

Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica
ISSN en línea 3005-2599, Julio - Septiembre 2026,
Volumen 6, Número 3.

DOI: <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v6i3>

CARACTERIZACIÓN DE CHATARRA METÁLICA COMO BASE PARA LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE LOGÍSTICA INVERSA EN EL ESTADO DE MÉXICO

*CHARACTERIZATION OF SCRAP METAL AS A BASIS FOR THE
APPLICATION OF REVERSE LOGISTICS PROCESSES IN THE
STATE OF MEXICO*

Luis Fernando Miranda Rodríguez
Tecnológico Nacional de México, México

Jarumi Aguilar Guggembuhl
Tecnológico Nacional de México, México

Eulalia Ventura Mojica
Tecnológico Nacional de México, México

Rebeca Reyes de la Rosa
Tecnológico Nacional de México, México

Caracterización de Chatarra Metálica como Base para la Aplicación de Procesos de Logística Inversa en el Estado De México

Luis Fernando Miranda RodríguezEternity.fer@gmail.com<https://orcid.org/0009-0000-6667-6503>

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, Estudiante de Ingeniería Industrial-Chalco, Estado de México

Jarumi Aguilar Guggembuhljarumi_ag@tesch.edu.mx<https://orcid.org/0000-0001-5634-3086>

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, Ingeniería Industrial, Chalco, Estado de México

Eulalia Ventura Mojicaeulalia_vm@tesch.edu.mx<https://orcid.org/0009-0002-4682-6740>

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, Ingeniería Industrial, Chalco, Estado de México

Rebeca Reyes de la Rosarebeca_rr@tesch.edu.mx<https://orcid.org/0009-0000-9421-4015>

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, Ingeniería Industrial, Chalco, Estado de México

RESUMEN

La generación de residuos metálicos plantea desafíos para su recuperación, clasificación y reincorporación a los procesos productivos. La logística inversa permite organizar el flujo de materiales recuperables y favorecer su valorización conforme a los principios de la economía circular. El objetivo del estudio fue caracterizar física y operativamente distintos tipos de chatarra metálica para aportar criterios técnicos a un esquema de logística inversa orientado a su recuperación y clasificación en el Estado de México. Se analizaron 30 muestras distribuidas en seis categorías: IPR, PTR, placa de 1/4", lámina de 1/8", malla ciclónica galvanizada calibre 12.5 y flecha. Se registraron la masa, las dimensiones y los tiempos de medición y pesaje. El volumen y la densidad se examinaron como variables complementarias cuando la geometría de las piezas permitió estimarlos de manera confiable. Los resultados mostraron diferencias entre los materiales y en los tiempos requeridos para su caracterización. La masa, las dimensiones y la configuración geométrica permitieron establecer criterios de diferenciación, mientras que el análisis de los tiempos reveló variaciones en la complejidad operativa. Se concluye que la caracterización sistemática puede apoyar la estandarización de la recepción, clasificación y almacenamiento de la chatarra, así como la planificación de su recuperación y transporte

Palabras clave: caracterización física; chatarra metálica; economía circular; Estado de México; logística inversa; valorización de residuos

Characterization of Scrap Metal as a Basis for the Application of Reverse Logistics Processes in the State of Mexico

ABSTRACT

Metal waste generation poses challenges for its recovery, sorting, and reintegration into production processes. Reverse logistics helps organize the flow of recoverable materials and promote their valorization in accordance with circular economy principles. This study aimed to physically and operationally characterize different types of scrap metal to provide technical criteria for a reverse logistics scheme focused on their recovery and sorting in the State of Mexico. Thirty samples were analyzed across six categories: IPR, PTR, 1/4-inch plate, 1/8-inch sheet metal, 12.5-gauge galvanized chain-link mesh, and shaft. Mass, dimensions, and measurement and weighing times were recorded. Volume and density were examined as complementary variables when the geometry of the pieces allowed them to be estimated reliably. The results showed differences among the materials and in the time required for their characterization. Mass, dimensions, and geometric configuration provided criteria for differentiating the materials, while time analysis revealed variations in operational complexity. It is concluded that systematic characterization can support the standardization of scrap metal reception, sorting, and storage, as well as the planning of its recovery and transportation

Keywords: circular economy; physical characterization; reverse logistics; scrap metal; State of Mexico; waste valorization

Recibido: 12- mayo-2026 / Aprobado: 15-septiembre-2026

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos metálicos representa un desafío ambiental y, al mismo tiempo, una oportunidad para recuperar materiales con valor económico y reincorporarlos a los procesos productivos. La economía circular promueve su recuperación, reutilización y reciclaje con el propósito de mantenerlos en uso durante más tiempo y reducir la dependencia de materias primas vírgenes (SEMARNAT, 2026; World Steel Association, 2024).

La logística inversa gestiona el retorno de materiales desde los puntos de generación o consumo hacia procesos de recuperación, clasificación, reciclaje y valorización (Govindan & Soleimani, 2017). En el caso de la chatarra metálica, la caracterización física puede aportar información para decidir sobre su clasificación, manipulación, almacenamiento y transporte. La masa, las dimensiones y la configuración geométrica constituyen variables directamente observables, mientras que el volumen y la densidad pueden utilizarse como criterios complementarios cuando las características de las piezas permiten estimarlos de manera confiable.

La aplicación de la densidad a la chatarra real presenta dificultades que no suelen encontrarse en materiales metálicos de geometría regular. Los perfiles huecos, las deformaciones, los recubrimientos, las cavidades y los elementos adheridos pueden afectar el cálculo del volumen y producir valores que no representan la densidad del material. Por esta razón, su utilización como criterio de clasificación requiere considerar la geometría de cada pieza y las condiciones del procedimiento de medición.

La diversidad de formas, dimensiones y masas también puede generar diferencias en el tiempo requerido para medir, pesar y manipular los materiales. El análisis conjunto de variables físicas y operativas puede contribuir a establecer procedimientos diferenciados de recepción y clasificación, así como a planificar las etapas posteriores del flujo inverso.

La transición hacia una economía circular exige superar la gestión centrada en la disposición final y avanzar hacia sistemas que conserven el valor de los materiales durante varios ciclos productivos (Ghisellini et al., 2016). Este enfoque comprende la reducción, reutilización, recuperación y reciclaje, además de cambios en la organización de las cadenas de suministro y en los modelos de producción

(Kirchherr et al., 2017). Desde la perspectiva de la minería urbana, los materiales acumulados en productos, edificios e infraestructuras constituyen reservas susceptibles de recuperación cuando concluye su vida útil (Brunner, 2011). No obstante, las tasas de reciclaje varían ampliamente entre los metales y dependen de la eficiencia de la recolección, la separación y el procesamiento (Graedel et al., 2011). La recuperación efectiva también está condicionada por la composición de los productos, la mezcla de aleaciones y las pérdidas ocurridas durante las distintas etapas del sistema (Reck & Graedel, 2012).

La clasificación de la chatarra requiere integrar propiedades observables y métodos capaces de diferenciar materiales con características similares. Los sistemas que combinan sensores electromagnéticos y transmisión de rayos X muestran la utilidad de analizar más de una propiedad durante la separación de metales no ferrosos (Mesina et al., 2007). La densidad aparente y la forma tridimensional también se han empleado para distinguir piezas de chatarra ligera bajo condiciones controladas (Koyanaka & Kobayashi, 2010). Las revisiones sobre clasificación automatizada señalan que la selección de la tecnología depende de la composición, el tamaño y la presentación del flujo de residuos (Gundupalli et al., 2017). En la chatarra de acero, el reconocimiento óptico apoyado por aprendizaje automático ha permitido identificar piezas con presencia de cobre a partir de sus características visuales (Gao et al., 2020). Investigaciones posteriores han aplicado modelos de aprendizaje profundo para clasificar y valorar chatarra de acero mediante imágenes, lo que confirma la importancia de disponer de datos físicos y geométricos consistentes antes de automatizar la clasificación (Xu et al., 2023).

El objetivo del estudio fue caracterizar física y operativamente distintos tipos de chatarra metálica mediante el registro de su masa, dimensiones y tiempos de medición y pesaje. El volumen y la densidad se examinaron como variables complementarias en las muestras cuya geometría permitió estimarlos de forma confiable. Se analizaron 30 muestras y los resultados se relacionaron con las etapas de acopio, caracterización, clasificación, almacenamiento, transporte y valorización dentro de un esquema de logística inversa aplicable al Estado de México.

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

Se realizó un estudio aplicado, cuantitativo y descriptivo, basado en mediciones directas de materiales metálicos recuperados. El análisis examinó la utilidad de variables físicas y operativas como criterios complementarios para la clasificación de chatarra dentro de un esquema de logística inversa. No se manipularon variables ni se establecieron grupos experimentales.

Muestras analizadas

Se analizaron 30 muestras de chatarra metálica, distribuidas en seis categorías, con cinco observaciones por categoría: perfil IPR, perfil PTR, placa de acero de 1/4", lámina de 1/8", malla ciclónica galvanizada calibre 12.5 y componente denominado flecha. Para cada muestra se registraron las dimensiones, la masa y los tiempos empleados en la medición y el pesaje.

Las especificaciones nominales consideradas fueron: IPR de $102 \times 260 \times 6.4 \times 10$ mm; PTR de $1\frac{1}{2} \times 2$ pulgadas, calibre 11; placa de 1/4 de pulgada; lámina de 1/8 de pulgada; malla ciclónica galvanizada calibre 12.5; y flechas de aproximadamente 4 m de longitud. Estas especificaciones se utilizaron para describir las categorías y orientar la medición de las piezas.

Las muestras correspondieron a materiales metálicos recuperados disponibles para el estudio. Las mediciones se realizaron mediante los instrumentos dimensionales y de pesaje disponibles durante el levantamiento de datos. Debido al carácter aplicado y descriptivo de la investigación, los resultados se circunscriben a las muestras examinadas y no pretenden representar la totalidad de la chatarra generada en el Estado de México.

Procedimiento de medición

Las dimensiones de cada muestra se determinaron mediante medición directa y se registraron en las unidades correspondientes a cada tipo de pieza. Posteriormente, las muestras se pesaron para obtener su masa en kilogramos. También se contabilizaron por separado el tiempo requerido para medir las dimensiones y el empleado en el pesaje.

El volumen se estimó únicamente cuando la geometría y las dimensiones registradas permitieron aplicar una relación geométrica adecuada. En los perfiles huecos se consideró la diferencia entre las áreas exterior e interior de la sección. Cuando la forma de la pieza o la información disponible no permitieron obtener un volumen confiable, el análisis se limitó a la masa, las dimensiones y los tiempos de operación, sin asignar valores teóricos.

Determinación de la densidad

En las muestras cuyo volumen pudo estimarse de manera confiable, la densidad aparente se calculó mediante la relación:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

donde ρ representa la densidad aparente, m la masa y V el volumen estimado de la muestra.

Los valores obtenidos se interpretaron con cautela, debido a que las piezas podían presentar deformaciones, cavidades, recubrimientos, geometrías irregulares o elementos adheridos. La densidad no se utilizó como mecanismo absoluto de identificación, sino como variable complementaria cuando las condiciones de medición permitieron calcularla de manera consistente.

Análisis de los datos

Los datos se organizaron en una base y se analizaron mediante estadística descriptiva. Para la masa y los tiempos se calcularon la media, la desviación estándar y, cuando correspondía, el coeficiente de variación de cada categoría. Las dimensiones se analizaron mediante sus intervalos observados. El tiempo total de caracterización se obtuvo sumando el tiempo de medición y el tiempo de pesaje de cada muestra.

La comparación entre categorías consideró la masa, las dimensiones, la configuración geométrica y los tiempos de operación. El volumen y la densidad solo se incluyeron cuando su cálculo resultó técnicamente confiable.

Integración al esquema de logística inversa

Los resultados se relacionaron con un esquema de logística inversa compuesto por las etapas de generación, acopio, caracterización, clasificación, almacenamiento, consolidación, transporte, reciclaje y reincorporación de materiales. La información física y operativa se empleó para proponer criterios de apoyo a la clasificación, la manipulación y la preparación de la chatarra para su valorización. Esta integración tuvo carácter propositivo y no implicó la validación operativa del esquema en condiciones reales de implementación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las muestras

Se analizaron 30 muestras de chatarra metálica, distribuidas en seis categorías con cinco observaciones cada una: perfil IPR, perfil PTR, placa de acero de 1/4", lámina de 1/8", malla ciclónica galvanizada calibre 12.5 y componente denominado flecha. Para cada muestra se registraron la masa, las dimensiones y los tiempos de medición y pesaje. Debido al tamaño y al carácter intencional del conjunto estudiado, las comparaciones tienen alcance descriptivo y se limitan a las piezas examinadas. La masa media varió entre las categorías. El IPR registró el valor más alto, con 45,00 kg, seguido de la placa de 1/4", con 42,60 kg, y la flecha, con 40,40 kg. La malla ciclónica alcanzó una media de 27,00 kg; el PTR, de 25,20 kg; y la lámina de 1/8", de 22,00 kg. Estos valores muestran la heterogeneidad de las muestras y permiten considerar la masa como un criterio inicial para planificar su manipulación, almacenamiento y transporte. Las diferencias observadas son descriptivas y no representan, por sí solas, diferencias generalizables entre todos los residuos pertenecientes a esas categorías.

Tabla 1. Estadística descriptiva de la masa de las muestras

Material	n	Masa media (kg)	DE (kg)	CV (%)
IPR	5	45,00	1,58	3,51
PTR	5	25,20	1,30	5,17
Placa de 1/4"	5	42,60	2,07	4,87
Lámina de 1/8"	5	22,00	1,58	7,19

Material	n	Masa media (kg)	DE (kg)	CV (%)
Malla ciclónica	5	27,00	1,00	3,70
Flecha	5	40,40	1,14	2,82

Nota. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Los coeficientes de variación oscilaron entre 2,82 % para la flecha y 7,19 % para la lámina de 1/8". En las muestras estudiadas, estos resultados indican una dispersión relativa reducida de la masa dentro de cada categoría. La flecha presentó la menor variabilidad, seguida del IPR y la malla ciclónica, mientras que la lámina registró la mayor. Esta homogeneidad debe interpretarse con cautela, pues cada categoría estuvo integrada por cinco observaciones y las dimensiones individuales pueden influir en la masa.

Desde la perspectiva de la logística inversa, la masa aporta información para estimar requerimientos de manipulación, capacidad de almacenamiento y condiciones de transporte. No obstante, la gestión de materiales recuperados también debe considerar su forma, dimensiones y complejidad operativa, debido a que estas características inciden en las actividades necesarias para recuperarlos y reincorporarlos a los procesos productivos (Govindan & Soleimani, 2017; Rogers & Tibben-Lembke, 1999).

Dimensiones, masa y configuración geométrica

Las dimensiones registradas variaron de acuerdo con la categoría y la configuración de las piezas. Los perfiles IPR presentaron longitudes entre 5,10 y 5,30 m y masas de 43 a 47 kg. En los perfiles PTR, las longitudes oscilaron entre 4,70 y 4,90 m, con masas de 24 a 27 kg.

Las placas registradas bajo la categoría de 1/4" presentaron dimensiones comprendidas entre 38 × 50 y 40 × 52 cm, con masas de 40 a 45 kg. En las muestras clasificadas como láminas de 1/8", el ancho varió entre 1,45 y 1,55 m y la longitud entre 2,90 y 3,00 m, mientras que las masas estuvieron entre 20 y 24 kg. Estos datos se conservaron conforme a los registros del estudio y se utilizaron con fines descriptivos, sin emplearlos para calcular densidades cuando su correspondencia geométrica no permitía estimar un volumen confiable.

La malla ciclónica galvanizada calibre 12.5 registró longitudes de 4,80 a 5,20 m y alturas de 1,70 a 1,80 m, con masas de 26 a 28 kg. Las piezas denominadas flechas presentaron una longitud aproximada de 4 m, una segunda dimensión registrada entre 1,25 y 1,35 m y masas de 39 a 42 kg.

Los resultados indican que la masa no basta para diferenciar ni organizar la chatarra examinada. Las dimensiones y la configuración geométrica proporcionan información adicional sobre el espacio requerido, la facilidad de manipulación y las condiciones de almacenamiento. En los sistemas de logística inversa, estas características influyen en las decisiones vinculadas con la recuperación, clasificación, consolidación y transporte de los materiales retornados (Govindan et al., 2015).

Los flujos recuperados pueden presentar variaciones de forma, tamaño y condición que no suelen encontrarse en los procesos convencionales de producción. La caracterización previa puede reducir parte de la incertidumbre operativa y facilitar la asignación de recursos durante las etapas posteriores del flujo inverso (Agrawal et al., 2015).

Tiempos de medición y pesaje

Los tiempos empleados en la caracterización variaron entre las categorías analizadas. La malla ciclónica presentó el mayor tiempo medio de medición, con 179,8 segundos, mientras que la placa de 1/4" registró el menor, con 33,0 segundos. En el pesaje, la malla ciclónica también alcanzó el valor más alto, con 510,0 segundos, seguida de la flecha, con 421,2 segundos. El PTR presentó el menor tiempo medio de pesaje, con 226,0 segundos.

Tabla 2. Tiempo medio requerido para la caracterización de las muestras

Material	Medición (s)	Pesaje (s)	Tiempo total medio (s)	Tiempo total medio (min)
IPR	54,8	289,4	344,2	5,74
PTR	48,0	226,0	274,0	4,57
Placa de 1/4"	33,0	357,6	390,6	6,51
Lámina de 1/8"	41,0	300,0	341,0	5,68
Malla ciclónica	179,8	510,0	689,8	11,50

Material	Medición (s)	Pesaje (s)	Tiempo total medio (s)	Tiempo total medio (min)
Flecha	38,4	421,2	459,6	7,66

Nota. El tiempo total medio corresponde a la suma de los tiempos medios de medición y pesaje. La conversión a minutos se obtuvo dividiendo el resultado expresado en segundos entre 60.

La malla ciclónica requirió el mayor tiempo total medio, con 11,50 minutos, mientras que el PTR registró el menor, con 4,57 minutos. En las condiciones del estudio, la caracterización de la malla demandó aproximadamente 2,5 veces el tiempo requerido para el PTR.

Esta diferencia puede relacionarse con la configuración flexible y abierta de la malla, así como con el espacio que ocupa durante su manipulación. No obstante, el estudio no evaluó por separado la influencia de cada característica geométrica sobre el tiempo, por lo que los resultados describen el comportamiento observado sin establecer una relación causal.

Los tiempos registrados muestran que la complejidad operativa no depende únicamente de la masa. La malla ciclónica alcanzó una masa media inferior a la del IPR, la placa y la flecha, pero demandó más tiempo para su caracterización. En consecuencia, la planeación de las operaciones debería considerar tanto las propiedades físicas como el tiempo necesario para medir, manipular y pesar cada categoría. En los sistemas de logística inversa, la capacidad de procesamiento depende de la coordinación de las actividades de recolección, clasificación, almacenamiento y transporte. La identificación de las operaciones que requieren más tiempo puede orientar procedimientos diferenciados y oportunidades de mejora, aunque su efecto sobre la productividad deberá comprobarse mediante estudios que registren el flujo completo y los recursos empleados (Agrawal et al., 2015; Govindan & Soleimani, 2017).

Evaluación de la densidad como criterio complementario

La densidad se examinó como una variable potencial para complementar la caracterización mediante la relación entre masa y volumen. Su cálculo, sin embargo, no resultó confiable para todas las muestras a partir de las dimensiones registradas. En consecuencia, no se presentan comparaciones de densidad entre las seis categorías.

Los perfiles IPR y PTR requieren considerar la geometría y el espesor de sus secciones transversales. En la malla ciclónica debe distinguirse el volumen del alambre del espacio vacío comprendido en su configuración, mientras que la flecha necesita una definición precisa de su sección transversal. En las placas y láminas, algunas combinaciones de dimensiones y masa produjeron valores incompatibles con los esperados para materiales ferrosos cuando se emplearon directamente para calcular el volumen.

Por esta razón, las mediciones originales de masa y dimensiones se conservaron para el análisis descriptivo, pero no se utilizaron para asignar una densidad absoluta cuando la geometría o los registros disponibles impedían estimar confiablemente el volumen metálico. Esta decisión evita clasificar las piezas a partir de resultados que podrían reflejar errores de medición, diferencias en la conformación o características no registradas de las muestras.

La relación entre masa y volumen mantiene utilidad potencial como criterio complementario, pero su aplicación a chatarra real exige un procedimiento volumétrico adaptado a cada geometría. En procesos de recuperación, las propiedades físicas pueden apoyar la separación de materiales cuando se miden bajo condiciones apropiadas y se combinan con otros métodos de identificación (Cui & Zhang, 2008).

En el presente estudio, la clasificación se sustentó principalmente en la masa, las dimensiones, la configuración geométrica y los tiempos de operación. La densidad quedó planteada como una variable susceptible de incorporarse en investigaciones posteriores, una vez estandarizada la medición del volumen efectivo. Por tanto, no debe interpretarse como un resultado validado ni como un mecanismo autónomo de identificación.

Implicaciones para la logística inversa

Los resultados permiten situar la caracterización física y operativa como una etapa de apoyo a la toma de decisiones dentro del flujo de logística inversa. La información sobre masa, dimensiones, configuración geométrica y tiempos de operación puede incorporarse al siguiente esquema:

Generación → Acopio → Caracterización → Clasificación → Almacenamiento → Consolidación → Transporte → Reciclaje o valorización → Reincorporación

La heterogeneidad de las muestras respalda la inclusión de una caracterización previa a su consolidación. La masa permite cuantificar el material recuperado y estimar requerimientos de manipulación y transporte. Las dimensiones aportan información sobre el espacio de almacenamiento y las condiciones de manejo, mientras que la configuración geométrica ayuda a diferenciar categorías que podrían presentar masas semejantes. Los tiempos de medición y pesaje ofrecen un criterio adicional para reconocer operaciones con distinta complejidad.

La logística inversa comprende el flujo de productos y materiales desde los puntos de consumo o generación hacia procesos de recuperación, valorización o disposición adecuada (Rogers & Tibben-Lembke, 1999). Dentro de este flujo, la caracterización constituye una actividad intermedia que puede reducir la incertidumbre en la clasificación y facilitar la preparación de los materiales para las etapas posteriores.

La malla ciclónica ilustra la conveniencia de integrar variables físicas y operativas. Aunque su masa media fue de 27,00 kg, inferior a la del IPR, la placa y la flecha, registró el mayor tiempo total de caracterización. Una decisión basada únicamente en la masa no reflejaría esa diferencia. La combinación de masa, dimensiones, geometría y tiempo proporciona una descripción más completa de las exigencias de procesamiento de las muestras.

A partir de estos resultados, la etapa de caracterización debería considerar como variables mínimas:

identificación preliminar del material;

masa;

dimensiones;

configuración geométrica;

tiempo requerido para la medición y el pesaje.

La densidad podría añadirse cuando se disponga de un procedimiento confiable para determinar el volumen efectivo. También podrían incorporarse otros métodos de identificación cuando la inspección física no permita diferenciar adecuadamente los materiales.

La propuesta tiene carácter técnico y orientativo. El estudio no evaluó costos, capacidad de almacenamiento, distancias de transporte, frecuencia de recolección ni desempeño del esquema durante una implementación real. En consecuencia, los resultados sustentan la incorporación de la etapa de caracterización, pero no demuestran todavía que su aplicación mejore la eficiencia global del flujo inverso.

Relación con la economía circular

La recuperación de residuos metálicos permite conservar materiales dentro de los ciclos productivos y disminuir la necesidad de utilizar materias primas vírgenes. El Plan de Acción para la Economía Circular de la Comisión Europea incluye la recuperación y reincorporación de materiales entre las medidas dirigidas a avanzar hacia sistemas productivos más circulares (European Commission, 2020). El acero posee propiedades que favorecen su recuperación y reciclaje. La World Steel Association (2024) señala que puede reciclarse repetidamente, por lo que la clasificación adecuada de la chatarra constituye una actividad relevante para conservar el valor de los materiales y facilitar su retorno a los procesos productivos.

En el contexto analizado, la caracterización no representa por sí sola un proceso de valorización. Su función consiste en generar información que facilite la separación, el almacenamiento y la preparación de los materiales para su aprovechamiento posterior. Esta distinción evita atribuir a una etapa preliminar efectos ambientales u operativos que solo podrían comprobarse mediante la evaluación integral del sistema.

La incorporación de criterios físicos y operativos puede mejorar la organización del material recuperado y aportar información para seleccionar condiciones de manipulación y transporte. Su contribución efectiva a la economía circular dependerá, sin embargo, de que la chatarra clasificada ingrese a procesos de reciclaje o valorización y sea reincorporada a nuevas cadenas productivas.

Limitaciones y perspectivas de aplicación

Los resultados deben interpretarse según el alcance descriptivo del estudio. Se examinaron 30 muestras, cinco por categoría, seleccionadas entre los materiales recuperados disponibles. Por esta razón, los valores obtenidos corresponden exclusivamente a las piezas analizadas y no representan la totalidad de la chatarra metálica generada en el Estado de México.

La determinación del volumen y la densidad estuvo limitada por la geometría irregular o compleja de algunas muestras y por la información dimensional disponible. En ciertos materiales no fue posible diferenciar con precisión el volumen metálico de los espacios vacíos, cavidades o configuraciones abiertas. Por ello, estas variables no se utilizaron para comparar las categorías ni para identificar de manera absoluta los materiales.

Otra limitación corresponde al detalle técnico disponible sobre los instrumentos de medición dimensional y pesaje. Los resultados reflejan los registros obtenidos durante el levantamiento de datos, pero la ausencia de información completa sobre la precisión instrumental restringe la reproducibilidad del procedimiento. Esta condición debe considerarse al interpretar las diferencias observadas.

El estudio tampoco evaluó costos, distancias, consumo energético, capacidad de almacenamiento ni emisiones asociadas con la recuperación y el transporte. En consecuencia, no es posible determinar si la incorporación de la etapa de caracterización produce beneficios económicos o ambientales en el conjunto del sistema de logística inversa.

Futuras investigaciones deberán ampliar el número y la procedencia de las muestras, definir criterios de selección y documentar las características técnicas de los instrumentos empleados. También será necesario estandarizar la medición del volumen efectivo para cada tipo de geometría y comprobar la repetibilidad de los resultados.

La identificación física podría complementarse con pruebas químicas, magnéticas, espectrométricas o sistemas de visión artificial. La utilidad de estas alternativas deberá evaluarse considerando su precisión, costo, tiempo de aplicación y viabilidad en centros de acopio o instalaciones de

recuperación. También convendría comparar los procedimientos manuales y automatizados para determinar si reducen los tiempos de clasificación sin afectar la confiabilidad de la identificación.

Para valorar la aplicación del esquema propuesto será necesario realizar pruebas en condiciones operativas reales. Estas evaluaciones deberían considerar el flujo de entrada, la capacidad de procesamiento, los requerimientos de almacenamiento, las distancias de transporte y el destino de los materiales recuperados. La incorporación de indicadores económicos y ambientales permitiría determinar si la caracterización contribuye efectivamente a mejorar el desempeño del sistema.

Síntesis de los resultados y aporte del estudio

Los resultados respaldan la incorporación de una etapa sistemática de caracterización antes de la clasificación, consolidación, almacenamiento y transporte de la chatarra. La masa, las dimensiones y los tiempos de operación fueron variables susceptibles de medición y comparación entre las muestras. La configuración geométrica aportó información adicional para interpretar las diferencias operativas, mientras que la densidad quedó condicionada a la obtención de un volumen confiable.

El principal aporte del estudio consiste en proporcionar una base empírica para integrar criterios físicos y operativos en un esquema de logística inversa aplicado a la chatarra metálica. Los datos muestran que materiales con masas relativamente cercanas pueden exigir tiempos y condiciones de manipulación diferentes. Esta observación justifica que la clasificación no se apoye exclusivamente en el peso.

La integración propuesta puede contribuir a organizar el flujo de materiales recuperados y apoyar decisiones relacionadas con su recepción, clasificación y almacenamiento. Su efecto sobre la eficiencia, los costos y la valorización deberá comprobarse mediante una implementación posterior, de acuerdo con las condiciones regionales y operativas en las que se aplique el esquema (European Commission, 2020; Govindan & Soleimani, 2017).

Los resultados también deben interpretarse considerando que la reciclabilidad técnica del acero no garantiza por sí misma el cierre efectivo de los ciclos, pues la conservación de su valor depende de la calidad y separación de la chatarra recuperada (Broadbent, 2016). Los desarrollos recientes muestran

que la masa y la categoría de piezas metálicas pueden estimarse conjuntamente mediante imágenes de profundidad y modelos de aprendizaje automático, aunque su aplicación exige bases de datos consistentes y condiciones controladas de captura (Díaz-Romero et al., 2022). También se han propuesto clasificadores basados en imágenes para estimar el espesor de piezas de acero presentes en chatarra pesada (Daigo et al., 2023). La disponibilidad de conjuntos de datos multimodales confirma la necesidad de documentar de manera estandarizada las características visuales, geométricas y físicas de los materiales antes de automatizar su reconocimiento (Schäfer et al., 2023). Por ello, futuras evaluaciones del esquema propuesto deberían combinar indicadores de cantidad recuperada, calidad de clasificación, tiempo, costos y destino efectivo del material, evitando asumir que el volumen recolectado constituye por sí solo una medida suficiente de circularidad (Haupt et al., 2017).

CONCLUSIONES

La caracterización de las 30 muestras de chatarra metálica permitió identificar diferencias descriptivas en la masa, las dimensiones, la configuración geométrica y los tiempos de medición y pesaje. Estas variables aportan criterios cuantificables para organizar la recepción, clasificación, manipulación y almacenamiento de los materiales analizados. Los resultados se circunscriben a las muestras examinadas y no representan la totalidad de la chatarra generada en el Estado de México.

La masa resultó útil para cuantificar el material recuperado, pero no explicó por sí sola la complejidad de su caracterización. Las dimensiones y la geometría proporcionaron información adicional sobre los requerimientos de espacio y manipulación. El volumen y la densidad no pudieron determinarse de manera confiable en todas las muestras, por lo que se mantuvieron como variables complementarias cuya incorporación exige procedimientos volumétricos adaptados a cada tipo de pieza.

Los tiempos de operación también variaron entre las categorías. La malla ciclónica galvanizada calibre 12.5 presentó el mayor tiempo total medio de caracterización, pese a registrar una masa inferior a la del IPR, la placa y la flecha. Este resultado indica que la planificación del proceso no debe basarse

únicamente en el peso, sino que también debe considerar la forma, las dimensiones y el tiempo requerido para medir, manipular y pesar los materiales.

La integración de estos criterios proporciona una base técnica para incorporar la caracterización como etapa de un esquema de logística inversa aplicado a la chatarra metálica. Su utilización puede apoyar las decisiones relacionadas con la clasificación, el almacenamiento, la consolidación y el transporte. No obstante, el estudio no evaluó la eficiencia, los costos ni los efectos ambientales del esquema durante una implementación real, por lo que sus aportes tienen carácter descriptivo y propositivo.

Futuras investigaciones deberán ampliar el número y la procedencia de las muestras, estandarizar la medición del volumen y documentar las características de los instrumentos utilizados. También será necesario incorporar costos de transporte, distancias entre generadores y centros de acopio, capacidad de almacenamiento, consumo energético y emisiones. Estas variables permitirán evaluar si la caracterización contribuye efectivamente a mejorar el flujo de materiales y su reincorporación a los procesos productivos, de acuerdo con los principios de la logística inversa y la economía circular (European Commission, 2020; Rogers & Tibben-Lembke, 1999).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Broadbent, C. (2016). Steel's recyclability: Demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1658–1665. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1081-1>
- Brunner, P. H. (2011). Urban mining: A contribution to reindustrializing the city. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 339–341. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00345.x>
- Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3), 228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>

- Daigo, I., Murakami, K., Tajima, K., & Kawakami, R. (2023). Thickness classifier on steel in heavy melting scrap by deep-learning-based image analysis. *ISIJ International*, 63(1), 197–203. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-331>
- Díaz-Romero, D. J., Van den Eynde, S., Sterkens, W., Engelen, B., Zaplana, I., Dewulf, W., Goedemé, T., & Peeters, J. R. (2022). Simultaneous mass estimation and class classification of scrap metals using deep learning. *Resources, Conservation and Recycling*, 181, Article 106272. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106272>
- European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe* (COM/2020/98 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- Gao, Z., Sridhar, S., Spiller, D. E., & Taylor, P. R. (2020). Applying improved optical recognition with machine learning on sorting Cu impurities in steel scrap. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6(4), 785–795. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00300-8>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A *Journal of Cleaner Production* focus. *Journal of Cleaner Production*, 142, 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.126>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F., & Sonnemann, G. (2011). What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 355–366. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>

- Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management*, 60, 56–74.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.015>
- Haupt, M., Vadenbo, C., & Hellweg, S. (2017). Do we have the right performance indicators for the circular economy? Insight into the Swiss waste management system. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 615–627. <https://doi.org/10.1111/jiec.12506>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Koyanaka, S., & Kobayashi, K. (2010). Automatic sorting of lightweight metal scrap by sensing apparent density and three-dimensional shape. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(9), 571–578.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.10.014>
- Mesina, M. B., de Jong, T. P. R., & Dalmijn, W. L. (2007). Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor. *International Journal of Mineral Processing*, 82(4), 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.10.006>
- Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, 337(6095), 690–695.
<https://doi.org/10.1126/science.1217501>
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1999). *Going backwards: Reverse logistics trends and practices*. Reverse Logistics Executive Council.
- Schäfer, M., Faltings, U., & Glaser, B. (2023). DOES: A multimodal dataset for supervised and unsupervised analysis of steel scrap. *Scientific Data*, 10, Article 780.
<https://doi.org/10.1038/s41597-023-02662-6>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2026). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2026*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-dbgir-2026>

World Steel Association. (2024). *World Steel in Figures 2024*. <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/>

Xu, W., Xiao, P., Zhu, L., Zhang, Y., Chang, J., Zhu, R., & Xu, Y. (2023). Classification and rating of steel scrap using deep learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, Article 106241. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106241>