), Article e6789. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6789

Ferronato, N., Lizarazu, EGG, Vargas, DJV, Pasinetti, R., y Torretta, V. (2022). Investigación sobre la perspectiva de los recicladores de residuos sólidos en La Paz, Bolivia. *Hábitat Internacional*, *123* , 102542. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102542

Ferronato, N., Pasinetti, R., Valencia Vargas, D., Calle Mendoza, IJ, Guisbert Lizarazu, EG, Gorritty Portillo, MA, ... & Torretta, V. (2022). Economía circular, cooperación internacional y gestión de residuos sólidos: un proyecto de desarrollo en La Paz (Bolivia). *Sostenibilidad*, *14* (3), 1412. https://doi.org/10.3390/su14031412

Garnica, SBV y Villegas, REV (2022). Diseño, producción y colocación de mezcla asfáltica en caliente con adición de plásticos de residuos-estudio de caso de Bolivia. *Revista Investigación & Desarrollo*, *22* (1). https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-2i

Gazeau, B., Zaman, A., Minunno, R., & Shaikh, F. (2024). Developing traceability systems for effective circular economy of plastic: A systematic review and meta-analysis. *Sustainability*, *16*(22), 9973. https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9973

Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. (2023). *Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos*. La Paz: GAMLP. https://lapaz.bo/wp-content/uploads/2023/11/Estudio-de-Caracterizacion-de-residuos-solidos-La-Paz.pdf

Guerrero Calderon, S. A., & Solano Orellano, V. V. (2025). Viabilidad del pet reciclado en morteros para fabricacion aditiva: análisis bibliográfico hacia una cnstruccion sostenible. https://repositorio.cuc.edu.co/entities/publication/035511e5-8799-4146-8bbf-6fb0f510fa4c

Instituto Nacional de Estadística. (2024). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2024: Resultados preliminares*. La Paz: INE Bolivia. https://cpv2024.ine.gob.bo/

Intel Market Research. (2025). *PET Bottle Recycling Solution Market Outlook 2025-2032*. Recuperado de https://www.intelmarketresearch.com

Intel Market Research. (2025, 22 septiembre). *PET bottle recycling solution market outlook 2025–2032*. https://www.intelmarketresearch.com/pet-bottle-recycling-solution-market-7239

Juan Rodríguez, R. (2022). *Nuevas oportunidades del polietileno reciclado para la transición hacia una Economía Circular*. (Doctoral dissertation, Universidad Rey Juan Carlos). https://burjcdigital.urjc.es/items/533da961-5e16-4a22-9485-75fbf4649a36

Ley N° 755, del 28 de octubre de 2015, Ley de Gestión Integral de Residuos, Estado Plurinacional de Bolivia. Recuperada de https://sea.gob.bo/digesto/CompendioII/N/142_L_755.pdf

Lozano Lazo, D., Gasparatos, A. (2022). Sostenibilidad de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos en ciudades bolivianas: Desafíos, oportunidades, respuestas e implicaciones para las vías de transición. En: Iossifova, D., Gasparatos, A., Zavos, S., Gamal, Y., Long, Y. (eds.) Infraestructura urbana. Serie Objetivos de Desarrollo Sostenible. Springer, Singapur. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8352-7_7

Marecbol. (2026). Soluciones en envases PET. https://www.marecbol.com

Market Research Future. (s. f.). *PET bottle recycling market research report – Global forecast 2032* (press release). Recuperado el 16 de marzo de 2026, de https://www.marketresearchfuture.com/press-release/pet-bottle-recycling-market

Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural. (2025). *Guía de economía circular para el sector industrial manufacturero*. La Paz: Ministerio de Desarrollo Productivo. https://produccion.gob.bo/wp-content/uploads/2025/09/GUIA-DE-ECONOMIA-CIRCULAR-.pdf

Muñoz-Chichande, A. D., Chalaco-Valle, M. X., & Areche-García, J. N. (2021). Descripción del comportamiento de una varilla de plástico reciclado de polietileno tereftalato (PET) extruido. *Polo del Conocimiento*, *6*(4), 295-314. https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2563

Ochoa Mendoza, A. (2005). *Reciclado mecánico de materiales compuestos con fibras de celulosa* (Doctoral dissertation, Industriales). https://oa.upm.es/341

Ramírez Antezana, A. V. (2022). Reciclaje de tereftalato de polietileno. *Revista Ingeniería*, 6(14), 47-63. https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i14.90

Rumetshofer, T., Straka, K., & Fischer, J. (2024). How the digital product passport can lead the plastics industry towards a circular economy—A case study from bottle caps to frisbees. *Polymers, 16*(10), 1420. https://doi.org/10.3390/polym16101420

Starlinger. (2024). PAAG: Scaling up PET bottle-to-bottle recycling in Türkiye. Recuperado de https://www.starlinger.com/en/news/detail/detail/paag-scaling-up-pet-bottle-to-bottle-recycling-in-tuerkiye

Suárez, J. C., García, L. J., Vergara, A. N., Taboada, A. V., Choque, G. C. R., & Alvis, N. S. (2022). El consumo de los productos plásticos en las principales ciudades de Bolivia. *Revista 3i Ingeniería, Innovación, Investigación*, 1(1), 43-50. https://doi.org/10.70448/revista3i.v1i1.140

Suntory Holdings. (2021). *Sustainability | Recycle: Promote "Bottle to Bottle" Horizontal Recycling*. Recuperado de https://www.suntory.com/sustainability/env_circular/recycle

Trujillo, H. G. (2024). Generación de residuos alimenticios urbanos en Tarija Bolivia: ¿Una oportunidad de economía circular? *Global Crossings*, 1(2), 222-234. https://doi.org/10.69818/gc.v1.n2.222-234.2024

U.S. Food and Drug Administration. (2020, 5 octubre). *Recycled plastics in food packaging*. https://www.fda.gov/food/packaging-food-contact-substances-fcs/recycled-plastics-food-packaging

U.S. Food and Drug Administration. (2021, 15 julio). *Guidance for industry: Use of recycled plastics in food packaging (chemistry considerations)*. https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-

guidance-documents/guidance-industry-use-recycled-plastics-food-packaging-chemistry-considerations

U.S. Food and Drug Administration. (s. f.). *Submissions on post-consumer recycled (PCR) plastics for food-contact articles*. Recuperado el 16 de marzo de 2026, de https://cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=RecycledPlastics

Wankmüller, C., Pulsfort, J., Kunovjanek, M., Polt, R., Craß, S., & Reiner, G. (2023). Blockchain-based tokenization and its impact on plastic bottle supply chains. *International Journal of Production Economics, 257*, 108776. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108776

WWF-Servicios Ambientales. (2021). Diagnóstico sobre la producción, uso y disposición final de plásticos de un solo uso en Bolivia. La Paz: WWF Bolivia. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/diagnostico_plasticos_de_un_solo_uso_wwf_bolivia.pdf

Zheng, Y., Bai, J., Xu, J., Li, X., & Zhang, Y. (2018). A discrimination model in waste plastics sorting using NIR hyperspectral imaging system. *Waste Management, 72*, 87–98. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.015

CONFLICTO DE INTERÉS

No posee conflictos de intereses.

FINANCIAMIENTO

El artículo no tiene financiamiento

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD AUTORAL

Antonio Ticona Condori: Conceptualización: Curación de datos: Análisis formal: Investigación: Metodología: Gestión del proyecto: Recursos: Supervisión: Validación: Visualización: Redacción – borrador original: Redacción, revisión y edición.