

RESEARCH ARTICLE

Reciclado de bidones HDPE (Polietileno de alta densidad) como implemento para barredoras mecánicas.

Eduardo Francisco Díaz Apolo ¹  Nayeli Micaela Pereira Cabrera ¹  Priscilla Carolina Mora Aguirre ³  Luis Ángel Vargas Collaguazo ¹ 

¹ Universidad Técnica de Machala, Machala, El Oro, Ecuador.



Correspondencia: ediaz4@utmachala.edu.ec



+ 593 09 6802 7517

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj93344>

Resumen: La presente investigación evaluó la viabilidad técnica, económica y ambiental de fabricar cerdas para barredoras mecánicas mediante la reutilización de bidones de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado, bajo un enfoque de economía circular. Se aplicó una metodología cuantitativa con diseño cuasi experimental, desarrollada en tres fases: experimentación del producto, análisis económico y evaluación ambiental. Los resultados demostraron que el HDPE reciclado posee las propiedades necesarias para la fabricación de cerdas funcionales, alcanzando un aprovechamiento del 33,5 % del peso útil del material y del 82 % de la superficie funcional del envase. El análisis económico evidenció la rentabilidad del proyecto, con un margen neto del 28,57 % y un periodo de recuperación de la inversión de aproximadamente tres meses. Desde el punto de vista ambiental, el proceso presentó una baja huella hídrica, un consumo energético moderado y la incorporación del 99,51 % de material reciclado en el producto final. Se concluye que esta alternativa favorece el aprovechamiento de residuos plásticos y constituye una opción técnica, económica y ambientalmente sostenible para fortalecer la economía circular.

Palabras claves: Economía circular, Polietileno de alta densidad (HDPE), Reciclaje de plásticos, Valorización de residuos, Sostenibilidad ambiental.

Recycling of HDPE (high-density polyethylene) drums as attachments for mechanical sweepers.

Abstract: This study evaluated the technical, economic, and environmental feasibility of manufacturing bristles for mechanical street sweepers using recycled high-density polyethylene (HDPE) water containers under a circular economy approach. A quantitative, quasi-experimental, and comparative methodology was applied through three stages: product development, economic assessment, and environmental evaluation. The results demonstrated that recycled HDPE has suitable properties for manufacturing functional bristles, achieving the recovery of 33.5% of the material weight and 82% of the functional surface of the containers. The economic analysis confirmed the project's profitability, with a net profit margin of 28.57% and an investment payback period of approximately three months. From an environmental perspective, the process showed a low water footprint, moderate energy consumption, and incorporated 99.51% recycled material into the final product. The findings indicate that this alternative promotes plastic waste recovery and represents a technically feasible, economically profitable, and environmentally sustainable strategy that supports the principles of the circular economy.



Check for updates

Cita: Díaz Apolo, E.F.; Pereira Cabrera, N.M.; Mora Aguirre, P.C.; Vargas Collaguazo, L.A. (2026) "Reciclado de bidones HDPE (Polietileno de alta densidad) como implemento para barredoras mecánicas" Green World Journal, 9(3)344. <https://doi.org/10.53313/gwj93344>

Received: 02/Agosto /2026

Accepted: 28/Agosto /2026

Published: 05/Septiembre/2026

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.

Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial

editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2026 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Keywords: Circular economy; High-density polyethylene (HDPE); plastic recycling; Waste valorization; Environmental sustainability.

1. Introducción

El desarrollo de la industria de los polímeros se remonta a los primeros monómeros identificados en la década de 1920, seguido por el avance de la polimerización, lo que permitió la expansión global de los plásticos como soluciones a múltiples necesidades[1].

En la actualidad, la producción supera los 400 millones de toneladas al año, y cerca de la mitad corresponde a plásticos de un solo uso[2]. De este total, aproximadamente 11 millones de toneladas terminan en ecosistemas acuáticos cada año [3], generando impactos ambientales y sociales cuyos costos se estiman entre 300.000 y 600.000 millones de dólares anuales[4].

A nivel global, la OCDE reporta que menos del 10 % de los residuos plásticos se recicla, lo que evidencia deficiencias estructurales en su gestión [5].

En el caso del Ecuador, la gestión de los residuos sólidos recae en los Gobiernos Autónomos Descentralizados, con una generación aproximada de 13.000 toneladas diarias, de las cuales el 11 % corresponde a plásticos[6].

Sin embargo, el problema no se limita a la generación de residuos, sino a la baja recuperación de materiales. Solo alrededor del 30 % de los municipios implementa procesos de reciclaje, por lo que cerca de la mitad de los desechos termina en rellenos sanitarios y aproximadamente un 20 % en zonas no adecuadas como ríos, mares, playas o áreas boscosas[7].

Economía circular y valorización de residuos

La economía circular surge como alternativa al modelo tradicional, buscando optimizar el uso de recursos y disminuir la generación de residuos [8]. Para ello, promueve la reducción del consumo de materias primas, el reciclaje y la valorización de productos y subproductos [9].

Su objetivo principal es extender el ciclo de vida de los recursos mediante su reutilización, reciclaje e incorporación nuevamente a procesos productivos [10]. No obstante, su efectividad depende en gran medida de su integración en la planificación institucional, la asignación presupuestaria y la participación activa de los distintos sectores sociales [11].

En Ecuador, la transición hacia este modelo ha incluido acciones orientadas a prevenir la generación de residuos, fortalecer la separación en origen y promover su valorización, con el fin de incrementar el aprovechamiento de materiales y reducir su disposición final [12]. Sin embargo, la gestión de residuos aún presenta limitaciones importantes, reflejadas en una tasa de reciclaje cercana al 6 %, lo que evidencia debilidades en los sistemas de recuperación y aprovechamiento[13].

Diversos estudios en América Latina señalan que la incorporación de materiales reciclados en servicios públicos y sistemas de gestión de residuos puede generar beneficios económicos, promover la innovación institucional y fortalecer la sostenibilidad urbana [14].

El polietileno de alta densidad (HDPE) se caracteriza por su durabilidad y uso en envases como bidones de agua, debido a su resistencia al impacto, baja absorción de humedad y estabilidad química [15]. Sin embargo, al finalizar su vida útil, la ausencia de sistemas adecuados de recuperación y reciclaje convierte estos beneficios en un problema ambiental [16].

Este escenario representa un reto ambiental por la persistencia de estos materiales en los ecosistemas y las limitaciones en su recolección y reciclaje, especialmente en países en desarrollo con infraestructura deficiente[17].

Limpieza urbana, material particulado y barredoras

El crecimiento urbano y el aumento de la contaminación han llevado a los gobiernos municipales a reforzar la gestión de residuos mediante el uso de maquinaria y tecnologías para la limpieza de espacios públicos[18].

En este contexto, las barredoras mecánicas han mejorado la eficiencia del barrido urbano, al incrementar la productividad y reducir el tiempo de las labores de aseo [19]. En la provincia de El Oro, el cantón Machala destaca por la incorporación de este tipo de tecnologías, combinando maquinaria autopropulsada en vías principales y brigadas manuales en zonas residenciales y de difícil acceso [20].

Sin embargo, esta modernización también incrementa la demanda de insumos como cepillos y rodillos, los cuales en su mayoría son importados y tienen una vida útil limitada por el desgaste con el pavimento y los

residuos[19]. A esto se suma la ausencia de producción nacional, lo que eleva los costos, genera retrasos en el abastecimiento y aumenta la dependencia de proveedores externos[21].

Por otro lado, las limitaciones presupuestarias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados restringen la ejecución de proyectos de saneamiento y ambientales, afectando la gestión de residuos, la limpieza urbana y el mantenimiento de equipos y maquinaria[22].

Desde el punto de vista técnico, el HDPE reciclado puede conservar propiedades funcionales, aunque con ciertas reducciones frente al material virgen, lo que permite su uso en aplicaciones no estructurales o de menor exigencia [23].

Estudios previos basados en ACV han reportado menores impactos asociados al empleo de polímeros reciclados frente a determinadas alternativas vírgenes [24,29]. No obstante, estos antecedentes se utilizan únicamente como referencia contextual y sus resultados no se extrapolan directamente al producto desarrollado en esta investigación, dado que el presente estudio no realizó un ACV comparativo.

El análisis ambiental permite conocer el consumo de recursos y la generación de residuos que se presentan durante un proceso productivo, además de identificar aspectos que pueden ser mejorados para reducir sus efectos sobre el ambiente [26,27]. En esta investigación, el análisis se enfocó en el proceso de fabricación de cerdas para barredoras mecánicas a partir de HDPE reciclado, considerando el consumo energético, la huella hídrica, la generación de residuos y el material reciclado incorporado. De esta manera, fue posible conocer el comportamiento ambiental del proceso y determinar el aprovechamiento del material reciclado durante la fabricación.

El proyecto propone reciclar bidones de agua para fabricar cepillos y evaluar su sostenibilidad económica, técnica y ambiental, comparando su rentabilidad; además del desempeño frente a un producto sustituto de cerdas a partir de polipropileno virgen.

2. Materiales y métodos

2.1 Metodología de la investigación

El proyecto de investigación empleó un enfoque cuantitativo debido al manejo de variables, la cuantificación de las mismas con un diseño cuasi-experimental definido por las prácticas experimentales de reciclado ejecutadas y de nivel comparativo que analizó el desempeño económico y ambiental del producto revalorizado.

El proyecto se ejecutó en el cantón Machala, provincia de El Oro, bajo la siguiente metodología:

- ✓ Fase 1: Experimentación del producto
- ✓ Fase 2: Análisis de desempeño y sostenibilidad económica
- ✓ Fase 3: Análisis de desempeño ambiental

El proceso de validación de resultados se realizó en cada una de las fases metodológicas mediante la comparación de los resultados obtenidos versus un grupo de control que corresponden a cepillos comerciales.

2.1.1 Fase I: Experimentación del producto

Se emplearon bidones de agua fabricados en polietileno de alta densidad (HDPE) como materia prima, de origen post-consumo, recolectados para su reutilización en la fabricación de cerdas para barredoras mecánicas. El HDPE es un polímero termoplástico semicristalino caracterizado por su adecuada resistencia mecánica, estabilidad química y procesabilidad térmica [26].

Los bidones utilizados presentaron una capacidad nominal de 20 L, una densidad comprendida entre 0,94 y 0,97 g/cm³ y una temperatura de fusión en el rango de 120 a 135 °C, con un espesor promedio estimado entre 1,5 y 3,0 mm. Estas propiedades permiten su transformación mediante procesos térmicos controlados para la obtención de elementos con mayor rigidez estructural.

Para el procesamiento del material se utilizó un sistema compuesto por un motor eléctrico de 3 HP (1.770 rpm) acoplado a un reductor de velocidad con salida de 600 rpm, una máquina cortadora equipada con cuchilla de acero al carbono de 1 × 2 cm con filo diagonal, un sistema de embobinado en carrete, un molde metálico de 20 cm de

longitud y un horno industrial a gas con capacidad útil de 1 m × 1 m. Se emplearon además herramientas manuales convencionales para las operaciones de corte y manipulación.

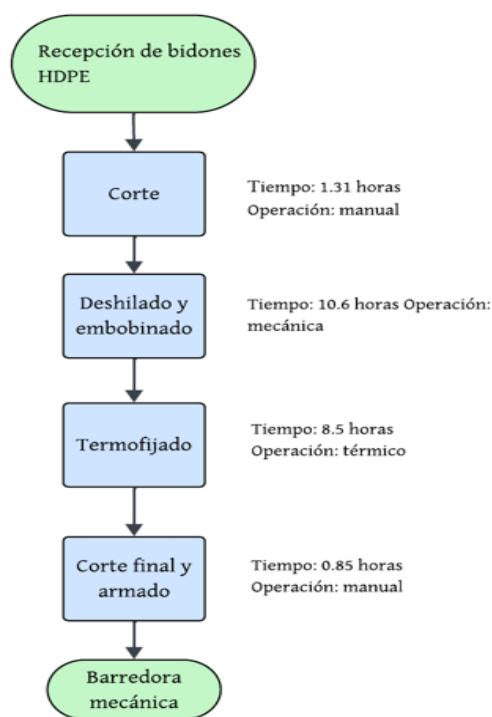
El material fue inicialmente acondicionado mediante la remoción de las secciones superior e inferior del bidón, obteniendo el cuerpo cilíndrico como materia prima. Posteriormente, las láminas de HDPE fueron alimentadas a la máquina cortadora para la obtención de monofilamentos continuos, controlando la velocidad de arrastre, la estabilidad del sistema y el estado del filo de la cuchilla, con el fin de asegurar uniformidad en la sección transversal.

Los monofilamentos se embobinaron bajo tensión controlada y se colocaron en un molde metálico de 20 cm para definir la geometría de las cerdas. Posteriormente, se realizó el termofijado a 120 °C durante 10 minutos, controlando la temperatura, el tiempo de exposición y la distribución del calor para estabilizar la forma y mejorar la rigidez del material.

Tras el enfriamiento a temperatura ambiente, los monofilamentos se cortaron a 30 cm, verificando la uniformidad dimensional y perpendicularidad del corte. El proceso permitió obtener cerdas de HDPE reciclado con propiedades adecuadas para su aplicación en barredoras mecánicas.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de la barredora mecánica a partir de bidones de HDPE reciclados, desde la recepción de la materia prima hasta el armado, incluyendo corte, deshilado-embobinado, termofijado y corte final, así como el tiempo y tipo de proceso empleado (manual, mecánico o térmico).

Figura 1. Diagrama de procesos



Fuente: Elaborado por los autores.

2.1.2 Fase II: Análisis de desempeño técnico y sostenibilidad económica

La fase dos comprende el análisis económico de la producción de la barredora mecánica mediante la reutilización de bidones de agua (HDPE). El análisis se elaboró bajo un enfoque cuantitativo-comparativo, mediante el cual se determinaron las variables más representativas de la viabilidad económica.

Se aplicó un análisis de costo-beneficio, mediante el cual se estableció el costo de producir versus el precio del mercado propuesto con el fin de evaluar no solo si el precio de venta cubre los costos de producción, sino también la rentabilidad que genera. Esto es relevante porque ayuda a definir si el precio aplicado garantiza una rentabilidad y si el precio puede ser competitivo en los mercados.

Los costos variables son relevantes debido a que varían de acuerdo a las unidades producción, por otro lado, los costos fijos, son los valores permanentes que se emplean cada vez que se produce.

Adicionalmente se incluyó una evaluación de la rentabilidad operativa para definir si el proyecto me genera pérdida o ganancia a través de las ecuaciones:

$$\text{Punto de equilibrio} = \frac{\text{costos fijos}}{\text{precio} - \text{costos variables}} \quad (1)$$

$$\text{Margen bruto} = \frac{\text{precio} - \text{costos variables}}{\text{precio}} \quad (2)$$

$$\text{Margen neto} = \frac{\text{utilidad}}{\text{ingresos}} \quad (3)$$

$$\text{utilidad} = \frac{\text{ingresos}}{\text{costos totales}} \quad (4)$$

El análisis económico-financiero incluyó el margen bruto, que representa la utilidad después de cubrir los costos de producción, y el margen neto, correspondiente a la utilidad final. Asimismo, se determinó el punto de equilibrio para establecer el nivel de producción en el que los ingresos cubren los costos totales. Para complementar la evaluación se calcularon el ROI, que mide el retorno de la inversión; el VAN, que determina el valor actual del proyecto considerando el tiempo; la TIR, que expresa su rentabilidad; y la contribución marginal (CM), que indica el aporte de cada unidad vendida a la utilidad.

La evaluación también incluyó una validación técnico-comparativa de las cerdas fabricadas con HDPE frente a cerdas comerciales de PP virgen, mediante ensayos de calidad para determinar su desempeño y competitividad respecto al producto convencional.

La caracterización comprendió resistencia a la tracción y elongación a rotura, deformación angular y recuperación elástica, rigidez y módulo flexural aparente mediante un modelo de viga en voladizo, así como esfuerzo de flexión, desgaste e impacto. Los ensayos se basaron principalmente en la normativa GB/T, correspondiente a China, país de procedencia de las cerdas comerciales utilizadas como referencia, complementándose con adaptaciones de normas ISO y ASTM para la determinación de resistencia a la tracción y elongación a rotura.

2.1.3 Fase 3: Evaluación de indicadores de desempeño ambiental del proceso

La evaluación ambiental desarrollada en esta investigación corresponde a una caracterización de indicadores de desempeño ambiental del proceso de fabricación y no a un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El alcance se delimitó a la etapa de transformación de los bidones de HDPE post-consumo en cerdas para barredoras mecánicas, considerando el consumo energético, consumo de agua, generación de subproductos y proporción de material reciclado incorporado.

Estas variables sustentan la eficiencia del proyecto, revelando el máximo aprovechamiento en los procesos de producción de la mano del ahorro de recursos como energía y agua, lo que enriquece al proyecto generando un proyecto económico de equilibrio con el medio ambiente y que puede ser empleado por la sociedad como fuente de trabajo.

Consumo energético

El desempeño energético del sistema fue evaluado considerando el consumo eléctrico y térmico asociado al procesamiento del material calculando el tiempo de consumo eléctrico por unidad de bidón HDPE para la reconstrucción de una barredora mecánica. Partiendo de la formula general:

$$E_{unidad} = \frac{(P_{el} * t_{el}) + (P_t * t_t)}{Q} \quad (5)$$

Donde:

P_{el} Representa la potencia eléctrica del equipo en kilovatios (kW)

t_{el} Representa el tiempo de operación de la maquina

P_t Representa energía utilizada en el proceso térmico en kilovatios (kW) o su equivalente térmico

t_t Representa el tiempo de operación de la maquina térmica

Huella hídrica

La evaluación de la huella hídrica se realizó mediante la observación directa de las etapas que conformaron el proceso de fabricación de las cerdas de HDPE reciclado, identificando la presencia o ausencia de consumo de agua dentro de las operaciones productivas. Para ello, se analizaron las actividades de corte (W_{corte}), deshilado ($W_{deshilado}$), embobinado ($W_{embobinado}$), termofijado ($W_{termofijado}$), y corte final ($W_{corte\ final}$), del material, verificando si existía utilización de agua para limpieza, enfriamiento o transformación del polímero.

Se calculó el consumo de agua total del proceso y se dividió por el número de las unidades producidas (Q) para determinar la huella hídrica por unidad de producto de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$HH_{unidad} = \frac{W_{corte} + W_{deshilado} + W_{embobinado} + W_{termofijado} + W_{corte\ final}}{Q} \quad (6)$$

Generación de residuos

La generación de residuos fue evaluada mediante la cuantificación del material plástico no aprovechado durante el acondicionamiento y transformación de los bidones HDPE. Para ello, se consideró el peso promedio de cada bidón y la cantidad de material efectivamente utilizada para la fabricación de las cerdas, planteado la siguiente fórmula de cálculo:

$$R_{unidad} = \frac{(P_{bidon} * N) - M_{utilizado}}{Q} \quad (7)$$

Donde:

R_{total} Representa el

P_{bidon} Representa el peso promedio de cada bidón (kg)

N Representa el número de bidones

$M_{utilizado}$ Representa el material usado en la barredora

Y finalmente

$$\%R = \frac{R_{total}}{M_{inicial}} * 100 \quad (8)$$

Aporte del material reciclado

El aporte del material reciclado fue determinado mediante la cuantificación de la cantidad de HDPE post-consumo incorporado al proceso productivo. Para ello, se registró el número total de bidones utilizados, el peso promedio individual y la proporción de material aprovechable destinada a la fabricación de las cerdas para barredoras mecánicas.

$$\%MR = \frac{M_{reciclado}}{M_{total}} * 100 \quad (9)$$

3. Resultados

3.1 Fase I: Experimentación del producto

La experimentación permitió determinar la viabilidad del HDPE reciclado como materia prima para la fabricación de cerdas de barredoras mecánicas. Del total de cada bidón de 600 g, aproximadamente 201 g correspondieron a material útil para el proceso, dando como resultado un aprovechamiento del 33,5%, requiriéndose 318 bidones para obtener el material plástico de una barredora espiral correspondiente a 63, kg, que se muestra en la ecuación del balance de materia (1), y (2).

$$\text{Materia prima} + \text{insumos} = \text{Producto final} \quad (1)$$

$$(B * p_b) + (p_a) = P_{final} + P_{proceso} \quad (2)$$

Donde:

B: cantidad de bidones (materia prima)

p_b : Peso útil del bidón

p_a : Peso del alambre (insumos)

P_{final} : Barredora (producto final)

$P_{proceso}$: Pérdidas generadas por proceso

$$(318 * 0.201 \text{ kg}) + (4.5 \text{ kg}) = 68.14 \text{ kg} + 0.27 \text{ kg (perdidas por calor)}$$

Adicional al peso del material plástico se considera 4.5 kg de los alambres que unen y dan firmezas a los filamentos plásticos. El resultado obtenido del proceso y balance de materia reflejan el peso del producto final, la barredora, dando un resultado de 68,14 kg por unidad, considerando una pérdida por procesos de 0.27 kg de material plástico.

En el aprovechamiento del bidón como materia prima hay que hacer una distinción relevante entre el peso y su superficie. Si bien el peso recuperado del bidón es menor, el proceso aprovecha la mayor proporción, 82% de la superficie y volumen funcional del material reciclado. Esto quiere decir, que el proceso prioriza el uso de la mayor extensión útil del material reciclable maximizando el aporte ambiental.

Las variaciones en el peso utilizado se deben a que tanto la zona superior e inferior del bidón poseen un mayor espesor y densidad de material, concentrando la mayor parte del peso total del envase, ya que son estas mismas zonas las que soportan el mayor peso del bidón (base y agarre).

El procesamiento incluyó corte, deshilado, embobinado, termo fijado y corte final, obteniéndose monofilamentos con estabilidad dimensional y rigidez adecuada después del tratamiento térmico a 120 °C durante 10 minutos.

La Tabla No.1 muestra los balances de cada uno de los procesos, iniciando con el corte y preparación de los 318 bidones que dejaron una materia prima de 63.91 kg, posteriormente el material para a un proceso de deshilado y embobinado en la cual se pierden 0.16 kg del material quedando 63.75 kg, que pasaron a la siguiente fase.

La etapa de termo fijado permitió procesar 1,25 kg de material por molde, requiriéndose 51 moldes para completar la producción, en este proceso se redujo el peso del material a 63.70 kg debido a pérdidas de humedad por temperatura, y finalmente el proceso de corte final dio un peso de material final de 63.60 kg, reflejando una pérdida de 0.10 kg durante este proceso.

Tabla1. Balances de los procesos

Proceso	Material de entrada	Material de salida	Tiempo (h)
Corte y preparación	318*0.201	63.91 kg	1.31
Deshilado y embobinado	63.91 kg	63.75 kg	10.6
Termo fijado	63.75 kg	63.70 kg	8.5
Corte final	63.70 kg	63.60 kg	0.85

Fuente: Elaborado por los autores

Los resultados evidenciaron un aprovechamiento eficiente del material post-consumo y la obtención de cerdas funcionales para aplicaciones de barrido mecánico, demostrando la viabilidad técnica del proceso de transformación del HDPE reciclado.

Figura 2. Estructura central de metálica de diámetro de 32" con 1.5 metros de largo Filamento de nylon reciclado (HDPE) color azul de longitud 30 cm y alambre de acero al carbono de 0,2 cm de grosor de longitud 30 cm.

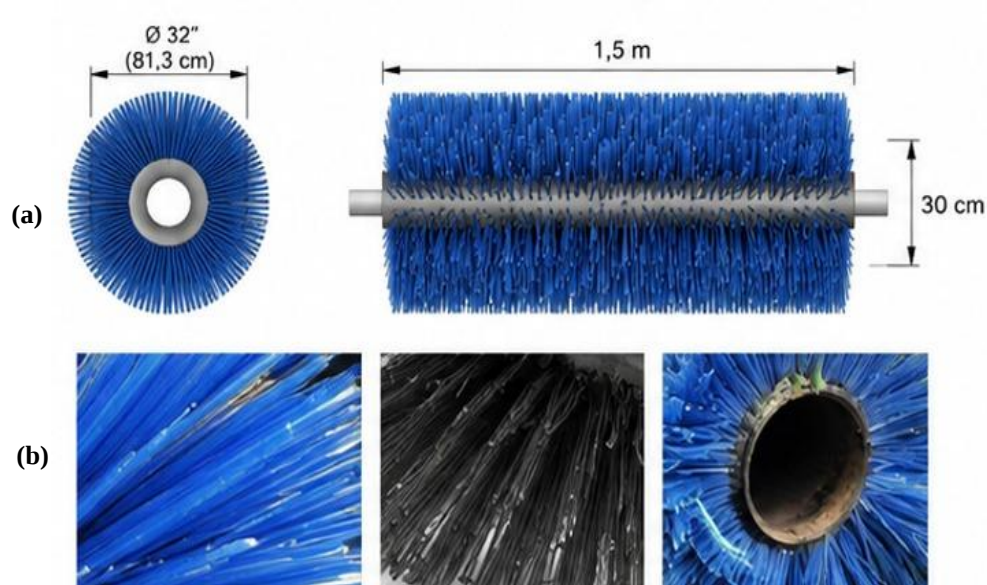


Figura 2. Estructura del cepillo de la barredora mecánica

Fuente: Elaboración propia; el literal (a) fue generado mediante inteligencia artificial y el literal (b) corresponde a una fotografía propia.

3.2 Fase II: Análisis de desempeño y sostenibilidad económica

Para el análisis de desempeño y sostenibilidad económica se realizó la cuantificación y valorización de los materiales que intervienen en la fabricación de las barredoras. El análisis de costos comprende los costos de materiales variables como la cantidad de alambre, energía consumida, y sueldos de los trabajadores, mientras que el costo fijo corresponde a los montos por depreciación de los equipos, el mantenimiento y pago de licencias y permisos de funcionamiento del lugar de operación.

En el análisis de costos de la mano de obra se consideran tres trabajadores que realizan una jornada de ocho horas diarias, requiriendo 2 días para producir una barredora.

Tabla 2. Detalle del costo de materiales variables

Detalle	Valor
Materia prima	\$ 358,16
Consumibles	\$ 38,00
Energía	\$ 2,27
Total	\$ 398,43

Fuente: Elaborado por los autores

Tabla 3. Costos fijos

Costos fijos por unidad de barredora		
Servicios básicos		\$ 4,33
Electricidad	\$ 20,00	
Internet	\$ 35,00	
Agua	\$ 10,00	
Permisos y licencias		\$ 1,00
Tasa de funcionamiento	\$ 15,00	
Arriendo		\$ 13,33
Mantenimiento de Equipo		\$ 0,22
Depreciación maquinaria		\$ 0,65
Sueldos y salarios directos		\$ 96,40
Sueldos y salarios indirectos		\$ 50,00
Total		\$ 165,94

Fuente: Elaborado por los autores

El análisis económico consideró dos escenarios: el costo de producción de una barredora, utilizado para determinar el precio de venta y los costos operativos, y la producción mensual de 15 unidades, destinada a estimar la inversión, rentabilidad y recuperación del capital.

La estructura de costos incluyó bidones de HDPE reciclados, alambre galvanizado, consumibles, energía eléctrica y térmica, y mano de obra directa e indirecta, con un costo total de USD 564,37 por barredora. La inversión inicial contempló equipos y herramientas como deshiladora, horno, amoladora, moldes, tijeras industriales y alicates, depreciados según una vida útil estimada de diez años.

Considerando una rentabilidad del 40 %, se estableció un precio de venta estimado de USD 790,11 por unidad, suficiente para cubrir los costos operativos y generar el margen previsto. El análisis también incorporó el capital de trabajo del primer mes y la diferenciación entre activos fijos, costos variables y costos fijos para sustentar la evaluación financiera del proyecto.

Tabla3. Análisis de costos y utilidad por unidad de barredora

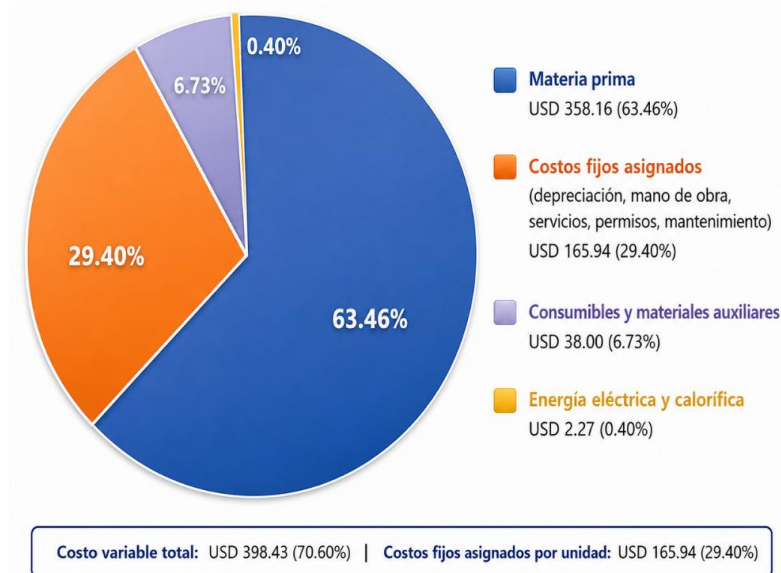
Rubro	Valor
Costos fijos unitarios (CVu)	\$ 165,94
Costos variables unitarios (CFu)	\$ 398,43
Precio de venta	\$ 790,11
Costos totales	\$ 564,37
Utilidad	\$ 225,75
Margen bruto	49,57%
Margen neto	28,57%
ROI	19,29%
Contribución marginal	\$ 391,69

Fuente: Elaborado por los autores

Los resultados obtenidos muestran que el proyecto de producción de barredoras a partir del reciclaje de bidones de HDPE es económicamente viable y presenta una rentabilidad atractiva bajo las condiciones de producción establecidas.

A nivel unitario en la Tabla 3 y Gráfico 3 cada barredora tiene un costo total de producción de 564,37 USD, compuesto por 398,43 USD de costos variables y 165,94 USD de costos fijos. Con un precio de venta estimado de 790,11 USD, se obtiene una utilidad de 225,75 USD por unidad, lo que representa un margen bruto del 49,57 % y un margen neto del 28,57 %.

Figura 3. Distribución de costos de producción por unidad de barredora.



Fuente: Elaborado con inteligencia artificial.

Los resultados indican que aproximadamente la mitad del valor de venta corresponde al excedente generado después de cubrir los costos variables, mientras que cerca del 29 % del ingreso por unidad se transforma en ganancia neta para el proyecto. Asimismo, la contribución marginal de 391,69 USD demuestra que cada barredora vendida aporta significativamente a la cobertura de los costos fijos y a la generación de utilidades.

Tabla 4. Análisis de costos y utilidad por unidad de barredora

Rubro	Valor
Ingresos mensuales	\$ 11.851,72
Costos variables mensuales	\$ 5.976,43
Costos fijos mensuales	\$ 2.489,08
Gastos	\$ 85,00
Costos totales mensuales	\$ 8.550,51
Utilidad mensual	\$ 3.301,21
Utilidad anual	\$ 39.614,47

Fuente: Elaborado por los autores

Desde una perspectiva mensual en la Tabla 4, considerando una producción de 15 barredoras, se generan ingresos por 11.851,72 USD frente a costos totales de operación de 8.550,51 USD, obteniéndose una utilidad mensual de 3.301,21 USD y una utilidad anual cercana a 39.614,47 USD.

Tabla 5. Índices económicos

Índices económicos	
Punto de equilibrio	6,57
Punto de equilibrio el \$	1,39
Relación beneficio/costo	1,39
Periodo de recuperación (años)	0.25
Periodo de recuperación (años)	3.05
Flujo de caja anual	\$39.731,47

Fuente: Elaborado por los autores

La Tabla 5 presenta los principales indicadores económicos del proyecto. El punto de equilibrio se alcanza con 6,57 barredoras, aproximadamente 7 unidades mensuales, por debajo de la producción planificada. La relación beneficio/costo de 1,39 indica un beneficio neto de USD 0,39 por cada dólar invertido, mientras que el ROI de 393,25 % evidencia una alta rentabilidad respecto a la inversión inicial de USD 10.073,51.

El período de recuperación de la inversión fue de 0,254 años (3,05 meses), acompañado de un flujo de caja anual de USD 39.731,47, lo que evidencia capacidad para recuperar el capital y generar excedentes. En conjunto, los resultados muestran que la fabricación de barredoras con materiales reciclados es económicamente viable y ambientalmente favorable, con recuperación rápida de la inversión y capacidad para afrontar variaciones en costos o producción.

Tabla 6. Resultados de ensayos aplicados

La tabla No.6 presenta los valores obtenidos mediante los ensayos experimentales realizados tanto a las cerdas de HDPE y las cerdas de polipropileno virgen, además se incluyó una columna con los valores reportados por el fabricante de la barredora de cerdas de polipropileno con el fin de evaluar simultáneamente el desempeño experimental y la referencia industrial.

Parámetro	HDPE reciclado Ensayo propio	PP virgen Ensayo propio	PP Fabricante	Método de ensayo / referencia
Geometría de la cerda	6 × 2 mm rectangular	Ø 5 mm circular	No indicada	Medición dimensional con calibrador
Resistencia a tracción	45,50 MPa	45,12 MPa	52 MPa	GB/T 1040 / ISO 527 / ASTM D638 ensayo de tracción
Elongación a rotura	16,40%	14,40%	14,40%	GB/T 1040 / ISO 527 / ASTM D638 Ensayo de tracción
Deformación angular bajo carga	6,0°	15,2°	No reportada	Método experimental comparativo de flexión en voladizo
Rigidez flexural aparente, (EI)	0,1232 N·m ²	0,0491 N·m ²	No reportada	Modelo de viga en voladizo; cálculo a partir de carga y deformación
Módulo flexural aparente	5.123 MPa	1,874 MPa	1.447 MPa	Modelo de viga en voladizo
Resistencia a flexión	58,33 MPa	62,16 MPa	65 MPa	GB/T 9341; referencias ISO 178 / ASTM D790 Método experimental de flexión en voladizo

Recuperación angular	86,4 ± 1,52°	85,0 ± 1,0°	No reportada	Método experimental comparativo de carga–descarga y recuperación
Recuperación de deformación	40,00%	66,70%	No reportada	Método experimental comparativo de recuperación elástica
Desgaste operacional	7,94%	10,00%	No reportado	Método experimental comparativo de pérdida de masa durante operación
Resistencia al impacto Izod	7,75 kJ/m ²¹	5,86 kJ/m ²¹	5,86 kJ/m ²	GB/T 1843 / ISO 180 / ASTM D256 – Izod
Temperatura de deflexión térmica	62,3 °C	51,3 °C	54,7 °C	Método indicado en la ficha del fabricante

La resistencia a tracción del HDPE reciclado fue de 45,50 MPa, prácticamente equivalente a los 45,12 MPa obtenidos experimentalmente para el PP virgen. Esto sugiere que el proceso de recuperación y transformación del HDPE permite obtener una cerda con una capacidad de soportar esfuerzos axiales semejante al producto comercial ensayado.

La ductilidad del producto de HDPE presentó una elongación a rotura de 16,40 %, frente a 14,40 % del PP ensayado y del fabricante, lo que representa que la cerda reciclada conserva una buena capacidad de deformación antes de alcanzar la falla, característica favorable para una barredora, donde las cerdas están sometidas continuamente a flexiones, impactos y contacto irregular con la superficie.

En el caso de la rigidez flexural aparente (EI), la cerda de HDPE presentó aproximadamente 2,51 veces la rigidez estructural aparente del PP. El resultado indica una mayor oposición de la cerda reciclada a la flexión bajo carga. Sin embargo, esta diferencia no debe atribuirse exclusivamente al material, porque el EI incorpora tanto el módulo (E) como el momento de inercia (I); por consiguiente, la geometría rectangular 6 × 2 mm del HDPE frente a la circular Ø5 mm del PP interviene directamente en el comportamiento observado.

En el desgaste por impacto se obtuvo un valor de 7,75 kJ/m² para HDPE frente a 5,86 kJ/m² para PP que implicaría aproximadamente 32,3 % de incremento. Además, el HDPE registró una pérdida de 7,94 %, mientras el PP alcanzó 10,00 % bajo las mismas condiciones de operación. Por tanto, la cerda reciclada presentó 20,6 % menos pérdida relativa de masa. Para una barredora industrial, este resultado tiene una relevancia directa porque se relaciona con la vida útil del elemento de barrido y con la velocidad de consumo del material.

3.3 Evaluación de indicadores de desempeño ambiental del proceso

El análisis de desempeño ambiental permitió evaluar el comportamiento del proceso de fabricación de cerdas para barredoras mecánicas elaboradas con HDPE reciclado, considerando variables de consumo energético, huella hídrica, generación de residuos y aporte de material reciclado.

Dentro del cálculo del consumo de energía en la producción de barredoras se incluyó los tres tipos de energías empleados: la energía eléctrica de los equipos, energía térmica del horno alimentado con gas doméstico y el trabajo manual realizado por los operarios.

El trabajo manual reflejó un consumo de 0.51 kW; el trabajo eléctrico comprendió 19.94 kW; mientras que el trabajo térmico consumió 17.58 kW, dando una sumatoria de 38.08 kW.

Tabla 7. Consumo de Energía

Maquina	Proceso	Tiempo (h)	Consumo del equipo kwh	Consumo (kwh)
Trabajo Manual	Corte y preparación	1,1	0,465	0,51

Deshiladora	Deshilado y embobinado	8,1	2,24	18,14
Horno	Termofijado	6	2,93	17,58
Moladora	Corte final	0,8	2,24	1,79
Total		16	7,87	38,03

Fuente: Elaborado por los autores

En la Tabla 7 el consumo energético por unidad producida fue calculado mediante la relación entre la energía total consumida y el número de barredoras fabricadas ($Q = 1$). Como resultado, se obtuvo un consumo de 38,08 kW, resultado que puede acortarse en el caso de gestionar producciones por lotes.

Los resultados también evidenciaron que las operaciones de mayor consumo energético corresponden al termo fijado con el 46.22% y el deshilado con 47.69%. Sin embargo, en el análisis global, la aplicación del consumo de energía total demostró que la producción de una barredora requiere alrededor del 53.8 de energía eléctrica, mientras que del 46.2% de energía térmica.

Huella hídrica

En relación con la huella hídrica, el consumo total de agua registrado durante el proceso fue de 2 L, utilizados únicamente para el enfriamiento de la cuchilla en la etapa de deshilado.

Generación de residuos

Respecto a la generación de residuos, el proceso inició con 318 bidones de HDPE con un peso promedio de 0,6 kg por unidad, obteniéndose un total inicial de 190,8 kg de material plástico.

Por cada unidad de bidón se aprovechó 200 gr dentro del proceso, mientras que aproximadamente 400 gr se generaron como subproductos aprovechables. Entonces del total de los 190.8 kg, solo 63,5 kg fueron aprovechados para la fabricación de las cerdas, mientras que 127,3 kg correspondieron a material no utilizable dentro del proceso, pero aprovechable para fines secundarios.

El subproducto generado por unidad producida fue:

$$R_{unidad} = \frac{127,3Kg}{1} = 127,3 Kg/unidad$$

El porcentaje de subproducto aprovechable generado durante el proceso fue:

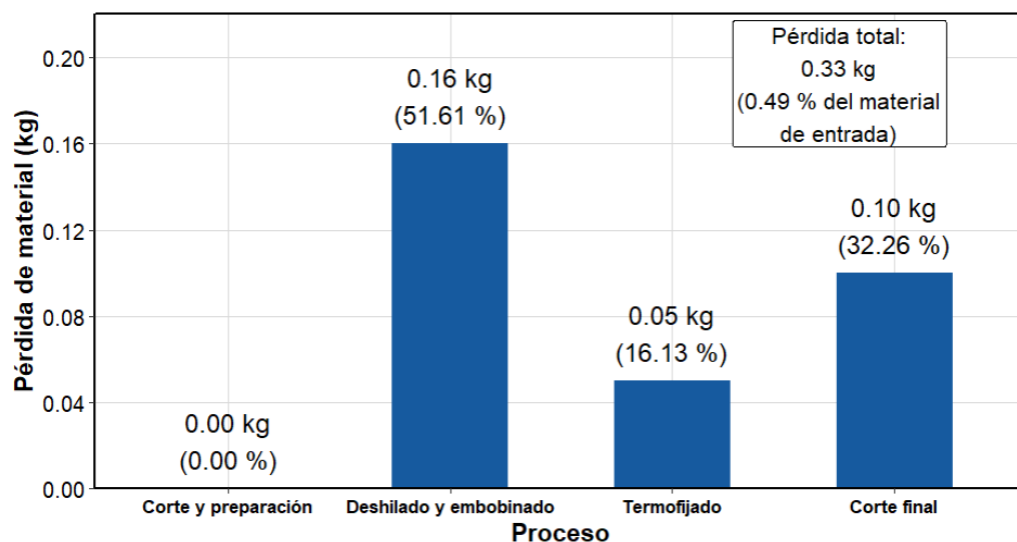
$$\%R = \frac{127,3}{198,8} \times 100 = 66,72\%$$

Los resultados evidenciaron que el sistema desarrollado incorporó completamente material reciclado al proceso productivo, manteniendo una baja demanda hídrica y permitiendo el aprovechamiento de residuos plásticos post-consumo, en contraste con barredoras convencionales fabricadas con plástico virgen bajo esquemas de economía lineal.

En cuanto a la eficiencia del material utilizable de producción, la totalidad de la materia prima utilizada para la fabricación de las cerdas correspondió a HDPE post-consumo, obteniéndose:

$$\%MR = \frac{63,60}{63,91} \times 100 = 99,51\%$$

Figura 4. Pérdidas de material en cada etapa del proceso de fabricación de cerdas a partir de bidones HDPE reciclado.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la figura 4 muestra la distribución de las pérdidas de material por proceso evidenciando que el proceso de deshilado y embobinado es el que genera mayor pérdida, sin embargo, a nivel general las pérdidas alcanzan solo el 0.49% de material plástico reciclable, cantidad no significativas en comparación a todo el proceso empleado.

4. Discusión

Distinción del aprovechamiento entre peso y superficie

El aprovechamiento del HDPE presentó diferencias según el indicador utilizado. Solo el 33,5 % del peso del bidón se destinó a la fabricación de cerdas, debido al mayor espesor y geometría de las zonas superior e inferior. Sin embargo, se recuperó el 82 % de la superficie útil, principalmente del cuerpo cilíndrico.

La geometría del residuo condiciona su recuperación en el reciclaje mecánico, por lo que evaluar únicamente la masa puede resultar insuficiente [27]. El elevado aprovechamiento superficial constituye un indicador favorable de valorización, ya que permite recuperar gran parte de la estructura funcional del envase, en concordancia con Villalba et al. [28]. Así, aunque el aprovechamiento gravimétrico fue menor, la recuperación superficial evidencia una utilización eficiente del HDPE y contribuye a reducir los residuos pos-consumo.

Potencial del aprovechamiento de los subproductos generados

De los 190,8 kg de plástico procesado, aproximadamente 127,3 kg correspondieron a subproductos no utilizados directamente en la fabricación de cerdas, equivalentes al 66,7 % del material total. Sin embargo, estos conservan las propiedades del HDPE y presentan potencial de valorización en nuevos procesos industriales.

Los residuos de HDPE pueden reincorporarse mediante reciclaje mecánico para fabricar mobiliario urbano, tuberías, envases no alimentarios y elementos de construcción, reduciendo el uso de polímeros vírgenes y los impactos asociados a su producción [29]. Por tanto, el material descartado constituye un subproducto con potencial económico y de aprovechamiento local, en lugar de un residuo final.

Su valorización permitiría diversificar las aplicaciones del HDPE pos-consumo, fortalecer la economía circular y aumentar la eficiencia global del proceso, acercándolo a modelos de producción con menor generación de residuos.

Eficiencia económica

Los indicadores económicos evidenciaron la viabilidad del proyecto. La elaboración de barredoras a partir de bidones reciclados presentó resultados favorables, con utilidades significativas frente a la inversión inicial. El margen neto de 28,57 % indica que la venta de cada barredora permite cubrir los costos operativos y administrativos, además de generar un beneficio que puede mantenerse ante posibles cambios en los precios y costos de producción.

Ghisellini [30] señala que los procesos de reciclaje pueden ser económicamente rentables al transformar residuos y generar nuevos usos. Además, requieren mano de obra en etapas como la selección, preparación y corte de los bidones, favoreciendo el empleo no calificado.

El punto de equilibrio de 6,57 unidades indica que deben venderse aproximadamente 7 barredoras al mes para cubrir costos y gastos. Esta cifra es inferior a la capacidad estimada de producción de 15 unidades mensuales, lo que evidencia un margen operativo favorable.

La relación costo-beneficio de 1,39 indica que por cada dólar invertido se recuperan USD 1,39, confirmando la viabilidad económica del proyecto. Este resultado coincide con [31], donde se señala que los proyectos de reciclaje pueden alcanzar relaciones B/C superiores a 1 cuando existe una adecuada valorización de los residuos.

Sin embargo, estos modelos enfrentan limitaciones como la escasa capacitación técnica y económica, el acceso limitado al financiamiento, la baja promoción de mercados para productos reciclados y la falta de políticas que impulsen la economía verde [32]. Estas condiciones pueden restringir su crecimiento y sostenibilidad.

Económica circular con mayor generador de valor.

El informe del Global Plastic Action Partnership (GPAP) [33] señala que los proyectos de economía circular pueden generar retornos atractivos al transformar residuos en productos comerciales. Esto se relaciona con el proyecto propuesto, que convierte bidones de agua sin utilidad comercial en barredoras para uso urbano.

Ghisellini [30] destaca que la reutilización y el reciclaje de plásticos reducen la extracción de recursos fósiles y los impactos asociados, como emisiones, contaminación de agua y suelo, y acumulación de residuos no biodegradables. Estos beneficios requieren apoyo estatal y fortalecimiento del talento humano para una adecuada valorización de los residuos.

Los resultados también muestran una optimización de recursos debido al bajo costo y disponibilidad de los bidones, reduciendo requerimientos energéticos frente a una producción lineal y favoreciendo la rentabilidad ambiental y económica. En concordancia, Torkashvand [34] señala que optimizar el aprovechamiento de residuos incrementa los ingresos, aspecto aplicado en este proyecto mediante la selección y valorización manual realizada por los trabajadores.

Transición ecológica y sostenibilidad del proyecto

El proyecto es eficiente al transformar HDPE reciclado en un producto con una utilidad distinta a la original, incrementando su aprovechamiento y valor. Además, este tipo de iniciativas favorece la inclusión económica mediante modelos de negocio locales y la generación de empleos no calificados, como la compra de plásticos a recicladores informales, contribuyendo a la distribución de ingresos en sectores vulnerables [35].

La rentabilidad, disponibilidad de materia prima y gestión del proyecto favorecen su sostenibilidad, permitiendo alcanzar en cuatro meses ingresos suficientes para mantener la operación durante el año. Esta sostenibilidad también se refleja en el ámbito ambiental. La OCDE señala que menos del 10 % de los residuos plásticos son reciclados efectivamente [36]; en este contexto, la producción de barredoras contribuye a evitar que parte del HDPE se convierta en residuo, fortaleciendo las cadenas locales de reciclaje y recuperación de materiales.

Eficiencia ambiental del proceso productivo y uso de mano de obra

La evaluación caracterizó el desempeño del proceso de transformación. La fabricación de una unidad requirió aproximadamente 38,03 kWh y 2 L de agua, con mayor demanda energética en las etapas de deshilado-embobinado y termofijado. El uso de HDPE posconsumo evidenció su reincorporación como materia prima en una nueva aplicación productiva.

Estos resultados sustentan el aprovechamiento y valorización del residuo y la sustitución física de materia prima virgen; sin embargo, no permiten cuantificar reducciones de emisiones, huella de carbono o impactos ambientales frente a cerdas de PP virgen, debido a que no se realizó un ACV. Por tanto, estas comparaciones deberán abordarse en futuras investigaciones mediante límites del sistema y unidades funcionales equivalentes.

La incorporación de trabajo manual en las etapas de corte, preparación y manipulación redujo la dependencia de procesos automatizados y favoreció la generación de empleo local, constituyendo una alternativa para iniciativas de reciclaje a pequeña escala en economías emergentes.

Asimismo, el empleo del 100 % de materia prima reciclada evidenció una alta circularidad material, con pérdidas inferiores al 1 % durante la transformación. Este resultado coincide con estudios que señalan el potencial del HDPE reciclado para conservar propiedades mecánicas similares a las del material virgen mediante procesos adecuados de acondicionamiento y transformación [38].

Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a las políticas públicas

El proyecto contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente al ODS 11 mediante el fortalecimiento de la limpieza urbana, al ODS 12 mediante el aprovechamiento y reincorporación de residuos al ciclo productivo, y al ODS 13 al reducir el uso de materias primas derivadas del petróleo. El reciclaje, la reutilización y la gestión eficiente de recursos son herramientas fundamentales para reducir residuos y promover modelos sostenibles de producción y consumo [39].

En conjunto, la reutilización de bidones de HDPE para fabricar implementos de barrido constituye una alternativa técnicamente factible y ambientalmente favorable, que impulsa la economía circular, reduce la presión sobre los recursos naturales y favorece la valorización local de residuos plásticos.

Conclusión

La investigación demostró que la reutilización de bidones de HDPE pos-consumo para fabricar cerdas de barredoras mecánicas es técnicamente viable. El proceso permitió obtener un producto con propiedades funcionales adecuadas y favoreció la reincorporación del material al ciclo productivo bajo principios de economía circular.

La comparación con cerdas comerciales de PP virgen evidenció un desempeño mecánico competitivo. El HDPE presentó una resistencia a la tracción similar al PP (45,50 frente a 45,12 MPa), mayor elongación a la rotura (16,40 %), menor deformación angular (6,0° frente a 15,2°), mayor rigidez flexural aparente y 20,6 % menor desgaste operacional. Aunque su resistencia a la flexión fue 6,2 % inferior (58,33 frente a 62,16 MPa), mantuvo un comportamiento adecuado para la aplicación evaluada [40], [41].

Desde el punto de vista económico, se obtuvieron márgenes de rentabilidad positivos, una relación beneficio/costo superior a la unidad y un corto período de recuperación de la inversión. Estos resultados confirman la viabilidad financiera de la producción de cerdas con HDPE reciclado.

En el ámbito ambiental, el proceso permitió aprovechar prácticamente la totalidad del material reciclado, mantener una baja huella hídrica y reducir residuos plásticos posconsumo. Además, los subproductos generados conservan potencial para ser aprovechados en otras aplicaciones.

En conjunto, la fabricación de cerdas para barredoras mecánicas a partir de HDPE reciclado constituye una estrategia sostenible que integra beneficios técnicos, económicos y ambientales, contribuyendo a reducir el consumo de materias primas vírgenes, valorizar residuos plásticos y fortalecer modelos de producción basados en la economía circular.

Contribución de autores: Conceptualización, E.D. y N.P.; metodología, E.D. y N.P.; software, P.M.; validación, E.D., N.P., P.M. y L.V.; análisis formal, E.D. y N.P.; investigación, E.D. y N.P.; recursos, P.M. y L.V.; curaduría de datos, E.D., N.P. y P.M.; redacción del borrador original, E.D. y N.P.; redacción, revisión y edición, E.D., N.P., P.M. y L.V.; visualización, P.M.; supervisión, P.M. y L.V.; administración del proyecto, P.M. y L.V. Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] D. Feldman, «Polymer History», *Designed Monomers and Polymers*, vol. 11, n.º 1, pp. 1-15, ene. 2008, doi: 10.1163/156855508X292383.
- [2] R. Geyer, J. Jambeck, y K. Lavender, «Production, use, and fate of all plastics ever made.» Accedido: 23 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>
- [3] S. B. Borrelle *et al.*, «Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution», *Science*, vol. 369, n.º 6510, pp. 1515-1518, sep. 2020, doi: 10.1126/science.aba3656.
- [4] N. J. Beaumont *et al.*, «Global ecological, social and economic impacts of marine plastic», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 142, pp. 189-195, may 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.022.
- [5] OECD, *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing, 2022. doi: 10.1787/de747aef-en.
- [6] INEC, «Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2021». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://anda.inec.gob.ec/anda5/index.php/catalog/960/study-description>
- [7] W. M. Guerrero-Villegas, M. C. Gallegos-Varela, P. M. Rosero-Rosero, y L. M. Pinargote-Yépez, «Economía circular en contextos locales: caso Ecuador», *Rev. direito GV*, vol. 20, p. e2430, 2024, doi: 10.1590/2317-6172202430.
- [8] J. Kirchherr, D. Reike, y M. Hekkert, «Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221-232, dic. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [9] L. Gaona-Castillo y M. Contreras-Jaramillo, «Políticas públicas y reciclaje: Contribución para la sostenibilidad ambiental en Ecuador», *Revista Económica*, vol. 12, n.º 2, pp. 27-36, jul. 2024, doi: 10.54753/rve.v12i2.2182.
- [10] «Economía circular: definición, importancia y beneficios», Temas | Parlamento Europeo. Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- [11] G. Portilla, «FIGEMPA: Investigación y Desarrollo», 2022, doi: <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3364>.
- [12] «Libro Blanco de Economía Circular de Ecuador.» Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/Libro-Blanco-final-web_mayo102021.pdf
- [13] B. R. Garabiza, E. A. Prudente, y K. N. Quinde, «La aplicación del modelo de economía circular en Ecuador: Estudio de caso», *Revista ESPACIOS*, vol. 42, n.º 02, ene. 2021, doi: 10.48082/espacios-a21v42n02p17.
- [14] D. S. C. Castellanos, A. C. R. Rivadeneira, y J. C. R. Rivadeneira, «Barreras y facilitadores para la implementación de prácticas de economía circular en organizaciones de Ecuador», *Prohominum*, vol. 7, n.º 2, pp. 225-238, abr. 2025, doi: 10.47606/ACVEN/PH0344.

- [15] R. Shedafa et al., «Assessment of Moisture Permeability and Closure Systems of High Density Polyethylene Plastic Bottles Used as Primary Packaging Containers for Moisture Sensitive Medicines», *PP*, vol. 07, n.º 08, pp. 321-325, 2016, doi: 10.4236/pp.2016.78039.
- [16] C. Rhodes, «Solving the plastic problem: From cradle to grave, to reincarnation». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/0036850419867204>
- [17] S. Browning, B. Beymer-Farris, y J. R. Seay, «Addressing the challenges associated with plastic waste disposal and management in developing countries», *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 32, p. 100682, jun. 2021, doi: 10.1016/j.coche.2021.100682.
- [18] G. O. Lara Topete, C. Yebra Montes, D. A. Orozco Nunnelly, C. E. Robles Rodriguez, y M. S. Gradilla Hernandez, «Frontiers | An Integrated Environmental Assessment of MSW Management in a Large City of a Developing Country: Taking the First Steps Towards a Circular Economy Model». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.838542/full>
- [19] A. Brunelli, S. Breda, P. Scanferla, L. Calgaro, A. Marcomini, y E. Badetti, «A methodology to assess a mobile urban street cleaning activity», *Atmospheric Pollution Research*, vol. 14, n.º 3, p. 101680, mar. 2023, doi: 10.1016/j.apr.2023.101680.
- [20] Empresa Pública Municipal de Aseo y Manejo Ambiental (EMAM-EP), «Informe de Gestión 2022», 2022. [En línea]. Disponible en: https://emamep.gob.ec/wp-content/uploads/2025/01/2.4.-INFORME-DE-GESTION-2022-EMAM-EP-signed_firmado.pdf
- [21] «Global Supply Chain Disruptions: Competition Policy Implications», 2022, Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10986/37507>
- [22] W. Monteros y C. Cando, «Esstadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales-Gestión de Residuos Sólidos 2023.», INEC, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios/2023/Residuos_Solidos/Boletin_Tecnico_GRS_2023.pdf
- [23] J. Zhang, V. Hirschberg, y D. Rodrigue, «Blending Recycled High-Density Polyethylene HDPE (rHDPE) with Virgin (vHDPE) as an Effective Approach to Improve the Mechanical Properties», *Recycling*, vol. 8, n.º 1, p. 2, feb. 2023, doi: 10.3390/recycling8010002.
- [24] «Environmental Impacts of End-of-Life Options of Biobased and Fossil-Based Polyethylene Terephthalate and High-Density Polyethylene Packaging». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11550>
- [25] B. Hapuwatte et al., «Recovery pathway assessment of recycled HDPE for circular economy: Shorter-life vs longer-life products - ScienceDirect». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827124000763?via%3Dihub>
- [26] Laird Plastics, «HDPE Guide: Properties, Uses & Applications [2025 Update]», Laird Plastics. Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://lairdplastics.com/resources/hdpe-guide-properties-uses-applications-2025-update/>
- [27] R. Silva, K. Graf, y M. Okimoto, «Plastic waste recycling: an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies», *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 72, dic. 2025, doi: 10.1186/s44147-025-00799-2.
- [28] E. Villalba y A. Arcos, «Contribuciones de la economía social y solidaria a las transiciones ecosociales. Experiencias en Europa y América Latina.», *Rev. iberoam. estud. desarro.*, 2025, [En línea]. Disponible en: <https://www.economiasolidaria.org/wp-content/uploads/2025/12/RIED-VOL-14-1.pdf>
- [29] S. Monterrey, G. Morán, M. Colmenares, y V. Domínguez, «Elaboración de silla infantil a base de botellas plásticas (HDPE) recicladas – estrategia para la conservación», *Revista de iniciación científica*, vol. 11, pp. 12-17, ene. 2025, doi: 10.33412/rev-ric.v11.1.4118.
- [30] P. Ghisellini, C. Cialani, y S. Ulgiati, «A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems», *Journal of Cleaner Production*, vol. 114, pp. 11-32, feb. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- [31] X. Jiang y B. Bateer, «A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation», *Waste Manag Res*, vol. 43, n.º 8, pp. 1159-1178, ago. 2025, doi: 10.1177/0734242X241310658.

- [32] B. Baran, «Limitation of circular plastics economy based on recycling», *Economics and Environment*, vol. 95, n.º 4, pp. 887-887, dic. 2025, doi: 10.34659/eis.2025.95.4.887.
- [33] Global Plastic Action Partnership (GPAP), *Unlocking the Plastics Circular Economy: Case Studies on Investment*. OECD Publishing, 2022. doi: 10.1787/de747aef-en.
- [34] J. Torkashvand, M. M. Emamjomeh, M. Gholami, y M. Farzadkia, «Analysis of cost-benefit in life-cycle of plastic solid waste: combining waste flow analysis and life cycle cost as a decision support tool to the selection of optimum scenario», *Environ Dev Sustain*, vol. 23, n.º 9, pp. 13242-13260, sep. 2021, doi: 10.1007/s10668-020-01208-9.
- [35] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, y E. J. Hultink, «The Circular Economy – A new sustainability paradigm?», *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757-768, feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [36] OECD, «Development co-operation and the elimination of plastic pollution», OECD Policy Briefs, may 2025. doi: 10.1787/96803ffc-en.
- [37] I.-R. Istrate, R. Juan, M. Martin-Gamboa, C. Domínguez, R. A. García-Muñoz, y J. Dufour, «Environmental life cycle assessment of the incorporation of recycled high-density polyethylene to polyethylene pipe grade resins», *Journal of Cleaner Production*, vol. 319, p. 128580, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128580.
- [38] P. Arpan, Z. Schyns, T. W, y M. Shaver, «Defining quality by quantifying degradation in the mechanical recycling of polyethylene | Nature Communications». Accedido: 21 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-52856-8>
- [39] United Nations Environment Programme, *Circular Economy: From Indicators and Data to Policy-making*. United Nations Environment Programme, 2024. doi: 10.59117/20.500.11822/44842.
- [40] Y. Dou and D. Rodrigue, “Morphological, thermal and mechanical properties of recycled HDPE foams via rotational molding,” *Journal of Cellular Plastics*, vol. 58, no. 2, pp. 305–323, 2022, doi: 10.1177/0021955X211013793.
- [41] S. Ahmed and M. Ali, “Tensile and Flexural Properties of Recycled HDPE for Application in Building Products,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 398, Art. no. 01038, 2024, doi: 10.1051/mateconf/202439801038.



© 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>