

HUELLA AMBIENTAL DE LA CIRCULARIDAD

Impactos del Aprovechamiento de Residuos Visión Circular ANDI



ANDI | MÁS PAÍS

HUELLA AMBIENTAL DE LA CIRCULARIDAD

Impactos del Aprovechamiento
de Residuos Visión Circular ANDI



Dirección del estudio– Visión Circular ANDI

Mónica Villegas, Directora

Diana Garcia, Coordinadora de Relacionamiento y Circularidad

Liderazgo técnico – Casostenible

Felipe Restrepo

Valentina Ruge

Andrea Bolaños



Diseño y diagramación – Puntoaparte Editores

www.puntoaparte.com.co



Contribución y agradecimiento especial – Empresas Gestoras y

Transformadoras aliadas a Visión Circular ANDI que hicieron parte del estudio aportando información relevante y con participación activa.

Gabriel Sabogal y Juliana Ospina, Coordinadores regionales Visión Circular ANDI, y a su equipo

CONTENIDO

Introducción

4

1

Objetivos

6

2

Análisis de
ciclo de vida

8

3

Análisis de
Inventario de Ciclo
de Vida (ICV)

17

4

Evaluación de
Impacto de Ciclo
de Vida (ECV)

26

5

Interpretación
del ciclo de vida

31

6

Línea base
para la definición
de acciones
de diseño

35

7

Recomendaciones

38

8

Conclusiones

40

R

Referencias

42

A

ANEXOS

45

Introducción

En Colombia, durante los últimos catorce años se ha fortalecido de manera progresiva el marco regulatorio asociado a la gestión de residuos posconsumo, particularmente en lo referente a envases y empaques. Un punto clave ocurrió con la expedición de las Resoluciones 1407 de 2018 y 1342 de 2020 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en las cuales se estableció la obligación a las empresas que ponen en el mercado o se benefician del uso de envases y empaques asuman la responsabilidad de su gestión posconsumo a través de programas formales de aprovechamiento. Esta normativa fijó metas progresivas de aprovechamiento, partiendo de un 10 % en 2021 y avanzando hasta un 30 % en 2030, lo que ha impulsado de manera decisiva la consolidación de sistemas de gestión y modelos de economía circular en el país.

A este marco se suma la Ley 2232 de 2022, mediante la cual Colombia avanza en la eliminación progresiva de plásticos de un solo uso. Su entrada en vigor desde 2024 establece metas adicionales que fortalecen la circularidad, entre ellas: “Para 2030, al menos el 30 % de las botellas, envases y recipientes de polietileno de alta densidad deberán ser reciclados” y “Para 2025, las botellas PET de agua potable deberán fabricarse con al menos un 50 % de material reciclado posconsumo nacional o posindustrial, porcentaje que aumentará al 90 % para 2030, priorizando el uso de material reciclado de origen nacional”.

En este contexto regulatorio exigente y en evolución, el programa Visión Circular ANDI ha trabajado durante más de cinco años en consolidar un modelo de economía circu-

lar para envases y empaques basado en la articulación efectiva de actores a lo largo de toda la cadena de valor. A través de acciones colaborativas y estrategias competitivas, el programa no solo facilita el cumplimiento de la normatividad vigente, sino que también supera de manera consistente sus metas, contribuye al avance de los compromisos corporativos ESG y genera impactos ambientales positivos medibles a escala nacional.

Según las cifras más recientes (ANDI, 2026), hasta 2025 Visión Circular ANDI ha logrado aprovechar más de 281.000 toneladas de materiales de envase y empaque, incluyendo papel, cartón, vidrio, metal, multimaterial, plásticos rígidos y plásticos flexibles, alcanzando una cobertura en el último año en 217 municipios de 30 departamentos del país. Estos resultados han sido posibles gracias a la articulación entre productores, fabricantes, consumidores, gestores, transformadores y autoridades locales.

Para Visión Circular ANDI, medir los impactos ambientales es un habilitador estratégico de gestión, decisión e incidencia. Cuantificar de manera rigurosa la magnitud del aprovechamiento que se logra a partir del cumplimiento de las más de 380 empresas vinculadas permite, en primer lugar, traducir la gestión operativa en valor ambiental verificable —particularmente en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, menor presión sobre rellenos sanitarios y sustitución de materias primas vírgenes— y, en segundo lugar, identificar con precisión las palancas que maximizan desempeño a lo largo de la cadena (diseño, recolección, calidad del material, transformación y reincorporación).

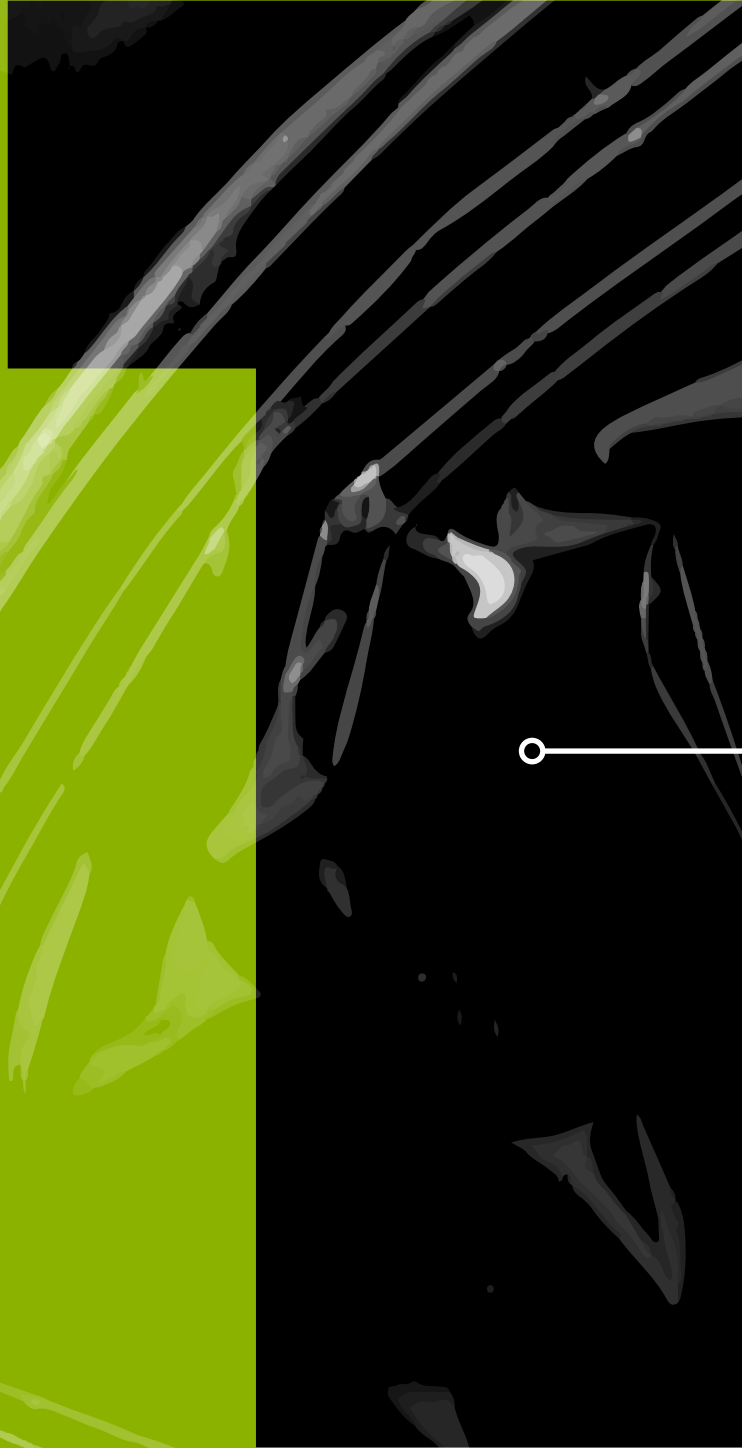
Esta medición es clave para tres frentes: (i) optimización del modelo, al orientar decisiones hacia soluciones más costo-efectivas y de mayor impacto, incluyendo aquellas con mayor eficiencia en reducción de carbono; (ii) alineación regulatoria y técnica, al sustentar con evidencia el cumplimiento y la mejora continua frente a las exigencias REP y su contribución a metas de descarbonización; y (iii) movilización de recursos e inversión, al demostrar resultados cuantificables que reducen la incertidumbre para financiadores y habilitan acceso a instrumentos de financiamiento climático. En este sentido, la gestión del programa no solo evita la disposición inadecuada, sino que genera beneficios ambientales medibles en clave de descarbonización y posicionar la circularidad como una estrategia concreta de mitigación climática, no solo de cumplimiento.

Para dar respuesta a esta necesidad, se desarrolla el presente Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo bajo un enfoque de cuna a tumba¹, en el cual se evalúan tres escenarios: un escenario Business as Usual (BAU) que representa el modelo lineal típico de fabricación con materias primas vírgenes y disposición final; un escenario que representa la gestión real articulada por Visión Circular ANDI, y un escenario de impactos evitados, que cuantifica los beneficios ambientales resultantes de la sustitu-

ción de materia prima virgen y de la no disposición final. Este análisis permite evaluar categorías de impacto como potencial de calentamiento global o también llamado huella de carbono, consumo de agua, demanda de energía, entre otras, ofreciendo una visión integral del desempeño ambiental del sistema de gestión de envases y empaques operado por el programa.

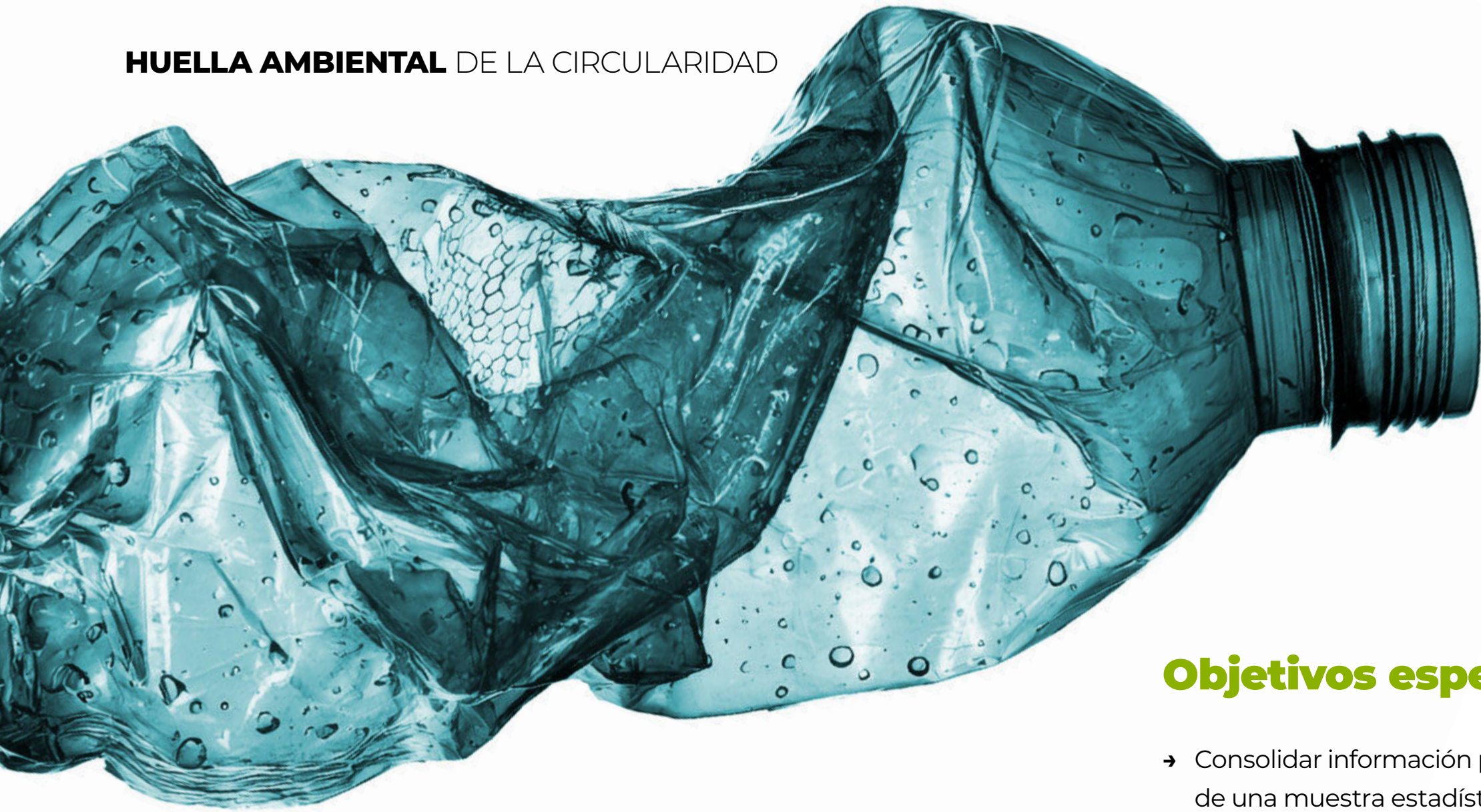
Los resultados del estudio fortalecerán los argumentos técnicos del programa para la toma de decisiones, facilitarán la articulación con nuevos grupos de interés, ofrecerán una línea base para estudios futuros, ante la ausencia de análisis previos de este tipo en Colombia, y permitirán la identificación de oportunidades de mejora que potencien aún más los beneficios ambientales del modelo.

1. Se refiere a la evaluación completa de los impactos ambientales de un producto o servicio desde la extracción inicial de materias primas hasta su disposición final como residuo.



OBJETIVOS





Objetivo general

Evaluar, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044, los potenciales impactos y beneficios ambientales asociados a la gestión y transformación de materiales de envase y empaque realizada a través de la articulación del Colectivo Visión Circular ANDI, mediante la comparación entre:

- i. el modelo actual de aprovechamiento implementado por el programa,
- ii. un escenario de disposición final en relleno sanitario, y
- iii. un escenario de fabricación de materiales a partir de materias primas vírgenes.

Objetivos específicos

- Consolidar información primaria del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) proveniente de una muestra estadísticamente representativa de gestores y transformadores, para cada una de las siete corrientes de materiales evaluadas.
- Contrastar los impactos ambientales generados por las operaciones de recolección, clasificación y transformación con los potenciales beneficios ambientales derivados de evitar los impactos asociados a un sistema lineal basado en la producción de materias primas vírgenes y la disposición final en relleno sanitario.
- Comunicar de manera clara, rigurosa y técnicamente fundamentada al Colectivo Visión Circular ANDI y a sus grupos de interés los resultados obtenidos en las categorías de impacto seleccionadas, facilitando su comprensión integral y su uso en toma de decisiones estratégicas, divulgación y fortalecimiento de metas de sostenibilidad.

Para información sobre el Marco Conceptual y Metodológico consultar el Anexo 1.



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA



El análisis de ciclo de vida (ACV) constituye el marco metodológico central de este estudio, permitiendo cuantificar de forma sistemática las cargas e impactos ambientales asociados a los escenarios de gestión definidos para las siete corrientes de materiales evaluadas. La metodología se desarrolló conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044, estructurando el proceso en cuatro fases:



En esta sección se describen los elementos metodológicos centrales aplicados en la fase de objetivo y alcance, incluyendo la unidad funcional, los límites del sistema, las etapas modeladas y los diagramas de cada escenario.

Definición del objetivo y alcance

OBJETIVO DEL ACV

El objetivo del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es **evaluar y comparar los impactos ambientales** asociados a tres escenarios alternativos de gestión de envases y empaques posconsumo en Colombia durante el año 2024:

- i. **Escenario 1 – Economía lineal (BAU):** flujo tradicional de disposición final en relleno sanitario o valorización energética cuando aplica.
- ii. **Escenario 2 – Gestión Visión Circular ANDI:** desempeño ambiental de la cadena real de recolección, clasificación y transformación articulada por Visión Circular ANDI.
- iii. **Escenario 3 – Impactos evitados:** beneficios ambientales netos derivados de la sustitución de materias primas vírgenes y de la no disposición final, atribuibles al modelo circular promovido por el colectivo.

Este ACV busca:

- Identificar las cargas ambientales asociadas a cada etapa de la cadena de gestión.
- Cuantificar los beneficios ambientales del modelo circular frente al modelo lineal.
- Establecer las diferencias por corriente de material (papel, cartón, vidrio, metal, plástico rígido, plástico flexible y multimaterial).
- Generar información técnica confiable para la toma de decisiones, mejora continua e inversión en economía circular.

El estudio se desarrolla bajo un enfoque comparativo y atribucional. Para cuantificar los beneficios netos del Escenario 3, se aplicó un enfoque de sustitución (expansión de sistema), acreditando la producción evitada de material virgen equivalente y la disposición final evitada, conforme a los supuestos definidos en el modelado

Aplicación prevista y público objetivo

Los resultados de este ACV están destinados a:

- **Visión Circular ANDI**, como línea base técnica para evaluar el desempeño del programa a nivel nacional y orientar estrategias de mejora.
- **Empresas productoras y transformadoras**, como insumo para decisiones de inversión, cumplimiento normativo y fortalecimiento de sus estrategias de sostenibilidad.
- **Autoridades reguladoras**, para la comprensión del aporte ambiental de los modelos de responsabilidad extendida y sus beneficios frente a la gestión lineal.
- **Actores académicos y técnicos**, interesados en la caracterización ambiental del sistema colombiano de reciclaje.
- **Aliados estratégicos y grupos de interés**, que requieren evidencia verificable del impacto del programa.

La aplicación prevista del estudio incluye:

- soporte técnico para comunicación externa y reportes ESG,
- análisis comparativos de desempeño entre procesos,
- identificación de puntos críticos,
- y cuantificación de beneficios ambientales atribuibles al modelo circular.

Este ACV no está diseñado para declaraciones comparativas públicas entre productos o empresas, sino para la caracterización ambiental del sistema y la comparación entre escenarios definidos internamente.

UNIDAD FUNCIONAL

La unidad funcional definida para este estudio es:

Gestionar y transformar una (1) tonelada de material secundario de envase y empaque —por corriente de material: vidrio, papel, cartón, plásticos flexibles, plásticos rígidos, metal y multimaterial— en el contexto operativo de Colombia durante el año 2024, a través de la red de gestores y transformadores articulados por Visión Circular ANDI.

Esta unidad funcional permite representar de manera consistente los flujos físicos gestionados por el programa y comparar los impactos ambientales entre los tres escenarios evaluados. La UF está basada en la operación real de recolección, clasificación, pretratamiento, transformación y manejo de rechazos registrada en 2024.

Es importante aclarar que las corrientes de material gestionadas no necesariamente regresan a un uso idéntico al del material original. Cada familia de material presenta rutas de transformación distintas según su composición, su pureza y la tecnología disponible en los transformadores. Por esta razón, la unidad funcional se define en términos de una tonelada de material gestionado, sin asumir equivalencias estrictas entre material secundario y material virgen, ni imponer un tipo específico de circularidad para todas las corrientes. Este enfoque permite comparar de manera consistente los impactos ambientales asociados a la gestión y transformación de cada tonelada, independientemente del destino o aplicación del material recuperado.

Esta definición asegura comparabilidad interna, coherencia con el balance de masas y alineación metodológica con los enfoques de ACV aplicados en sistemas de recuperación de materiales.

LÍMITES DEL SISTEMA

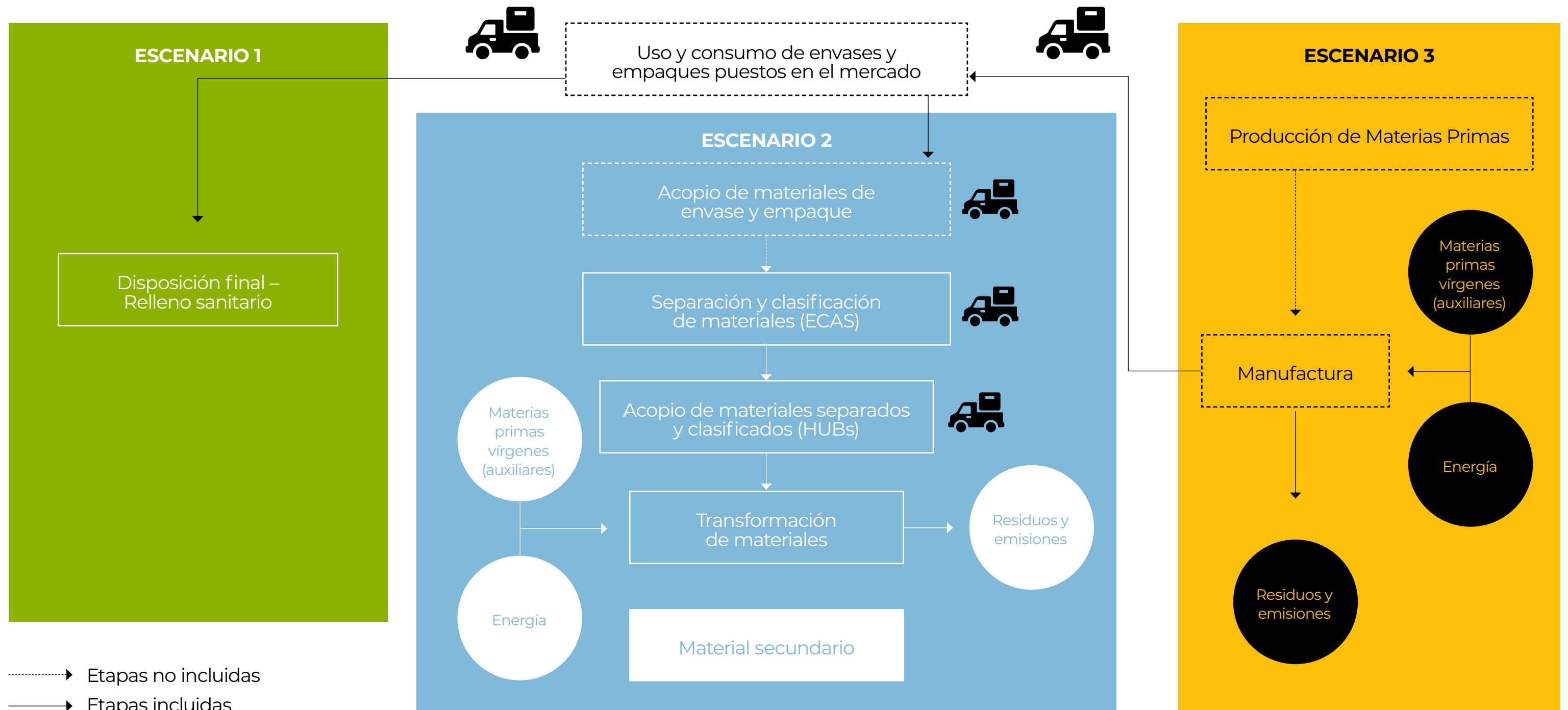
Los límites del sistema se definieron para capturar las etapas relevantes asociadas a los tres escenarios comparativos evaluados en este estudio:

- i. Modelo lineal o Business As Usual (BAU),
 - gestión observada en la red de Visión Circular ANDI, e
- ii. impactos evitados por sustitución de materia prima virgen y no disposición final.

La delimitación sigue las directrices establecidas en las normas ISO 14040 y 14044, permitiendo comparar de forma coherente las cargas y beneficios asociados a cada ruta de gestión de envases y empaques posconsumo en Colombia durante 2024.

Figura 1. Límites del sistema y estructura general de los escenarios evaluados.

Fuente: Autores



Nota técnica: El diagrama sintetiza visualmente los procesos incluidos en cada escenario y aclara las diferencias entre el flujo lineal (Escenario 1), la cadena circular gestionada por Visión Circular (Escenario 2) y los procesos evitados que generan beneficios netos (Escenario 3). La etapa de transformación se representa mediante una caja genérica, dado que los detalles tecnológicos específicos varían entre corrientes de material y no afectan la estructura del modelo comparativo.

ESCENARIOS COMPARATIVOS

El estudio se estructura a partir de tres escenarios mutuamente excluyentes y metodológicamente consistentes, diseñados para representar las alternativas plausibles de gestión de envases y empaques posconsumo en Colombia. Cada escenario cuenta con límites del sistema definidos, supuestos operativos explícitos y reglas de coherencia que permiten comparar sus cargas ambientales y estimar los beneficios netos atribuibles al modelo circular promovido por Visión Circular ANDI.

A continuación, se describen en detalle.

Escenario 1 — Economía lineal (BAU Colombia)

Objetivo.

Representar el impacto ambiental asociado a la gestión ordinaria del residuo posconsumo en ausencia del modelo de articulación del colectivo Visión Circular ANDI, reflejando el comportamiento típico de los sistemas lineales predominantes en el país.

Pregunta que responde.

¿Cuáles serían los impactos ambientales si los materiales de envase y empaque no ingresaran a cadenas de aprovechamiento y fueran llevados a disposición final en rellenos sanitarios?

Límite del sistema (síntesis).



Qué se mide y reporta.

- Impactos por tonelada de unidad funcional en las categorías seleccionadas (ej.: huella de carbono, energía, agua, agotamiento de recursos).
- Sin créditos por sustitución de material virgen (no existe retorno al sistema productivo).

Uso en la comparación.

Constituye la **línea base** que permite cuantificar el impacto ambiental de mantener un sistema lineal y comparar los beneficios del modelo de Visión Circular ANDI frente a una no-intervención.

Escenario 2 — Gestión Visión Circular ANDI (modelo observado)

Objetivo.

Cuantificar las cargas ambientales derivadas de la gestión y transformación de los materiales de envase y empaque dentro de la red de gestores y empresas transformadoras articuladas por Visión Circular ANDI durante 2024.

Pregunta que responde.

¿Cuáles son los impactos ambientales inherentes a la cadena de aprovechamiento — incluyendo logística posconsumo, clasificación, acondicionamiento y transformación?

Límite del sistema (síntesis).



El sistema evaluado incluye la recolección posconsumo y el transporte hacia estaciones de clasificación y acondicionamiento (ECA/gestores), donde se realizan operaciones de segregación y preparación del material. Cuando aplica, se consideran etapas de consolidación en hubs logísticos/intermediarios y el transporte hacia las plantas de transformación. La transformación se modela de acuerdo con la tecnología aplicable a cada corriente (p. ej., lavado–secado–extrusión/pelletizado; pulpeo–limpieza–refinado). Adicionalmente, se incluye la generación y gestión de rechazos y subproductos del proceso (p. ej., finos, lodos, escorias, purgas) y sus destinos (valorización, coprocesamiento o disposición final).

Qué se mide y reporta.

- Impactos por unidad funcional considerando todos los procesos de la cadena para lograr la transformación del material.
- Balances de masas por etapa (rendimientos, pérdidas, cierres).
- Sin créditos por sustitución de material virgen (atribuidos únicamente al Escenario 3).

Uso en la comparación.

Permite identificar palancas de reducción o puntos de especial interés y posible mejora (hotspots) dentro de la cadena de Visión Circular ANDI y sirve de base para contrastar frente a la producción virgen (vía créditos del Escenario 3).



Escenario 3 — Beneficios (impactos evitados)

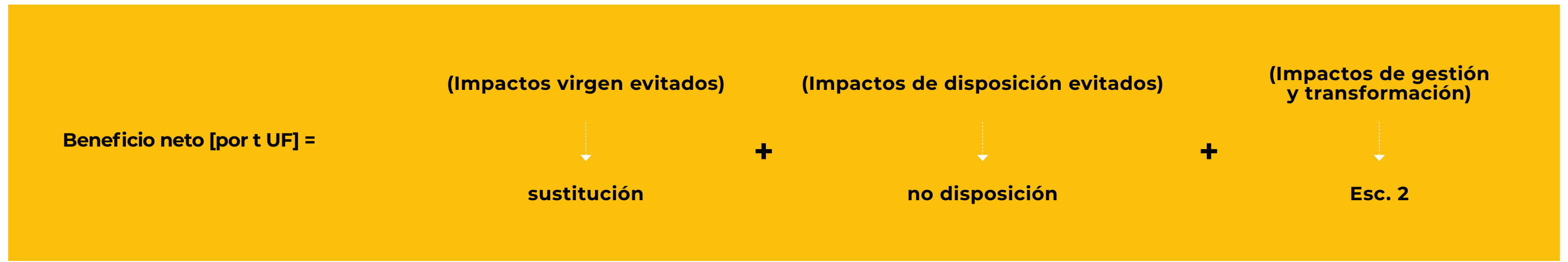
Objetivo. Estimar el beneficio neto atribuible a la circularidad mediante un balance que considere:

- i. los impactos evitados por sustituir materiales vírgenes equivalentes con materiales secundarios, y
- los impactos evitados por no disponer los residuos en el sistema lineal de referencia (relleno sanitario).

Pregunta que responde.

¿Cuál es el beneficio ambiental neto de la gestión circular (Escenario 2) cuando se contabilizan los impactos evitados por sustitución de materia prima virgen y por la no disposición final que habría ocurrido bajo el Escenario 1?

Marco de cálculo.



Para cada corriente de material y calidad equivalente, el **beneficio neto** se calcula como:

Coherencia de límites. Los procesos de producción virgen desplazados y la disposición no realizada se contabilizan solo como créditos (no como cargas del sistema evaluado).

Qué se mide y reporta.

- Impactos evitados por unidad funcional y balance neto por corriente.
- Desglose de dos componentes de beneficio: (A) sustitución de virgen, (B) no disposición.

Uso en la comparación.

Entrega el resultado comparativo final que responde si la gestión de Visión Circular ANDI supera al escenario lineal o *Business as usual* (BAU) en términos de impactos acumulados.

Procesos excluidos

De acuerdo con criterios de corte y relevancia establecidos en ISO 14044, se excluyen:

- Fabricación de infraestructura (planta, maquinaria, equipos).
- Actividades administrativas y de soporte (oficinas, servicios).
- Fase de uso del producto originalmente envasado.
- Diseño del envase o manufactura primaria (no es objeto del estudio).



Estas exclusiones tienen impacto marginal y no alteran la comparabilidad entre escenarios.

Así mismo se excluyeron del análisis desde el planteamiento inicial de los escenarios:

- Impactos por uso y consumo de los envases y empaques puestos en el mercado.

Para información sobre suposiciones, criterios de corte, procedimientos de asignación, disponibilidad y calidad de datos y representatividad y validez de los datos consulte el **Anexo 2**.

ANÁLISIS DE INVENTARIO DE DE CICLO DE VIDA (ICV)





El Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) consiste en la recopilación, cuantificación y estructuración de todos los flujos de entrada (materia, energía, transporte) y salida (material valorizado, emisiones, rechazos) asociados a cada etapa y escenario del estudio. Esta fase es crítica para asegurar transparencia, trazabilidad y coherencia entre los procesos modelados y la realidad operativa de la red de Visión Circular ANDI durante el año 2024.

El ICV se desarrolló combinando datos primarios obtenidos de gestores y transformadores participantes, información secundaria de literatura científica y bases de datos internacionales, y los resultados del balance de masas construido para cada corriente de material.

Balance de masas

El balance de masas se desarrolló con el fin de garantizar la coherencia y trazabilidad de los flujos de materiales gestionados dentro del sistema evaluado. Para los escenarios BAU (Escenario 1) y materia prima virgen (Escenario 3), los inventarios de ciclo de vida se construyeron a partir de procesos de referencia disponibles en la base de datos Ecoinvent, seleccionados por su equivalencia tecnológica con la disposición final en relleno sanitario y con la producción primaria de cada corriente de material. Estas fuentes proporcionaron los flujos de entrada y salida necesarios para representar de manera consistente los sistemas lineales y los impactos evitados por sustitución.

Por su parte, el inventario del Escenario 2 —Gestión Visión Circular ANDI— se basó en información primaria reportada por gestores y transformadores para el año 2024, previamente validada mediante el proceso descrito en el capítulo metodológico. Este levantamiento incluyó volúmenes recibidos, rendimientos de proceso, fracciones valorizables, rechazos y pérdidas operativas. La muestra estratificada por corriente de material fue complementada con información secundaria —literatura científica y datasets técnicamente equivalentes de Ecoinvent— únicamente en los casos donde no se contó con datos operativos suficientes.

Este balance permitió verificar la correspondencia entre los flujos reportados y los volúmenes realmente valorizados, identificar rendimientos por corriente, y validar la consistencia entre los datos primarios, la literatura técnica y los perfiles tecnológicos utilizados en el ACV. En conjunto, el balance de masas funcionó como puente metodológico entre la información operativa levantada en campo y la construcción del inventario, asegurando que los tres escenarios evaluados se fundamentaran en flujos representativos, completos y verificables.

Escenario 1 - Economía lineal (BAU Colombia)

Para el Escenario 1, correspondiente al manejo lineal de los envases y empaques posconsumo, el inventario de ciclo de vida (ICV) se construyó utilizando exclusivamente datos secundarios provenientes de la base de datos Ecoinvent 3.10, bajo el enfoque cut-off, siguiendo los lineamientos metodológicos presentados. Este escenario asume que la totalidad del material posconsumo es gestionado mediante disposición final en relleno sanitario, sin procesos de aprovechamiento ni valorización material o energética.

Dado que Ecoinvent no cuenta con datasets específicos para Colombia, se seleccionaron los procesos más representativos a nivel global o Rest of World (RoW), los cuales fueron posteriormente regionalizados ajustando componentes relevantes del inventario, tales como el consumo de energía eléctrica y agua, para aproximarlos a condiciones locales. La Tabla siguiente presenta los datasets utilizados para cada familia de material:

Tabla 1. Set de datos modelados para el Escenario 1

| MATERIAL | SET DE DATOS ECOINVENT | GEOGRAFÍA | |
|-------------------|---|--|---------------------------------------|
| Plástico rígido | Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cut-off, U | RoW (Rest of the world) regionalizada a Colombia | |
| Plástico flexible | | | |
| Cartón | Waste paperboard {RoW} treatment of waste paperboard, sanitary landfill Cut-off, U | | |
| Metal | Waste aluminium {RoW} treatment of waste aluminium, sanitary landfill Cut-off, U | | |
| Papel | Waste graphical paper {RoW} treatment of waste graphical paper, sanitary landfill Cut-off, U | | |
| Multimaterial | Inert waste {RoW} treatment of inert waste, sanitary landfill Cut-off, U | | |
| Vidrio | Waste glass {GLO} treatment of waste glass, sanitary landfill Cut-off, U | | GLO (Global regionalizada a Colombia) |

En el caso del multimaterial, no existe en Ecoinvent un dataset que represente residuos multicomposición en relleno sanitario; por ello, y considerando la presencia de capas de aluminio y plástico que limitan su degradación, se modeló como un material inerte, utilizando el dataset Inert waste como aproximación más conservadora y técnicamente coherente.

Complementariamente, para garantizar una representación completa del inventario, se incluyó el transporte del material desde el punto de generación hasta el sitio de disposición final. Se asumió una distancia conservadora de **50 km** —coherente con promedios nacionales— en un vehículo compacto de residuos del servicio público de aseo, con capacidad entre 16 y 32 toneladas, de acuerdo con configuraciones típicas en Colombia.

Este enfoque permite caracterizar con precisión los impactos ambientales asociados a la gestión lineal de residuos posconsumo, sirviendo como referencia para comparar el desempeño del modelo circular articulado por Visión Circular ANDI en los escenarios posteriores.

Escenario 2 – Gestión Visión Circular ANDI

Para este escenario, se presenta el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) consolidado, que integra tanto la operación de los gestores como los procesos de transformación asociados a las categorías de material evaluadas.

GESTIÓN Y LOGÍSTICA

En el caso de los **gestores**, el inventario se construyó mediante un promedio ponderado de la logística y el consumo energético asociado a cada corriente de material. Usando factores de transporte (tkm) por tipo de vehículo y el consumo de energía eléctrica

(kWh) ponderado para la operación de las Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento (ECA), considerando los flujos desde el origen hasta el transformador final.

TRANSFORMACIÓN Y APROVECHAMIENTO

Para asegurar la representatividad y robustez del inventario de transformación, los datos se consolidan de forma agregada por corriente de material. En categorías con múltiples transformadores (como plásticos rígidos y flexibles), se aplicó una ponderación basada en la participación relativa de cada actor dentro de la muestra recolectada. Para las corrientes de metal, multimaterial y cartón, se asume el inventario del transformador primario como el estándar representativo de la categoría. Cabe notar que, para garantizar la calidad del modelo en las categorías de Vidrio y Papel, se integraron datos secundarios validados (ver sección 4.2.2), reservando la siguiente tabla para la síntesis exclusiva de los inventarios de origen primario.

Tabla 2. Consolidado de inventarios de transformación.

| Corriente Material | Tipo de Transformación | Representatividad en la Muestra (%) |
|---------------------|---|-------------------------------------|
| Cartón | Mecánica | 23.00 |
| Plásticos Flexibles | Mecánica (Lavado, molienda, peletizado) | 32.00 |
| Plásticos Rígidos | Mecánica (Recuperación y aglutinado) | 92.00 |
| Metales | Químico | 22.00 |
| Multimaterial | Mecánico | 77.00 |
| | | TOTAL |

Escenario 3 – Impactos evitados

Para este escenario se construyó el inventario de ciclo de vida (ICV) asociado a la producción primaria de los materiales empleados en envases y empaques, partiendo exclusivamente de materias primas vírgenes. Este enfoque permite establecer el impacto ambiental que tendría un modelo completamente lineal —producción, consumo y disposición final— y constituye la referencia necesaria para calcular los impactos evitados

por el modelo circular de Visión Circular ANDI. Para ello se utilizaron datasets de Ecoinvent 3.10, bajo el enfoque cut-off, complementados con información primaria o literatura científica en aquellos casos donde la base de datos no cuenta con procesos equivalentes.

La Tabla a continuación presenta los sets de datos seleccionados para cada familia de material, así como las composiciones empleadas cuando fue necesario representar mezclas de plásticos o variantes tecnológicas de un mismo producto:

Tabla 3. Sets de datos de producción primaria para el Escenario 3

| Material | Composición | Set de datos Ecoinvent | |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------|--|
| Plástico rígido | PET (Polietileno Tereftalato) | 74% | Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade {RoW} polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade Cut-off, U |
| | HDPE (Polietileno de alta densidad) | 14% | Polyethylene, high density, granulate {RoW} polyethylene production, high density, granulate Cut-off, U |
| | PP (Polipropileno) | 10% | Polypropylene, granulate {RoW} polypropylene production, granulate Cut-off, U |
| | LDPE (Polietileno de baja densidad) | 1% | Polyethylene, linear low density, granulate {RoW} polyethylene production, linear low density, granulate Cut-off, U |
| | PS (Poliestireno) | 1% | Polystyrene, general purpose {RoW} polystyrene production, general purpose Cut-off, U |
| Plástico flexible | LDPE (Polietileno de baja densidad) | 82% | Polyethylene, linear low density, granulate {RoW} polyethylene production, linear low density, granulate Cut-off, U |
| | PP (Polipropileno) | 16% | Polypropylene, granulate {RoW} polypropylene production, granulate Cut-off, U |
| | HDPE (Polietileno de alta densidad) | 2% | Polyethylene, high density, granulate {RoW} polyethylene production, high density, granulate Cut-off, U |

| Material | Composición | Set de datos Ecoinvent |
|---------------|-------------|--|
| Cartón | 50% | Containerboard, linerboard {RoW} containerboard production, linerboard, kraftliner Cut-off, U |
| | 50% | Containerboard, linerboard {RoW} containerboard production, linerboard, testliner Cut-off, U |
| Papel | 25% | Paper, woodfree, uncoated {RoW} paper production, woodfree, uncoated, at integrated mill Cut-off, U |
| | 25% | Paper, woodfree, uncoated {RoW} paper production, woodfree, uncoated, at non-integrated mill Cut-off, U |
| | 25% | Paper, woodcontaining, supercalendered {RoW} paper production, woodcontaining, supercalendered Cut-off, U |
| | 25% | Paper, woodcontaining, lightweight coated {RoW} paper production, woodcontaining, lightweight coated Cut-off, U |
| Vidrio | 33,3% | Packaging glass, brown {GLO} packaging glass production, brown, without cullet Cut-off, U |
| | 33,3% | Packaging glass, green {GLO} packaging glass production, green, without cullet Cut-off, U |
| | 33,3% | Packaging glass, white {GLO} packaging glass production, white, without cullet Cut-off, U |
| Metal | | Aluminum hydroxychloride (Información primaria DP Watering) |
| Multimaterial | | Información primaria (Cartón para bebidas) |

Plásticos rígidos

Se modeló como una mezcla de resinas representativas del flujo de envases rígidos en Colombia, según la información proporcionada por Visión Circular ANDI. Cada resina se asoció con su proceso estándar de producción virgen en Ecoinvent, garantizando equivalencia tecnológica (grado botella, general purpose o alta/baja densidad, según el caso). Esta aproximación permite reflejar la diversidad de formulaciones presentes en el mercado sin sobreponderar una sola ruta tecnológica.

Plásticos flexibles

Se utilizaron procesos de producción virgen de las resinas predominantes en la industria de empaques flexibles. La selección de datasets se basó en la presencia típica de polietilenos de baja densidad y polipropileno en películas y empaques flexibles posconsumo. El uso combinado de las rutas tecnológicas disponibles en Ecoinvent asegura la representatividad frente al portafolio real de materiales gestionados.

Cartón

La base de datos distingue entre dos tipos principales de producción de cartón: kraftliner y testliner, asociados a fibras vírgenes y recicladas, respectivamente. Dado que

ambas rutas coexisten en el mercado colombiano y generan perfiles ambientales distintos, se modelaron en proporciones equivalentes para representar adecuadamente la oferta industrial que abastece al sector de empaques.

Papel

La producción primaria de papel presenta variaciones significativas según el tipo de fibra utilizada y el nivel de recubrimiento o acabado. Para capturar de manera realista la diversidad de papeles presentes en el flujo posconsumo (papeles sin recubrimiento, papeles recubiertos, papeles con contenido de madera), se escogieron las principales rutas de fabricación disponibles en Ecoinvent, diferenciando entre procesos integrados y no integrados. Esto permite reflejar los perfiles energéticos y de insumos más comunes en el mercado.

Vidrio

Dado que en Colombia se producen envases en distintos colores, y la base de datos incluye rutas específicas para vidrio café, verde y blanco, se modelaron las tres alternativas utilizando procesos sin incorporación de calcín/cullet, puesto que el escenario representa la producción primaria desde materias primas vírgenes. De esta forma se evita subestimar los impactos asociados al vidrio virgen en un escenario lineal.

Metal (aluminio)

La transformación del aluminio recuperado en el modelo circular corresponde a un **ciclo abierto**, en el que el material se convierte en hidroxiclورو de aluminio utilizado como floculante para tratamiento de agua. Para lograr una comparación apropiada, en este escenario se reemplazó la entrada de aluminio reciclado por **aluminio primario**, manteniendo los procesos químicos reportados mediante información primaria del transformador. Con ello se modela un flujo coherente con la producción virgen del insumo químico equivalente.

Multimaterial

Dado que Ecoinvent no cuenta con un proceso de producción primaria equivalente a los envases multilaminados tipo Cartón para bebidas, se empleó información secundaria de literatura científica, específicamente el inventario presentado en Stramarkou et al. (2025), que describe detalladamente la producción de empaques multicapa con composiciones comparables a las presentes en el flujo gestionado por Visión Circular ANDI.

A partir de los inventarios de producción virgen, se calcularon los impactos ambientales asociados a la fabricación de una tonelada de material en un modelo lineal. Estos resultados se sumaron a los impactos del Escenario 1 (transporte a re-

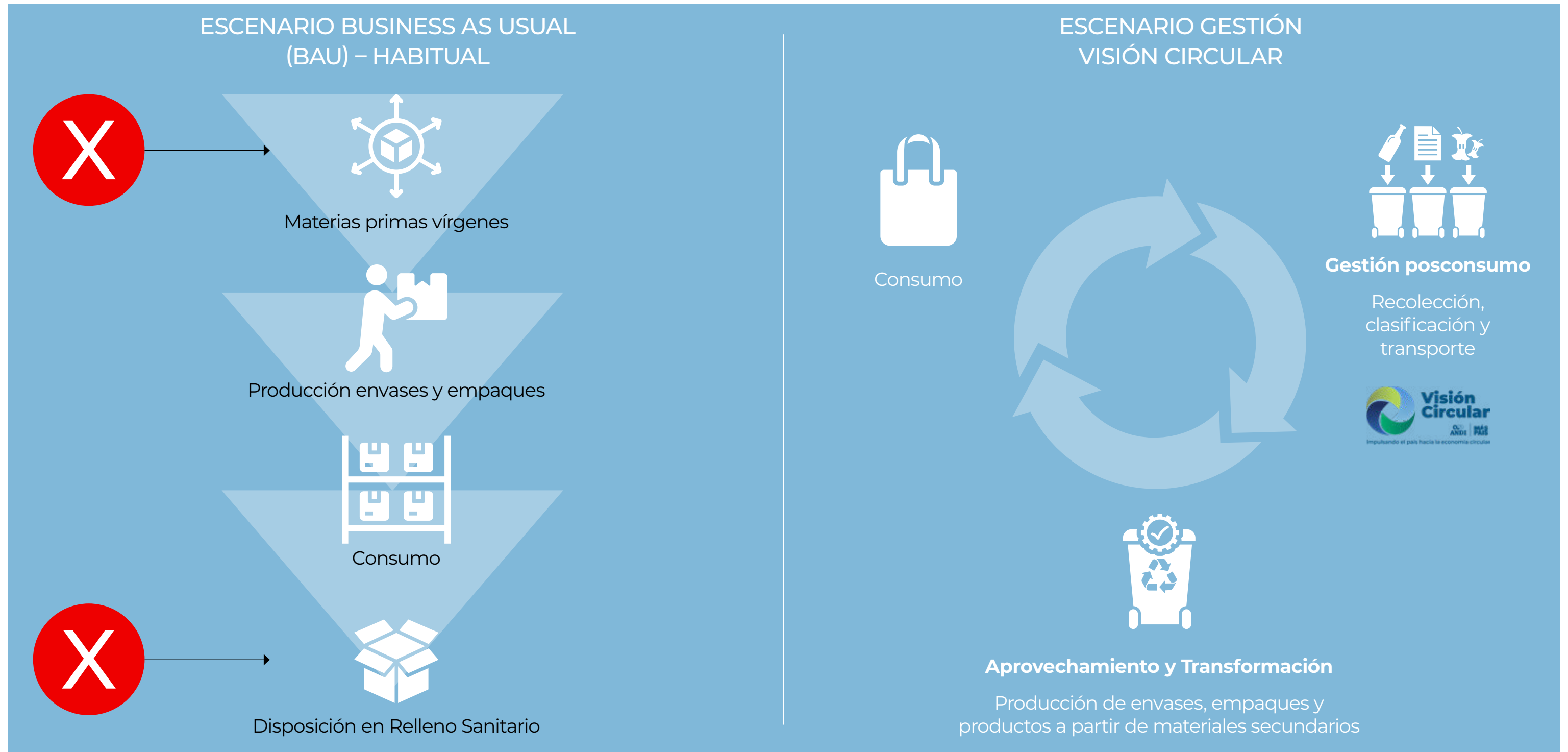
lleno sanitario y disposición final), obteniéndose así la carga ambiental completa de un sistema sin circularidad.

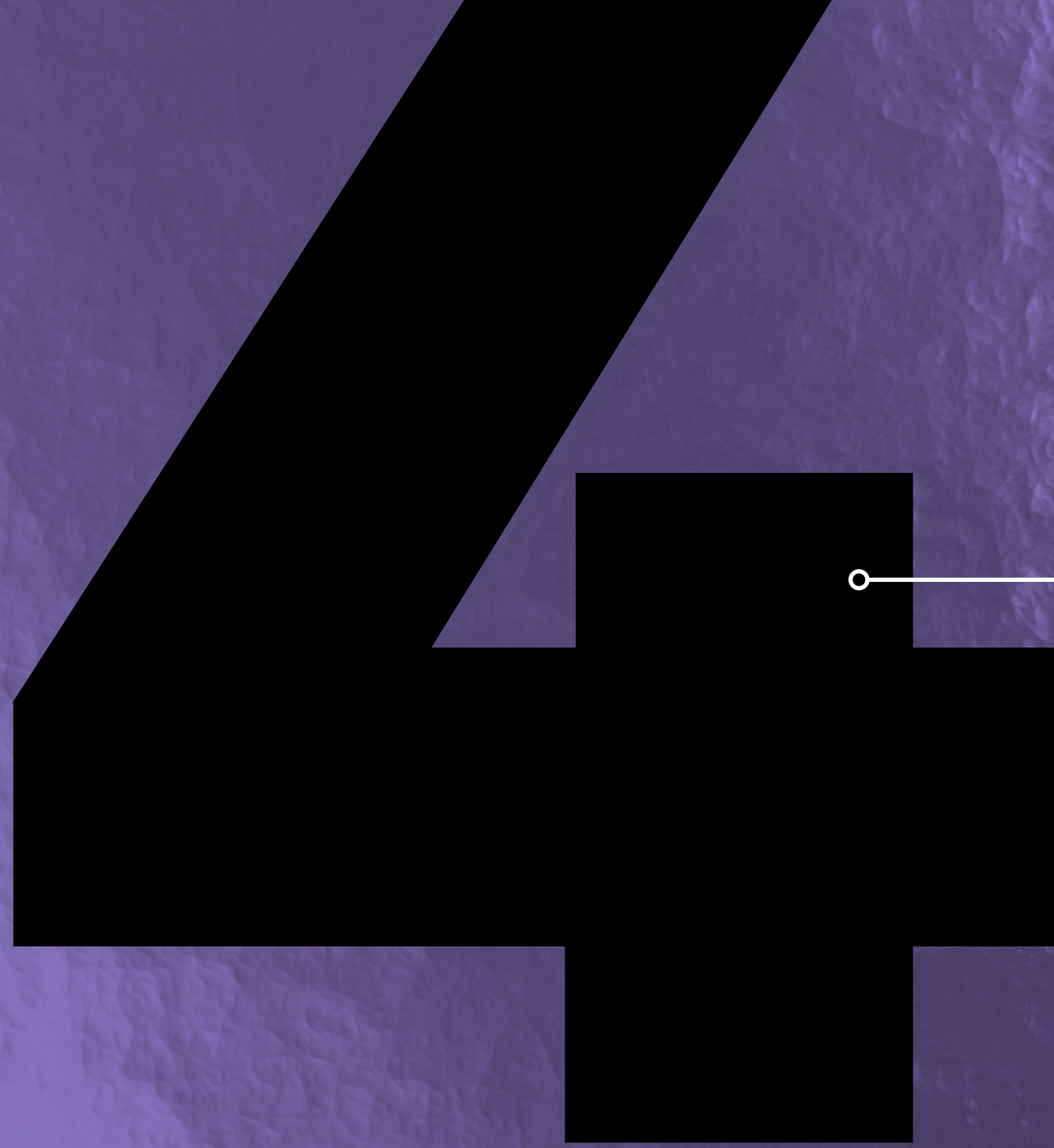
Posteriormente, esta carga total se comparó con la generada por la gestión y transformación de materiales en Visión Circular ANDI (Escenario 2), permitiendo cuantificar:

- impactos evitados por sustitución de materia prima virgen,
- impactos evitados por no disposición final,
- y el balance neto ambiental, considerando también las cargas propias de la operación del colectivo.



Figura 2. Representación gráfica de la comparación modelada en el escenario 3





**EVALUACIÓN
DE IMPACTO
DE CICLO DE
VIDA (ECV)**



Procedimiento de EICV

El análisis de ciclo de vida se desarrolló siguiendo un enfoque metodológico riguroso, conforme a las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044, que establecen los principios, requisitos y directrices para realizar un ACV. Este marco normativo asegura la calidad, consistencia y comparabilidad del estudio, alineándose con las mejores prácticas en el ámbito ambiental.

Uso del Software SimaPro 9.6

El software **SimaPro 9.6** fue empleado como herramienta principal para la modelación del ciclo de vida. Este software permitió integrar datos primarios y secundarios, realizar cálculos detallados de impactos ambientales y visualizar los flujos de entrada y salida a lo largo del ciclo de vida del producto.

Modelación del Sistema

Se modelaron todos los escenarios del análisis comparativo, incluyendo la gestión y transformación realizada por la cadena de valor de Visión Circular ANDI, el escenario de transporte y disposición final de los materiales de empaque y envase en un relleno sanitario, y el impacto ambiental asociado a su elaboración a partir de materia prima.

Selección, Clasificación y Caracterización de Impactos

En esta fase, se seleccionaron las categorías de impacto relevantes para el estudio, considerando aspectos ambientales clave como emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de energía y generación de residuos. Los flujos de entrada y salida del sistema fueron clasificados y caracterizados utilizando métodos de evaluación de impacto reconocidos, como el IPCC para emisiones de carbono.

Categorías de impacto

A continuación, se presentan las categorías de impacto ambiental seleccionadas para este análisis, las cuales permiten evaluar de manera integral los efectos de los materiales de envase y empaque en cada uno de los escenarios, tanto sobre el medio ambiente como sobre los recursos naturales. Para el análisis se emplearon varias metodologías de evaluación de acuerdo con la categoría que se deseaba reportar. A continuación, se presenta el detalle de cada una, junto con la unidad de medición y la metodología correspondiente.

Tabla 4. Categorías de impacto ambiental cuantificadas y metodologías de evaluación del ciclo de vida

| Categoría de impacto | Unidad de medida | Metodología empleada |
|--|--|--------------------------|
| Potencial de calentamiento global (GWP) Huella de carbono | kg CO ₂ e (kilogramos de dióxido de carbono eq) | IPCC 2021 GWP 100a |
| Consumo de agua | m ³ (metros cúbicos de agua) | ReCiPe Midpoint (H) |
| Demanda Acumulada de Energía (CEM) | MJ (Mega julios de energía) | Cumulative Energy Demand |
| Agotamiento de recursos abióticos - Minerales y metales | kg Sbe (kilogramos de antimonio equivalente) | CML, v. 4.8 |
| Agotamiento de recursos abióticos - Combustibles fósiles | MJ (Mega julios de energía) | CML, v. 4.8 |
| Generación de residuos (Peligrosos y no peligrosos) | kg | EDIP 2003 |

1. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL/ HUELLA DE CARBONO (GWP)

El GWP mide las emisiones de gases de efecto invernadero liberadas durante el ciclo de vida evaluado, considerando su capacidad de atrapar calor en la atmósfera. Los resultados se expresan en **kilogramos de CO₂ equivalente**, representando el impacto relativo en el cambio climático.

Se refiere al impacto general que tienen las emisiones de gases de efecto invernadero en el calentamiento global. Estos gases, como el CO₂ y el metano, retienen el calor en la atmósfera, lo que provoca el aumento de la temperatura global y afecta el clima, los ecosistemas y la calidad de vida humana. Se mide en kilogramos de CO₂ equivalente (kg CO₂ eq), considerando un horizonte de 100 años según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Esta categoría es la suma de los impactos de fuentes fósiles, biogénicas y cambios en el uso del suelo.

2. CONSUMO DE AGUA

Este indicador cuantifica el volumen total de agua dulce utilizado directa e indirectamente en las diferentes etapas del ciclo de vida. Permite evaluar la presión sobre los recursos hídricos en **metros cúbicos**, considerando su disponibilidad y sostenibilidad.

Indica la cantidad de agua utilizada en la fabricación de un producto, expresada en términos de disponibilidad global. Considera el volumen de agua consumida a lo largo del ciclo de vida de un producto o proceso, teniendo en cuenta su impacto en la salud humana y en la calidad de los ecosistemas.

3. DEMANDA ACUMULADA DE ENERGÍA

Representa la cantidad total de energía primaria utilizada a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Esta métrica incluye tanto las fuentes de energía renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, como las no renovables, como el petróleo, el gas natural y el carbón. Su unidad de medida es el megajulio (MJ), lo que permite cuantificar de manera integral el consumo energético asociado a la producción, uso y eliminación de un bien o servicio.

El análisis de la CEM es clave dentro de la evaluación ambiental de un producto, ya que permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética en distintas etapas del proceso productivo.



4. AGOTAMIENTO DE RECURSOS ABIÓTICOS – MINERALES Y METALES

Mide el consumo de recursos minerales y metálicos no renovables, expresado en kilogramos de antimonio equivalente. Este indicador refleja la presión ejercida sobre la disponibilidad de recursos abióticos críticos.

Indica la disminución de las reservas de recursos minerales y metálicos debido a su extracción y uso en actividades humanas. Se mide en kilogramos equivalentes de antimonio (kg Sb eq) y considera la disponibilidad de estos recursos en la corteza terrestre, así como su tasa de extracción en comparación con su regeneración natural. El agotamiento de minerales y metales puede afectar la sostenibilidad de sectores industriales y tecnológicos que dependen de estos insumos, aumentando la presión sobre la exploración y reciclaje de materiales.

5. AGOTAMIENTO DE RECURSOS ABIÓTICOS – COMBUSTIBLES FÓSILES

El Agotamiento de Recursos Abióticos – Combustibles Fósiles cuantifica la disminución de las reservas naturales de combustibles fósiles —principalmente petróleo, gas natural y carbón— como consecuencia de su extracción y consumo a lo largo del ciclo de vida de un producto o sistema. Esta categoría refleja el agotamiento de recursos no renovables que tardan millones de años en formarse y cuya disponibilidad es finita, lo que afecta directamente la seguridad energética global y la dependencia de fuentes no renovables.

Los resultados se expresan en mega julios (MJ), unidad que representa el contenido energético disponible en los combustibles fósiles extraídos. De esta manera, el indicador permite estimar cuánta energía fósil se requiere para producir, transportar, transformar o disponer un material, así como evaluar la eficiencia energética de los procesos involucrados. Un mayor consumo de combustibles fósiles implica un mayor agotamiento de estos recursos, lo que incrementa la presión sobre los sistemas naturales, acelera su escasez y resalta la necesidad de transitar hacia matrices energéticas más limpias y sostenibles.

En el contexto del análisis de ciclo de vida, esta categoría es especialmente relevante para evaluar sistemas productivos intensivos en energía, procesos térmicos industriales, transporte y tecnologías de transformación que dependen del uso directo o indirecto de combustibles fósiles.

6. GENERACIÓN DE RESIDUOS (PELIGROSOS Y NO PELIGROSOS)

La categoría de Generación de Residuos cuantifica la masa total de desechos producidos a lo largo del ciclo de vida de un sistema, expresada en kilogramos (kg). Este indica-

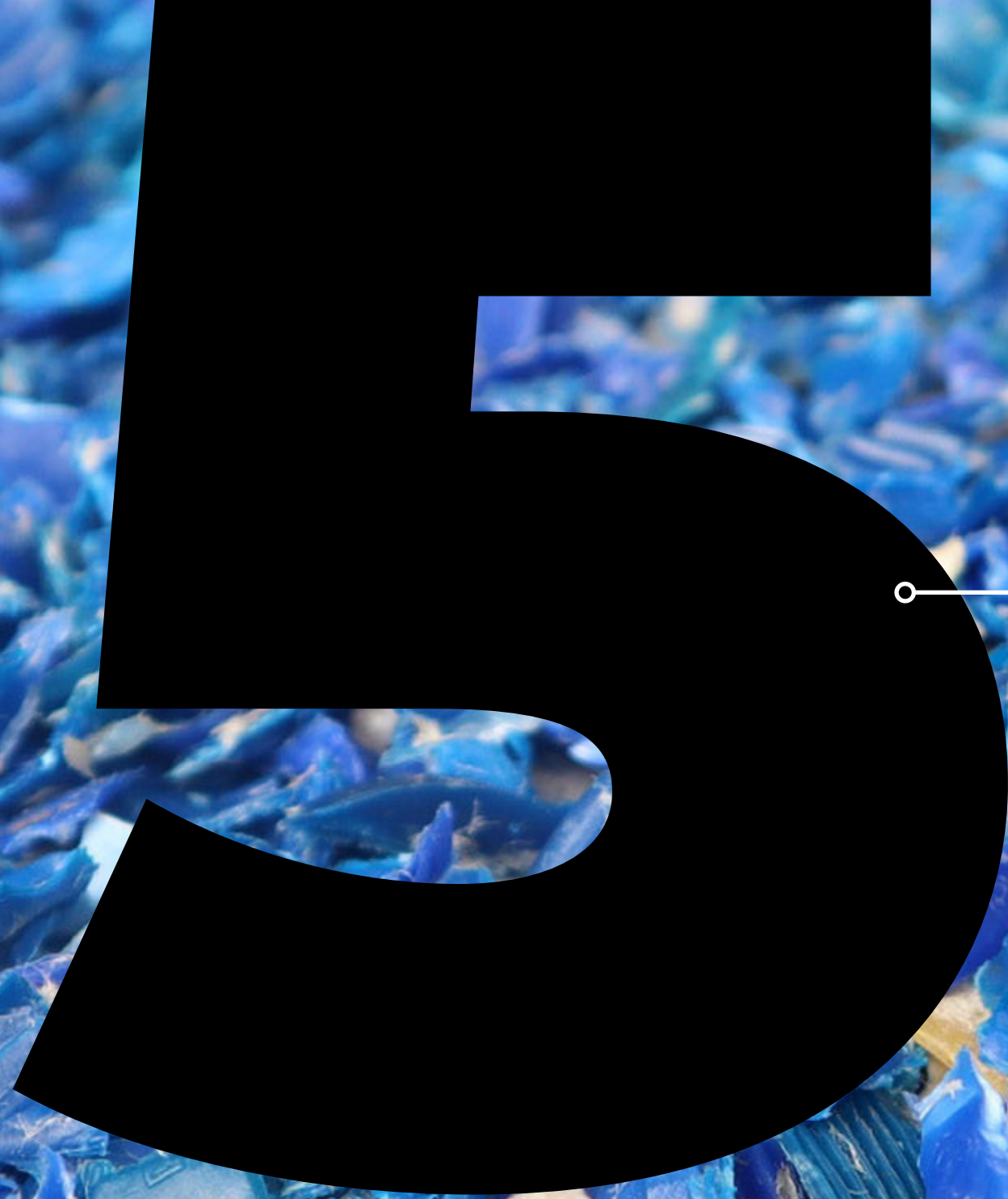
dor diferencia entre residuos peligrosos y residuos no peligrosos, permitiendo evaluar el impacto asociado al manejo, transporte y disposición final de cada tipo de residuo.

Los residuos peligrosos incluyen desechos que presentan características de toxicidad, corrosividad, inflamabilidad o reactividad, lo que implica riesgos elevados para la salud humana y el medio ambiente. Por su naturaleza, requieren tratamientos especializados, instalaciones autorizadas y medidas estrictas de control para evitar contaminación de suelos, cuerpos de agua o aire. Ejemplos comunes incluyen solventes químicos, lodos contaminados o aceites con presencia de metales pesados.

Los residuos no peligrosos corresponden a desechos que no poseen características de peligrosidad y pueden gestionarse mediante sistemas convencionales de residuos domésticos o industriales. Incluyen fracciones inertes como restos de papel y cartón no contaminados, cerámicos, vidrio no apto para valorización, escombros o impropios retirados durante procesos de clasificación y pretratamiento.

Medir estos flujos en kilogramos permite cuantificar la presión que ejerce el sistema sobre los rellenos sanitarios y evaluar la eficiencia de las estrategias de aprovechamiento. Una menor cantidad de residuos generados y enviados a disposición final refleja un desempeño más circular, mayor valorización de materiales y una reducción efectiva de los impactos asociados a la gestión de desechos.





INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA



Para la interpretación específica por corriente de material remitirse al **Anexo 3**.

Desempeño Ambiental Global

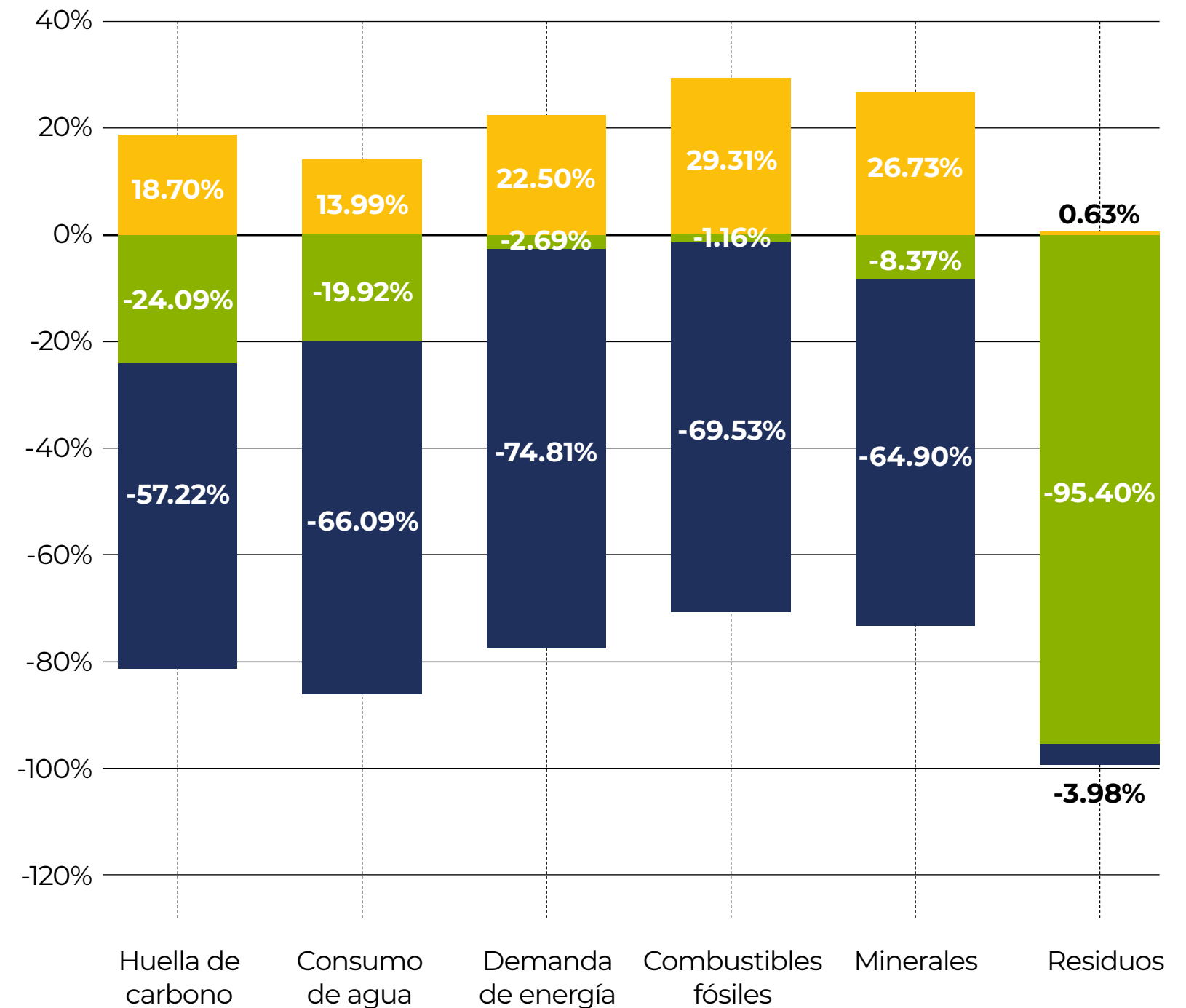
Tras el análisis detallado de las corrientes de material y sus respectivos inventarios, esta sección consolida el beneficio ambiental neto derivado de la operación colectiva de Visión Circular ANDI durante el periodo 2024.

Para obtener una visión corporativa del impacto, se realizó una ponderación por masa gestionada, integrando la representatividad de cada material (donde el cartón y los plásticos rígidos suman más del 73% de la operación) con los resultados de impacto por escenario y los porcentajes de beneficio (impactos evitados). Este enfoque permite trascender el análisis técnico individual para ofrecer una métrica unificada del valor ambiental generado por el colectivo frente a los escenarios de producción primaria (Materia Prima Virgen) y el escenario habitual (BAU: Business as usual).

Los resultados agregados demuestran que el modelo de economía circular implementado no solo optimiza la gestión de residuos, sino que actúa como un agente de eficiencia hídrica y energética a escala nacional, logrando reducciones superiores al 60% en categorías críticas como el consumo de agua y la demanda de energía.

A continuación, se presentan los indicadores consolidados de beneficio ambiental:

Figura 3. Relación porcentual por categoría de impacto – Global Visión Circular ANDI (Porcentaje de beneficio y/o impacto ambiental).



Como se observa en la Figura 11 la gestión del colectivo genera una mitigación positiva en todas las categorías evaluadas, destacándose el ahorro en recursos hídricos y energéticos. Para un análisis detallado de estas reducciones porcentuales frente a la producción con materia prima (MP) y la gestión convencional (BAU), se presentan los valores exactos en la Tabla 20.

Tabla 5. Consolidado de beneficios ambientales netos frente a escenarios de referencia (MP y BAU).

| Categoría de Impacto | Beneficios globales de la Gestión de Visión Circular ANDI frente | |
|--|--|--------|
| | MP | BAU |
| Huella de carbono | 45.07% | 74.44% |
| Consumo de agua | 74.06% | 81.79% |
| Demanda de energía | 64.94% | 65.64% |
| Agotamiento de recursos abióticos / Combustibles fósiles | 43.09% | 44.94% |
| Agotamiento de recursos abióticos / Minerales | 8.24% | 44.89% |
| Residuos | 54.82% | 99.36% |

ANÁLISIS DE EQUIVALENCIAS DE IMPACTO AMBIENTAL

Para facilitar la interpretación de los resultados técnicos y dimensionar la magnitud de los beneficios logrados por **Visión Circular ANDI**, se realizó una traducción de las unidades del ACV a equivalencias de la vida cotidiana. Este análisis permite

comunicar de forma clara y tangible cómo la gestión de materiales se traduce en ahorro de recursos críticos para el país.

Tabla 6. Resumen de Equivalencias de Impacto Global – Gestión 2024.

| Categoría de impacto | Unidad | Impactos evitados por tonelada | Impactos evitados por gestión del colectivo durante 2024 | Equivalencia |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------|--|--|
| Huella de carbono | kgCO ₂ e/ton | -1,862.37 | -104,476,168.60 | Se evitaron 104,476 tCO ₂ e/año Bono de carbono \$15.000/ton \$1.560.000.000 COP aprox |
| Consumo de agua | m ³ /ton | -15.41 | -864,280.69 | Absorción de CO ₂ de 3.482.539 árboles adultos durante un año El agua de 346 piscinas olímpicas con capacidad de 2.500 m ³ 3.8% del agua que consume Bogotá en 1 mes |

| Categoría de impacto | Unidad | Impactos evitados por tonelada | Impactos evitados por gestión del colectivo durante 2024 | Equivalencia |
|---|-----------|--------------------------------|--|---|
| Demanda de energía | MJ/ton | -16,749.60 | -939,626,159.79 | La energía consumida por 138.539 hogares colombianos en un año (Municipio Popayán, Neiva o Pasto) |
| Agotamiento de recursos abióticos / Combustibles fósiles | MJ/ton | -29,801.89 | -1,671,839,530.93 | 37.151.990 litros de gasolina 826 carrotanques de 45.000 L |
| Agotamiento de recursos abióticos / Minerales | kgSbe/ton | -0.08 | -4,350.76 | Minerales requeridos para fabricar 145.025 Smartphones |
| Residuos | kg/ton | -1,036.98 | -58,173,005.95 | 8,64 días de disposición de residuos en el Relleno Doña Juana |

Fuentes de los Factores de Equivalencia

Los cálculos de equivalencia presentados en este informe se basan en datos de referencia institucional y técnica, asegurando que las comparativas sean realistas y contextualizadas al entorno colombiano:

- **Huella de Carbono (Árboles):** Basado en los factores de absorción anual de CO₂ por especie y madurez del árbol. *Fuente: Selectra Climate.*
- **Consumo de Agua (Bogotá/Piscinas):** La referencia de ahorro hídrico se sustenta en el consumo promedio de la ciudad de Bogotá y las metas de ahorro ciudadano. *Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).*
- **Demanda de Energía (Hogares):** Basado en el consumo promedio mensual y la demanda de energía primaria reportada para Colombia (157 kWh/hogar mes - 1884 kWh/hogar año). *Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).*
- **Recursos Abióticos Fósiles (Gasolina):** Calculado a partir del Poder Calorífico Neto de la gasolina motor corriente (45 MJ/L), según los factores de conversión de energía primaria de la UPME y la calculadora de equivalencias de la EPA.
- **Recursos Abióticos Minerales (Smartphones):** Basado en el indicador de “Mochila Ecológica” (MIPS), considerando que la fabricación de un dispositivo móvil promedio demanda la extracción de 45 kg de recursos naturales primarios (Fuente: Wuppertal Institute / Alboan).
- **Residuos (Doña Juana):** Basado en el reporte de recepción diaria de residuos sólidos en el Relleno Sanitario Doña Juana (aprox. 6.000 – 7.500 ton/día), según datos operativos de la UAESP.

Para información sobre el análisis de sensibilidad y la robustez del modelo consultar el **Anexo 4.**



**LÍNEA BASE PARA
LA DEFINICIÓN
DE ACCIONES
DE DISEÑO**



Con el fin de orientar acciones de diseño y mejora continua en el sistema de aprovechamiento de envases y empaques, este capítulo consolida una línea base de desempeño ambiental por intensidad (por tonelada) para las corrientes gestionadas por Visión Circular ANDI en 2024. Esta línea base permite (i) establecer indicadores ambientales comparables a través del tiempo, (ii) identificar puntos críticos operativos (“drivers”) que explican las mayores cargas ambientales, y (iii) priorizar acciones de ecodiseño aplicables al sistema posconsumo, a los procesos de transformación y, cuando corresponda, al diseño del empaque/producto que condiciona la reciclabilidad.

Alcance y unidad de análisis

La línea base se expresa por 1 tonelada de material por corriente (cartón, papel, plásticos rígidos, plásticos flexibles, vidrio, metal y multimaterial) para el contexto operativo de Colombia en 2024. Para asegurar consistencia en la interpretación, el sistema se entiende como una cadena articulada que incluye: gestión posconsumo (transporte y logística/operaciones asociadas cuando aplica) y transformación (consumos de energía y agua, insumos auxiliares y gestión de residuos del proceso). La etapa de consumo se modela con impacto cero, dado que el uso del empaque depende de múltiples aplicaciones y no forma parte del control operativo del sistema de aprovechamiento.

En la interpretación de resultados y definición de acciones, se empleó análisis de contribución (incluyendo revisión del diagrama de red) para identificar los procesos y flujos dominantes por categoría. Con el fin de facilitar la lectura, en el cuerpo del documento se reportan los drivers principales y no los diagramas completos.

Drivers dominantes y prioridades

El análisis de contribución evidencia que, en la mayoría de corrientes, la etapa de transformación concentra el mayor aporte a las cargas ambientales (frecuentemente superior al 85% del total del escenario de gestión articulada). En consecuencia, la priorización de acciones debe enfocarse en:

- Eficiencia energética y fuente de energía (energía térmica y eléctrica del proceso, cogeneración, combustibles).
- Rendimiento del proceso (mermas, reprocesos, rechazos; “tonelada útil”).
- Consumo de agua y gestión de efluentes (recirculación, tratamiento, vertimientos).
- Insumos químicos y auxiliares (naturaleza y dosificación de insumos con aporte relevante, especialmente en ADP minerales).
- Gestión y valorización de residuos/subproductos (residuos ordinarios, lodos, escorias, purgas; destinos).
- Eficiencia logística (t·km/t, capacidad vehicular, factor de llenado, densificación), como palanca del sistema posconsumo cuando aplica.

Adicionalmente, se identificaron casos donde ciertos indicadores son sensibles a supuestos de modelación o a la representatividad del inventario (p. ej., suministro de agua potable vs agua de origen natural; inventarios secundarios; inventarios agregados de planta). Estos casos se abordan en el apartado 7.4 como acciones de robustecimiento de datos.

Acciones priorizadas y esquema de seguimiento

Con base en los drivers dominantes, se proponen acciones agrupadas en tres niveles:

- i. Diseño del proceso de transformación** (aliados transformadores). Se recomienda priorizar medidas que reduzcan impactos por tonelada transformada, particularmente:
 - Eficiencia energética: optimización de equipos y etapas intensivas (p. ej., secado, extrusión/pelletización, refinado), recuperación de calor, reducción de tiempos de operación y mejora de controles.
 - Sustitución/gestión energética: incorporación progresiva de fuentes no convencionales renovables o estrategias equivalentes (autogeneración, compra de energía, mejoras de eficiencia térmica) que disminuyan dependencia de combustibles fósiles.
 - Agua y efluentes: recirculación, uso en cascada, optimización de lavado, control de caudales, y fortalecimiento de tratamiento/gestión de vertimientos cuando aplique.
 - Rendimiento y calidad de entrada: reducción de mermas y reprocesos mediante estándares de aceptación, limpieza y segregación, y retroalimentación al origen para disminuir contaminación/mezclas.
 - Insumos críticos: revisión de naturaleza y dosificación de insumos con aporte relevante (p. ej., químicos), buscando alternativas o ajustes operativos que reduzcan ADP minerales/metales.
 - Residuos/subproductos: minimización en origen, segregación, valorización y mejora de destinos de disposición.

Indicadores sugeridos de seguimiento (transformación): kg CO₂e/t, MJ/t, m³/t, kg residuos/t, rendimiento (t útil / t entrada) y, cuando sea posible, medición por etapa (lavado, secado, extrusión/pelletización; pulpeo, limpieza, refinado, secado).

- ii. Diseño del sistema de gestión posconsumo** (logística y operaciones asociadas).

Como medida de mejora del sistema, se recomienda fortalecer la eficiencia logística por corriente de material mediante: planificación de rutas, reducción de recorridos innecesarios, consolidación/densificación de carga para incrementar factor de llenado, y priorización de vehículos de mayor capacidad cuando sea viable, apoyado en ventanas de acopio que permitan despachos más eficientes sin afectar la calidad del material.

Indicadores sugeridos de seguimiento (gestión/logística): t·km/t por corriente, kg CO₂e/t del módulo logístico, toneladas por viaje (si está disponible) y tipología vehicular utilizada.

- **Diseño del empaque/producto** (condicionantes de reciclabilidad). Los resultados por corriente y los drivers asociados a mermas/rechazos permiten orientar recomendaciones hacia productores para mejorar reciclabilidad efectiva:
 - transición hacia materiales y estructuras reciclables (evitar combinaciones difíciles de separar),
 - reducción de componentes que generen contaminación o rechazo (adhesivos, tintas, etiquetas incompatibles),
 - estandarización de especificaciones que faciliten la clasificación y aumenten rendimiento del reciclaje.

Indicadores sugeridos de seguimiento (sistema): tasa de rechazo/contaminación por corriente, incremento del rendimiento del proceso y reducción de mermas/reproceso.



RECOMENDACIONES



1

De cara a los siguientes estudios que se realicen al respecto, se adoptan los resultados por intensidad (impacto por tonelada gestionada/transformada) como indicadores ambientales base para el seguimiento del desempeño.

2

Para la mayoría de las corrientes de material y categorías de impacto, la transformación concentra típicamente más del 85% de los impactos ambientales del sistema evaluado. En consecuencia, las acciones de optimización con mayor potencial de reducción deben priorizarse en la etapa de transformación, sin perder de vista mejoras complementarias en logística. Este hallazgo respalda una estrategia de intervención enfocada en: (i) desempeño energético de procesos, (ii) eficiencia de equipos y operación, (iii) control de mermas/rechazos y (iv) calidad del material de entrada.

3

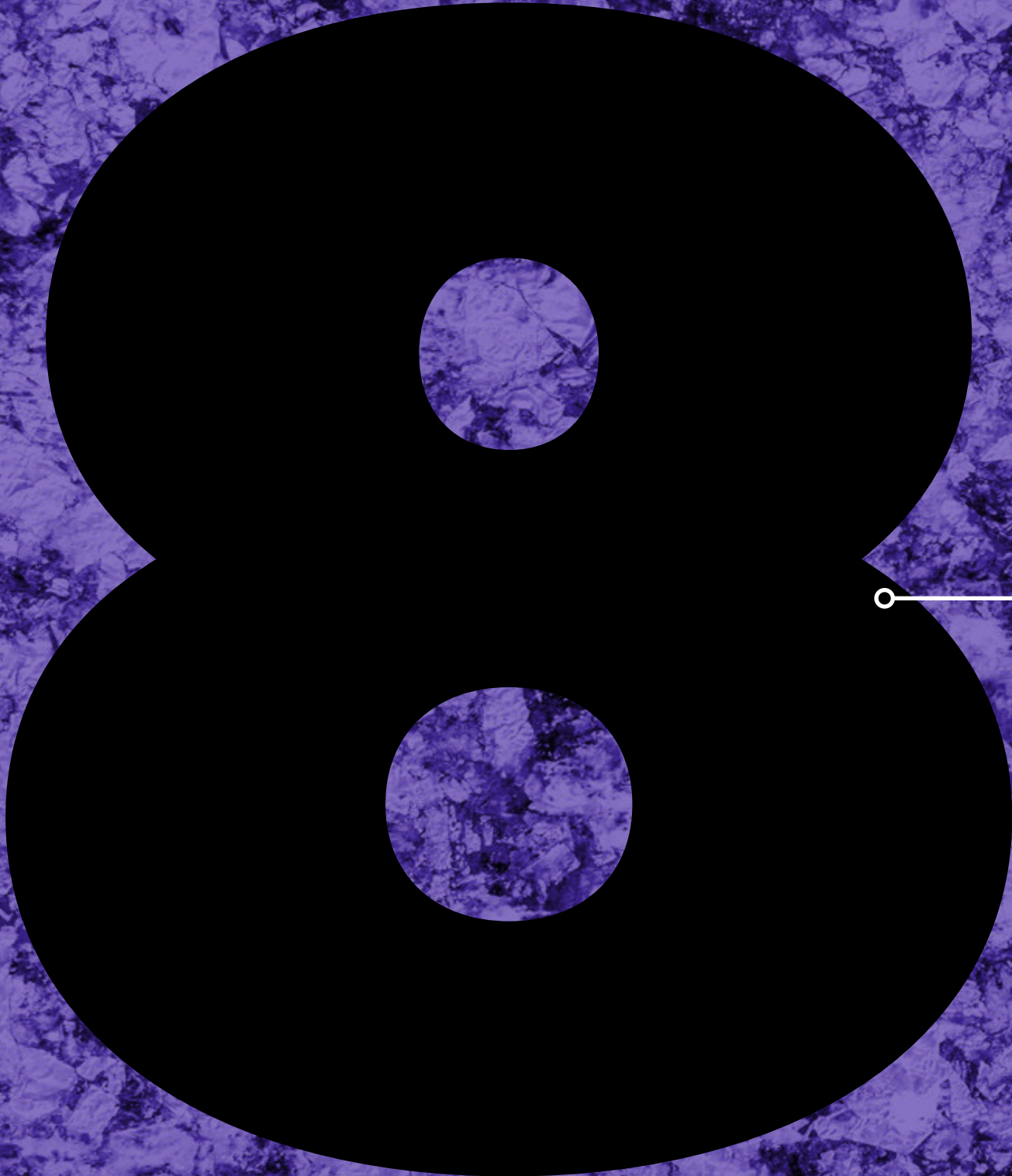
Se debe impulsar la eficiencia energética y mejora tecnológica con enfoque por corriente y por tipo de proceso (lavado, secado, trituración/molienda, extrusión/pelletización, fundición, etc.). Contemplando principalmente: Medición y trazabilidad energética por proceso, mantenimiento preventivo y control operacional, Gestión de pérdidas y rendimiento: reducción de mermas y rechazos, dado que mayores pérdidas incrementan intensidades por tonelada útil y elevan energía/agua/residuos.

4

Se recomienda evaluar e impulsar la incorporación progresiva de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) para soportar los procesos de transformación, especialmente en operaciones con alta demanda energética (p. ej., extrusión/pelletización, secado térmico u operaciones de alta potencia). Dependiendo del contexto del aliado, esto puede incluir autogeneración (p. ej., solar fotovoltaica), esquemas de compra de energía renovable, o contratos/atributos ambientales donde sea aplicable. Esta línea es consistente con el hecho de que mejoras en la matriz de suministro energético tienden a reducir de forma directa las categorías asociadas a energía (GWP, demanda de energía, ADP fósil) y contribuyen a robustecer el desempeño ambiental del programa bajo un marco de mejora continua.

5

En algunas corrientes se identifican rutas de aprovechamiento que, aunque evitan la disposición final, corresponden a transformaciones en ciclo abierto (downcycling) al no reincorporar el material en usos equivalentes. En línea con la jerarquía de la economía circular, se recomienda priorizar rutas de transformación que preserven la integridad y calidad del material. El objetivo debe ser favorecer ciclos cerrados o de alto valor que permitan el retorno a aplicaciones equivalentes, reduciendo así de forma efectiva la dependencia de materias primas vírgenes y maximizando la retención de valor económico en la cadena.



CONCLUSIONES



Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) evidencian que la gestión posconsumo articulada por Visión Circular ANDI en 2024 presenta un desempeño ambiental favorable frente a los escenarios de referencia evaluados, al disminuir la presión asociada tanto a la disposición final como a la producción desde materias primas vírgenes. En las categorías de impacto consideradas se observan mejoras consistentes atribuibles a la recuperación, clasificación y transformación de materiales, lo que confirma que cada tonelada gestionada y transformada a través del programa contribuye a reducir la carga ambiental del sistema de envases y empaques en Colombia.

El estudio confirma que el efecto ambiental del modelo circular no se limita al desvío de residuos del relleno sanitario: el principal aporte proviene de la reincorporación de materiales como materias primas secundarias, lo cual reduce impactos asociados a la extracción y procesamiento de recursos vírgenes. En este sentido, Visión Circular ANDI se consolida como un actor estratégico para apoyar el cumplimiento y fortalecimiento de esquemas REP, y para aportar evidencia técnica que oriente decisiones de política pública y metas corporativas de sostenibilidad.

Un hallazgo transversal del análisis por contribuciones es que, dentro del escenario de gestión del colectivo (consumo modelado como 0; gestión/logística; transformación), la etapa de transformación concentra la mayor proporción de impactos en la mayoría de las corrientes y categorías. Esto implica que las oportunidades de mejora con mayor potencial se encuentran, prioritariamente, en la eficiencia de los procesos de transformación: desempeño energético, reducción de mermas y reprocesos, manejo de rechazos y, cuando sea viable, incorporación de fuentes no convencionales de energía renovable. De forma complementaria, en territorios y corrientes donde existan trayectos extensos o baja densidad de generación, existen oportunidades relevantes en logística inversa asociadas a optimización de rutas, consolidación de carga, uso de vehículos de mayor capacidad y estrategias de densificación/retención para mejorar el factor de llenado.

Asimismo, el análisis pone de manifiesto el rol de Visión Circular ANDI como integrador de cadena: si bien el programa no controla directamente los procesos internos de gestores y transformadores, su capacidad de articulación permite establecer lineamientos y capacidades para mejorar el desempeño colectivo. Esto incluye estandarización de criterios de calidad del material, fortalecimiento de trazabilidad, mejores prácticas operativas y mecanismos de seguimiento basados en indicadores comparables. En particular, se recomienda adoptar los resultados por intensidad (impacto por tonelada gestionada/transformada) como indicadores ambientales base para mediciones futuras; no obstante, para la huella de carbono se debe tener especial cuidado en la comparabilidad interanual, dado que el factor de emisión de la electricidad de la matriz energética colombiana puede variar y debe documentarse explícitamente en cada ciclo de reporte.

En términos de economía circular, el ejercicio también permite diferenciar rutas de transformación de mayor y menor circularidad. Algunas aplicaciones pueden representar aprovechamientos en ciclo abierto (p. ej., cuando un material se transforma en un producto de uso distinto y no retorna a aplicaciones equivalentes), lo cual puede mantener beneficios ambientales, pero no necesariamente “cierra el ciclo” del material. Por ello, a futuro conviene priorizar, cuando sea técnica y económicamente viable, rutas de transformación que conserven el valor del material y favorezcan ciclos cerrados o de alto valor, fortaleciendo así la circularidad efectiva del sistema. Finalmente, este ejercicio sienta un precedente metodológico y operativo para el país. Su valor no reside únicamente en los resultados obtenidos para 2024, sino en la generación de una base replicable para seguimiento anual, aprendizaje colectivo y toma de decisiones. La continuidad del ejercicio, con mayor cobertura y mejor calidad de datos, permitirá reducir progresivamente las incertidumbres, aumentar representatividad y reflejar con mayor precisión la realidad del sistema colombiano de aprovechamiento, consolidando a Visión Circular ANDI como referente técnico y estratégico en la gestión sostenible de materiales.



REFERENCIAS

Acueducto de Bogotá. (2024). Bogotá se puso la 10 con el ahorro de agua. Sala de Prensa, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/general/sala-de-prensa/boletines/detalle/bogota+se+puso+la+10+con+el+ahorro+de+agua>

ANDI. (23 de Junio de 2025). *Visión Circular ANDI*. Obtenido de Impulsando al país hacia la economía circular: <https://www.andi.com.co/Uploads/Visi%C3%B3n%20Circular%20ANDI%20Impulsando%20el%20pa%C3%ADs%20hacia%20la%20econom%C3%ADa%20circular%20-%20Informe%202025.pdf>

ANDI. (13 de Marzo de 2025). *Visión Circular, el programa de economía circular de envases y empaques de la ANDI, ya ha aprovechado 62.000 toneladas de materiales en el país*. Obtenido de ANDI MÁS PAÍS: <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/17816-vision-circular-el-programa-de-economia>

Environmental Protection Agency (EPA). (2024). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator: Calculations and References. Greenhouse Gas Reporting Program. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>

Boza, J., Pérez, J., & Ledesma, L. (2021). *Introducción a las técnicas de muestreo*. Madrid: Ediciones Pirámide.

Ferrara, C., & De Feo, G. (2021). *Environmental Assessment of the Recycled Paper Production*. Fisciano: MDPI.

Gallucci, T., Lagioia, G., Piccinno, P., Lacalamita, A., Pontrandolfo, A., & Paiano, A. (2020). Environmental performance scenarios in the production of hollow glass containers for food packaging: an LCA approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* (2021) 26:, 785–798. doi:<https://doi.org/10.1007/s11367-020-01797-7>

Manuja, S. (2024). Municipal Solid Waste Composition Analysis and Its Importance: A Case of Kanpur. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 13(4). doi:[10.3390/su13105340](https://doi.org/10.3390/su13105340)

Molina-Jorge, Ó., Terrón-López, M. J., & Latorre-Dardé, R. (2024). A Quantitative Assessment Approach to Implement Pneumatic Waste Collection System Using a New Expert Decision Matrix Related to UN SDGs. *Applied Sciences*, 14(8306), 1-20.

Muradin, M., Wojnarowska, M., Paiano, A., & Ingraio, C. (24 de Enero de 2025). Recycled Glass Bottles for Craft-Beer Packaging: How to Make Them Sustainable? An Environmental Impact Assessment from the Combined Accounting of Cullet Content and Transport Distance. *Resources*, pág. 23. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/resources14020023>

Selectra Climate. (2024). ¿Cuánto CO2 absorbe un árbol? Importancia en la lucha contra el cambio climático. *Cambio Climático y Sostenibilidad*. <https://climate.selectra.com/es/actualidad/co2-arbol>

Sonnemann, G., & Margni, M. (2015). *Life Cycle Management*. Talence Cedex: Springer Dordrecht Heidelberg. Obtenido de <http://www.springer.com/series/11776>

Stramarkou, M., Boukouvalas, C., Fragkouli, D. N., Tsamis, C., & Krokida, M. (23 de Mayo de 2025). Evaluating the Sustainability of Tetra Pak Smart Packaging Through Life Cycle and Economic Analysis. *Sustainability*, pág. 11. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/su17114810>

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2023). Informe de Demanda de Energía Primaria y Proyecciones. Sistema de Información Minero Energético Colombiano (SIMEC). https://docs.upme.gov.co/SIMEC/PERS/Cauca/Informe_Demanda_Primary_MBL_25_10_2023_revJLCfinal.pdf

Wuppertal Institute. (2024). *Material Intensity of Materials, Products and Services (MIPS)*. Resources & Transport Division.

World Aquatics (antes FINA). (2023). *Facilities Rules: Olympic Standard Swimming Pool Dimensions and Volume*. Olympic Sports Standards.



ANEXOS

Anexo 1

MARCO CONCEPTUAL

Colectivo Visión Circular ANDI

Visión Circular ANDI es el programa de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) liderado por la ANDI, orientado a impulsar la transición hacia la economía circular mediante la gestión eficiente, trazable y responsable de los envases y empaques puestos en el mercado. Articula a los actores de la cadena de valor para asegurar la recolección, clasificación, transformación y reincorporación de materiales a los ciclos productivos.

El colectivo opera bajo el principio de corresponsabilidad, promoviendo la participación de las empresas en líneas como reciclaje, reúso, reducción, ecodiseño, separación en la fuente y trazabilidad. Con ello contribuye al cierre técnico de ciclo y al cumplimiento de las Resoluciones 1407 de 2018 y 1342 de 2020, y se consolida como referente en sostenibilidad y gestión responsable de materiales.

Materiales de envase y empaque

Los envases y empaques son sistemas diseñados para contener, proteger, conservar, transportar, almacenar y comunicar información de productos. Su composición influye en desempeño, vida útil, reciclabilidad y comportamiento ambiental.

En Colombia, los materiales de envase y empaque se agrupan según propiedades físicas, químicas y tecnológicas. Este estudio considera siete corrientes gestionadas por Visión Circular ANDI, descritas en la siguiente tabla.

Tabla 1. Descripción de las corrientes gestionadas por Visión Circular ANDI

| Material | Descripción / uso principal | Ejemplos / componentes | Características clave (reciclabilidad / retos) |
|----------------------------|---|---|--|
| Papel y cartón | Material celulósico usado ampliamente en embalaje por ligereza, rigidez y versatilidad. | Cajas corrugadas, plegadizos, bolsas, estuches, material de protección. | Puede fabricarse con fibras vírgenes o recicladas; alta recuperabilidad por homogeneidad; el desempeño depende de gramaje, capas y recubrimientos; clave en logística y exportación. |
| Plásticos flexibles | Láminas o películas para envolturas, bolsas, sachets y laminados. | PEBD; películas de PEAD; films de PP. | Buena barrera a humedad y oxígeno e impermeabilidad; permiten empaques livianos; la diversidad y las estructuras multicapa dificultan separación y reciclaje. |
| Plásticos rígidos | Envases estructurales para contener y proteger productos. | Botellas, envases, tapas, bandejas y recipientes; polímeros: PET, PEAD, PP, PS. | Resistencia, ligereza y versatilidad (p. ej., transparencia del PET); relevantes en alimentos, aseo, cosméticos y farmacéuticos. |

| Material | Descripción / uso principal | Ejemplos / componentes | Características clave (reciclabilidad / retos) |
|-------------------------------|---|---|--|
| Vidrio | Envase inorgánico, no poroso y químicamente estable, usado en alimentos, bebidas, cosméticos y farmacéuticos. | Envases de vidrio; vidrio reciclado (cullet/calcín) como insumo industrial. | Alta inercia química; reutilizable y reciclable sin pérdida de propiedades; peso elevado afecta logística; el calcín mejora la eficiencia energética en la fusión. |
| Metales (aluminio y hojalata) | Envases para alimentos, bebidas, aerosoles y productos industriales. | Aluminio (latas, envases metalizados); hojalata (conservas, pinturas, productos del hogar). | Altas tasas de recuperación por valor comercial y eficiencia tecnológica del reciclaje; sustituye materia prima virgen. |
| Multimaterial | Envases con dos o más capas, usados cuando se requiere alta barrera e inocuidad. | Cartón-polietileno; plástico-aluminio; laminados; envases de larga vida. | Requiere procesos de separación avanzados, fortalecimiento de infraestructura local y tecnologías especializadas para reincorporar componentes a la cadena de valor. |

Gestores y transformadores

En la cadena de valor de envases y empaques, gestores y transformadores son esenciales para llevar los residuos posconsumo desde su separación y preparación hasta su reincorporación como materias primas secundarias, permitiendo el cierre del ciclo técnico promovido por Visión Circular ANDI.

Gestores

Los **gestores** recolectan, acopian, clasifican, pretratan y alistan materiales aprovechables, y los comercializan con transformadores para asegurar su ingreso a procesos industriales. En Visión Circular ANDI trabajan con organizaciones de recicladores de oficio, gestores formalizados y comercializadores que conectan la recolección posconsumo con la transformación.

Sus actividades típicas incluyen recolección selectiva o en puntos de entrega, pesaje, clasificación por tipo y calidad, retiro de rechazos, acondicionamiento/compactación para optimizar transporte y registro de trazabilidad. La calidad del material entregado influye directamente en la eficiencia y desempeño ambiental del aprovechamiento.

Transformadores

Los **transformadores** reciben el material preparado por los gestores y lo convierten en materias primas secundarias aptas para nuevos ciclos productivos. Aplican procesos físicos, mecánicos o químicos —según el material— como lavado, molienda, secado, extrusión o pulpeo, para obtener productos con especificaciones técnicas adecuadas.

Además, registran rendimientos, rechazos y fracciones no valorizables, asegurando la trazabilidad de entradas y salidas. Su desempeño determina la calidad del material recuperado y la eficiencia del sistema, al convertir el residuo posconsumo en un insumo productivo.

MARCO METODOLÓGICO

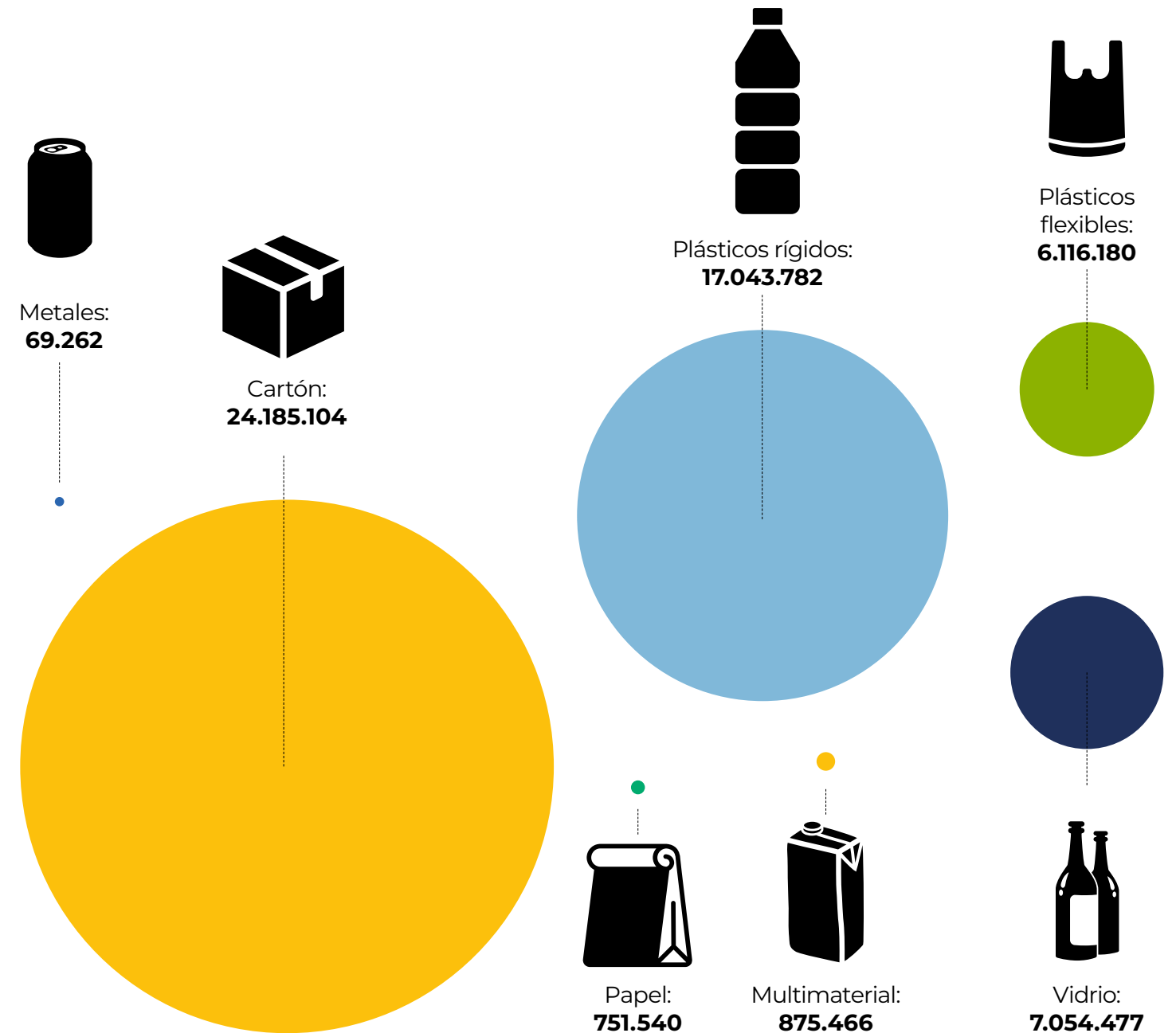
Muestreo estadístico

Para asegurar que el ACV represente el desempeño real del sistema articulado por Visión Circular ANDI, se definió un procedimiento de muestreo para seleccionar de manera objetiva y estadísticamente robusta gestores y transformadores que aportaran datos primarios. La metodología integra criterios probabilísticos, operativos y geográficos, priorizando actores relevantes por volumen, ubicación y capacidad tecnológica. A continuación, se describe la selección de muestra y los criterios estadísticos usados para el tamaño muestral y su representatividad.

Selección de muestra

El año base del estudio es 2024. En ese año, el colectivo estuvo conformado por **149 empresas gestoras** y **52 empresas transformadoras**, que procesaron más de **56.000 toneladas** de envases y empaques (cartón, metal, multimaterial, papel, plástico flexible, plástico rígido y vidrio). La distribución por material se presenta en la **Figura 1**, en comparación con la línea base 2021.

Figura 4. Volumen de materiales de envase y empaque trazados por el colectivo Visión Circular ANDI para el año 2024 (Volumen de material post consumo trazado (kg))



La representatividad se definió según Sonnemann & Margni (2015), quienes indican que cubrir entre **20% y 40%** de los actores puede ser suficiente para caracterizar una población, criterio aplicado como referencia para el diseño muestral.

La selección de la muestra se realizó con un enfoque secuencial, considerando variables de volumen y criterios estadísticos, con validación técnica del colectivo.

- i. Se priorizaron empresas con mayor volumen gestionado/transformado por material.
- ii. Se estimó el tamaño mínimo por material con muestreo aleatorio y corrección por población finita (Ecuación 1), usando un intervalo de confianza mínimo del 85%.
- iii. Los resultados se verificaron y ajustaron con el equipo técnico de Visión Circular ANDI para asegurar representatividad y pertinencia operativa.

De forma preliminar se evaluó el **Muestreo Probabilístico por Tamaño**, dado que las empresas con mayor volumen tendrían mayor probabilidad de ser seleccionadas.

Este modelo de selección de muestra es representado con la siguiente ecuación (Boza, Pérez, & Ledesma, 2021):

Ecuación 1. Muestro probabilístico por tamaño

$$n = \frac{N \times z^2 \times s^2}{((N-1) \times e^2) + (z^2 \times s^2)}$$

Donde,

- *n* es el tamaño de la muestra;
- *z* es la Desviación estándar de la distribución normal utilizada para determinar el nivel de confianza deseado en el estudio;
- *s* es desviación estándar;
- *e* es el margen de error asumido en el estudio, que representa la incertidumbre de los resultados;
- *N* es el tamaño total de la población

Tabla 1. Aplicación del Muestreo Probabilístico por Tamaño en la selección de muestra del cartón.

| TIPO DE RESIDUO | N | Intervalo de confianza | Z | e | p | q | n |
|-----------------|----|------------------------|-------|------|-----|-----|---|
| CARTÓN | 74 | 85% | 1,510 | 0,15 | 0,9 | 0,1 | 8 |

$$n_{cartón} = \frac{74 \times (1,96)^2 \times (476268)^2}{((74-1) \times (0,08)^2) + ((1,96)^2 \times (476268)^2)}$$

$$n_{cartón} = 74$$

Al aplicar el muestreo probabilístico por tamaño se obtuvo, en algunos casos, un tamaño de muestra igual a la población (*n* = *N*) debido a la alta dispersión (desviación estándar elevada), como se evidencia en la **Tabla 1**. Por ello se adoptó el **muestreo aleatorio simple con corrección por población finita**, donde todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados.

Como referencia, Manuja (2024) aplicó un **intervalo de confianza del 80%** y un **margen de error del 20%** ante alta dispersión y limitada disponibilidad de información. Este criterio se sustenta en el coeficiente de varianza: si es >20% se asume alta dispersión.

Aplicando la ecuación del coeficiente de varianza:

$$CV = \frac{\sigma}{X} \times 100\%$$

Donde,

- ρ es la desviación estándar
- X es la media de los datos

La **Tabla 2** presenta el coeficiente de varianza por material para gestores y transformadores.

Tabla 2. Cálculo del coeficiente de varianza

| Tipo de material | Desviación estándar | Media | Coeficiente de varianza |
|------------------------|---|---------|-------------------------|
| GESTORES | | | |
| CARTÓN | 476268 | 326826 | 146% |
| METAL | 19911 | 11544 | 172% |
| MULTIMATERIAL | 55925 | 48637 | 115% |
| PAPEL | 267381 | 187885 | 142% |
| PLÁSTICO FLEXIBLE | 384495 | 169894 | 226% |
| PLÁSTICO RÍGIDO | 293683 | 167122 | 176% |
| TRANSFORMADORES | | | |
| CARTÓN | 2671653 | 2198646 | 122% |
| METAL | 24701 | 23087 | 107% |
| MULTIMATERIAL | 184184 | 145911 | 126% |
| PAPEL | 280208 | 250513 | 112% |
| PLÁSTICO FLEXIBLE | 517347 | 321904 | 161% |
| PLÁSTICO RÍGIDO | 1336142 | 655530 | 204% |
| VIDRIO | Solo hay una empresa transformadora de vidrio | | |

Como se observa en la **Tabla 2**, los materiales presentan coeficientes de varianza superiores al 20%; por ello se adoptó **80%** de confianza y **20%** de error (Manuja, 2024) y una probabilidad **p = 50%** (Molina-Jorge et al., 2024) para el cálculo del tamaño muestral.

Tabla 3. Aplicación del muestreo de población finita a la población de gestores

| TIPO DE RESIDUO | N | Intervalo de confianza | Z | e | p | n |
|------------------------|-----|------------------------|-------|-----|-----|---|
| GESTORES | | | | | | |
| CARTÓN | 74 | | | | | 9 |
| METAL | 6 | | | | | 4 |
| MULTIMATERIAL | 18 | | | | | 7 |
| PAPEL | 4 | 80% | 1,282 | 0,2 | 0,5 | 3 |
| PLÁSTICO FLEXIBLE | 36 | | | | | 8 |
| PLÁSTICO RÍGIDO | 102 | | | | | 9 |
| VIDRIO | 41 | | | | | 8 |
| TRANSFORMADORES | | | | | | |
| CARTÓN | 11 | | | | | 5 |
| METAL | 3 | | | | | 2 |
| MULTIMATERIAL | 6 | | | | | 4 |
| PAPEL | 3 | 80% | 1,282 | 0,2 | 0,5 | 2 |
| PLÁSTICO FLEXIBLE | 19 | | | | | 7 |
| PLÁSTICO RÍGIDO | 26 | | | | | 7 |
| VIDRIO | 1 | | | | | 1 |

| TIPO DE RESIDUO | N | Intervalo de confianza | Z | e | p | n |
|--------------------------|---|------------------------|---|---|---|--|
| GESTORES | | | | | | |
| | | | | | | $\frac{z^2 \times p \times (1 - p)}{e^2}$ |
| $n_{gestor\ de\ cartón}$ | | | | | | $\frac{z^2 \times p \times (1 - p)}{e^2}$ |
| | | | | | | $1 + \left(\frac{z^2 \times p \times (1 - p)}{e^2 \times N} \right)$ |
| $n_{gestor\ de\ cartón}$ | | | | | | $1 + \left(\frac{z^2 \times p \times (1 - p)}{e^2 \times N} \right)$ |
| | | | | | | $\frac{(1,282)^2 \times 0,5 \times (1 - 0,5)}{(0,2)^2}$ |
| $n_{gestor\ de\ cartón}$ | | | | | | $\frac{(1,282)^2 \times 0,5 \times (1 - 0,5)}{(0,2)^2}$ |
| | | | | | | $1 + \left(\frac{(1,282)^2 \times 0,5 \times (1 - 0,5)}{(0,2)^2 \times 74} \right)$ |
| $n_{gestor\ de\ cartón}$ | | | | | | $1 + \left(\frac{(1,282)^2 \times 0,5 \times (1 - 0,5)}{(0,2)^2 \times 74} \right)$ |
| | | | | | | $n_{gestor\ decartón} = 9$ |

Con estos parámetros, el muestreo con corrección por población finita (ver **Tabla 3**) arrojó un requerimiento de **40 gestores** y **18 transformadores** sumando todos los materiales; sin embargo, dado que un mismo actor puede manejar varias corrientes, no necesariamente se selecciona ese número total de empresas distintas.

Tras agrupar empresas y depurar por cobertura de materiales, se definió una muestra operativa de **25 empresas gestoras** y **17 empresas transformadoras**. Esta propuesta fue verificada por el equipo técnico del Colectivo Visión Circular ANDI, lo que

implicó la sustitución de algunas empresas (7 gestoras y 2 transformadoras) para mejorar pertinencia y viabilidad de levantamiento.

Para incorporar la variable geográfica, se aplicó un **muestreo aleatorio estratificado** (Ecuación 2), usando los *departamentos* como estratos para representar la distribución territorial de gestores y transformadores.

La asignación por estrato se realizó de forma proporcional al número de empresas por departamento, y los resultados se presentan en las **Tablas 4 y 5**.

Ecuación 2. Muestreo aleatorio estratificado

$$n_h = N_h \times W_h$$

Teniendo en cuenta esto, se seleccionó la siguiente muestra para cada departamento, dependiendo su representatividad en la cantidad de residuos gestionados y transformados.

Tabla 4. Distribución geográfica de las empresas gestoras

| REGIONES | DISTRIBUCIÓN DE GESTORES (Wh) | MUESTREO POR ESTRATOS (nh) |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------|
| CUNDINAMARCA | 35% | 9 |
| ANTIOQUÍA | 28% | 7 |
| VALLE DEL CAUCA | 9% | 2 |

| REGIONES | DISTRIBUCIÓN DE GESTORES (Wh) | MUESTREO POR ESTRATOS (nh) |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| CALDAS | 7% | 2 |
| SANTANDER | 6% | 2 |
| META | 4% | 1 |
| ATLANTICO | 4% | 1 |
| CASANARE | 2% | 1 |
| BOLÍVAR | 1% | 0 |
| CAUCA | 1% | 0 |
| MAGDALENA | 1% | 0 |
| CESAR | 0% | 0 |
| NARIÑO | 0% | 0 |
| HUILA | 0% | 0 |
| GUAJIRA | 0% | 0 |
| ARAUCA | 0% | 0 |
| PUTUMAYO | 0% | 0 |
| TOLIMA | 0% | 0 |
| CORDOBA | 0% | 0 |
| SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA | 0% | 0 |
| NORTE DE SANTANDER | 0% | 0 |
| BOYACA | 0% | 0 |
| Total general | 100% | 25 |

Para gestores (n=25), el esquema estratificado prioriza Cundinamarca y Antioquia, seguido por Valle del Cauca, Caldas, Santander, Meta y Atlántico, según su participación en el volumen gestionado. Departamentos con baja representatividad agregada (≈4% del volumen total) no se incluyeron en la muestra bajo este criterio.

Tabla 5. Distribución geográfica de las empresas transformadoras

| REGIONES | DISTRIBUCIÓN DE TRANSFORMADORES | MUESTREO POR ESTRATOS |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------|
| CUNDINAMARCA | 40% | 7 |
| ANTIOQUÍA | 27% | 4 |
| VALLE DEL CAUCA | 23% | 4 |
| CALDAS | 5% | 1 |
| BOLIVAR | 4% | 1 |
| ATLANTICO | 2% | |
| HULIA | 0% | |
| BOYACÁ | 0% | 0 |
| PUTUMAYO | 0% | |
| TOTAL | 100% | 17 |

Para transformadores (n=17), la asignación estratificada concentra la muestra en Cundinamarca, Antioquia y Valle del Cauca, complementada por Caldas y Bolívar. Departamentos con participación marginal (≈2% del volumen) no se incluyeron en la muestra por estratos.

Tabla 6. Distribución de la muestra por departamentos

| REGIONES | Muestreo aleatorio estratificado | Distribución geográfica de la muestra (ver Tabla 3) |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| MUESTRA DE GESTORES | | |
| CUNDINAMARCA | 9 | 9 |
| ANTIOQUÍA | 7 | 8 |
| VALLE DEL CAUCA | 2 | 6 |
| CALDAS | 2 | 3 |
| SANTANDER | 2 | 4 |
| META | 1 | 5 |
| ATLANTICO | 1 | 5 |
| CASANARE | 1 | 2 |
| OTROS | 2 | 28 |
| MUESTRA DE TRANSFORMADORES | | |
| CUNDINAMARCA | 7 | 7 |
| ANTIOQUÍA | 4 | 3 |
| VALLE DEL CAUCA | 4 | 5 |
| CALDAS | 1 | 1 |
| BOLIVAR | 1 | 0 |
| OTROS | 0 | 1 |

Como muestra la **Tabla 6**, la distribución final de la muestra es consistente con la estimación estadística (Tabla 3) y con el muestreo estratificado (Tablas 4 y 5), con diferencias puntuales por ajustes realizados en la verificación interna de Visión Circular ANDI (sustitución de empresas). Estos cambios no alteran materialmente la representatividad, dado que los actores no incluidos aportan una fracción baja del volumen total.

RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos se estructuró a partir de la muestra definida en el muestreo estadístico e integró **fuentes primarias** (gestores y transformadores seleccionados) y **fuentes secundarias** para etapas o procesos con información limitada. El propósito fue consolidar datos consistentes y verificables para alimentar el balance de masas y el Inventario de Ciclo de Vida.

Información primaria

De acuerdo con el diseño muestral, se definió una muestra objetivo de **25 gestores** y **17 transformadores**, seleccionados de forma estratificada por material, volumen y ubicación geográfica. La participación final dependió de disponibilidad, disposición a colaborar y acuerdos de confidencialidad.

La información primaria recopilada incluyó, entre otros:

- Volúmenes gestionados/transformados en 2024.
- Tecnologías y operaciones (clasificación, acondicionamiento, pretratamiento y transformación).
- Consumos de energía, agua e insumos auxiliares/materiales complementarios.
- Productos obtenidos (p. ej., hojuela, pellet, fibra, vidrio molido, metales recuperados).
- Manejo de rechazos y subproductos (lodos, finos, chatarra, purgas, impropios).
- Información logística (procedencia, distancias y organización de flujos).

La información se recopiló mediante:

- Formularios estandarizados a organizaciones participantes.
 - Reuniones técnicas para aclaración y depuración de datos.
 - Revisión de reportes operativos y documentación del colectivo.
 - Validación cruzada con registros de trazabilidad anual de Visión Circular ANDI.
- A continuación, se detalla la representatividad lograda en el estudio tras el proceso de vinculación:

Participación de Empresas Transformadoras

El análisis técnico se consolidó gracias a la participación de 11 empresas transformadoras que aportaron datos específicos sobre su operación. Este grupo incluye 5 organizaciones dedicadas a la transformación de plásticos rígidos, 3 especializadas en plásticos flexibles, así como empresas de las categorías cartón, metal y multimaterial. Geográficamente, estas organizaciones se encuentran ubicadas en los departamentos de Cundinamarca (6 empresas), Valle del Cauca (3 empresas) y Antioquia (2 empresas), cubriendo los principales nodos industriales de transformación del país.

Participación de Empresas Gestoras

Para el análisis de la etapa de gestión, se contó con la participación de 18 organizaciones gestoras distribuidas estratégicamente en el territorio nacional. La representatividad geográfica se concentró principalmente en los departamentos de Antioquia (6 gestores) y Cundinamarca (5 gestores), complementada por la presencia de actores clave en Valle del Cauca (2 gestores). El alcance regional del estudio se extendió además a los departamentos de Atlántico, Santander, Magdalena, Boyacá y Bolívar, asegurando una base de datos diversa y ajustada a las realidades logísticas locales.

Información secundaria

Para corrientes o etapas sin datos primarios suficientes (especialmente en procesos de transformación específicos), se realizó una búsqueda sistemática de literatura y fuentes técnicas para parametrizar un escenario de partida lo más ajustado a la realidad nacional.

Las fuentes secundarias consultadas incluyen:

Tabla 7. Fuentes de información secundarias consultadas

| Material | Escenario | Artículo Guía | Fuente | Año |
|--|---|---|--|------|
| Vidrio | Gestión Visión Circular ANDI (Transformación) | Environmental performance scenarios in the production of hollow glass containers for food packaging: an LCA approach (Gallucci, y otros, 2020) | The International Journal of Life Cycle Assessment (2021) 26:785–798 | 2020 |
| | Gestión Visión Circular ANDI (Transformación) | Recycled Glass Bottles for Craft-Beer Packaging: How to Make Them Sustainable? An Environmental Impact Assessment from the Combined Accounting of Cullet Content and Transport Distance (Muradin, Wojnarowska, Paiano, & Ingraio, 2025) | Resources 2025, 14, 23 | 2025 |
| Papel | Gestión Visión Circular ANDI (Transformación) | Environmental Assessment of the Recycled Paper Production: The Effects of Energy Supply Source (Ferrara & De Feo, 2021) | Sustainability 2021, 13, 4841. | 2021 |
| Multimaterial / Envases compuestos Cartón para bebidas | Beneficios (impactos evitados) por su fabricación desde materias primas | Evaluating the Sustainability of Tetra Pak Smart Packaging Through Life Cycle and Economic Analysis (Stramarkou, Boukouvalas , Fragkouli, Tsamis , & Krokida, 2025) | Sustainability; Basel Tomo 17, N.º eleven. | 2025 |

Fuente: Autores

Las fuentes secundarias corresponden principalmente a estudios de ACV con inventarios detallados aplicables a procesos específicos. Se seleccionaron para complementar vacíos de información y mantener trazabilidad y compatibilidad con los escenarios.

Para incorporar una fuente secundaria se verificó que describiera claramente unidad funcional, límites del sistema, procesos y supuestos operativos, permitiendo equivalencia funcional con el modelado. Se usaron solo en etapas donde la información primaria fue insuficiente.

En **vidrio**, se usaron dos artículos con inventarios de reciclaje y fabricación (preparación de calcín, consumos energéticos de fusión, limpieza, clasificación, molienda y transporte) para completar consumos/rendimientos no reportados por transformadores nacionales.

En **papel**, se integró un ACV de producción de papel reciclado con inventarios de pulpeo, refinado, remoción de impurezas e insumos energéticos, para caracterizar procesos cuando no se contó con datos completos de transformadores.

Para **multimaterial (cartón para bebidas)**, se utilizó literatura con inventario de fabricación desde materias primas vírgenes (polímeros, aluminio y cartón) para construir el escenario de referencia de *impactos evitados* (Escenario 3) cuando no hubo información industrial disponible equivalente.

Anexo 2

SUPOSICIONES

Para el ACV se adoptaron supuestos para asegurar coherencia y representatividad del inventario 2024, integrando datos primarios de gestores/transformadores, registros del colectivo y, cuando fue necesario, información secundaria y datasets equivalentes (proxy) de Ecoinvent 3.10.

- Se asume veracidad y representatividad de la información reportada por los actores.
- Los datos de aprovechamiento y disposición representan el año **2024** (registros del colectivo y participantes).
- Cuando faltaron datos primarios por tipo de transformador, se usaron **fuentes secundarias** (ver 4.2.2).
- Para homogeneizar insumos/procesos específicos, se emplearon **proxies Ecoinvent 3.10** (RoW/GLO) priorizando cercanía tecnológica y geográfica.
- Sin distancias primarias, el transporte se modeló con **rutas representativas** entre regiones operativas.
- Insumos menores (aceites/grasas/lubricantes) con aporte <1% se consideran consumidos en proceso (sin salida explícita).
- La disposición final se modela como **relleno sanitario controlado** sin valorización energética.
- Si hubo consumo de agua sin dato de descarga, se asumió **80%** de retorno como agua residual.
- La etapa de uso/consumo se modeló con impacto **0** en los tres escenarios; el análisis se centra en posconsumo (recolección, clasificación, transporte, transformación y rechazos).

Estos supuestos y criterios de corte permiten estructurar el alcance conforme a ISO 14040/14044; no obstante, el levantamiento evidenció **limitaciones** en disponibilidad, representatividad y detalle de algunos datos, que deben considerarse en la interpretación.

El siguiente capítulo presenta dichas limitaciones y su posible incidencia sobre la interpretación del balance de masas y del ACV.

CRITERIOS DE CORTE

Siguiendo ISO 14044, se definieron criterios de corte para incluir los flujos materiales y energéticos relevantes y excluir aquellos de contribución marginal, asegurando que las omisiones no afecten significativamente los resultados comparativos.

- Se incluyeron consumos principales de materias primas y energía en procesos unitarios.
- Se modeló el transporte (gestión y a disposición) con vehículos de **3,5 a 32 t** según registros operativos.
- Se incluyeron insumos principales directamente asociados a la transformación por corriente.
- Se excluyó la fabricación de infraestructura/equipos/vehículos; sí se consideraron emisiones por consumo de energía y combustibles en operación.
- Se excluyeron insumos de baja masa para limpieza/higienización y actividades administrativas.
- Se descartaron residuos con contribución **<1%** del peso total; y, en general, los flujos excluidos no superan **5%** de masa o energía.
- Se excluye la etapa de uso del empaque.

PROCEDIMIENTOS DE ASIGNACIÓN

Conforme a ISO 14044:2006 (4.3.4), cuando un proceso genera más de un producto/función, las entradas y salidas deben asignarse mediante procedimientos explícitos, documentados y aplicados de forma consistente, evaluando alternativas cuando aplique.

En este estudio, el abordaje de asignación se resume en tres pasos:

- **Paso 1 (evitar asignación):** desagregar el proceso en subprocesos o ampliar el sistema para incluir funciones adicionales (expansión del sistema).
- **Paso 2:** si no puede evitarse, asignar según relaciones físicas (p. ej., masa/energía) que reflejen cambios en entradas/salidas.
- **Paso 3:** si no hay relación física adecuada, usar otras relaciones (p. ej., valor económico).

No se realizaron asignaciones en los procesos evaluados, dado que los consumos reportados por gestores y transformadores corresponden al año 2024 y se integraron al inventario según la unidad funcional del estudio.

El modelado usa Ecoinvent 3.10 bajo el enfoque *cut-off* ("el que contamina paga"): no se asignan cargas de producción de envases puestos en el mercado; se cuantifican las cargas de la gestión/aprovechamiento (Escenario 2) y de la disposición final (Escenario 1), y los **impactos evitados** por sustitución de material virgen se contabilizan como créditos en el Escenario 3.

DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE DATOS

Se utilizaron **datos primarios 2024** (recopilados en 2025) de gestores y transformadores. La calidad se revisó comparando entre actores para detectar variaciones tecnológicas, eficiencias y posibles valores atípicos (energía, rendimientos y rechazos).

Para validar coherencia y órdenes de magnitud, los inventarios se contrastaron con literatura técnica y con procesos equivalentes de **Ecoinvent 3.10** (clasificación, lavado, extrusión, pulpeo, etc.). Cuando no hubo información primaria suficiente —especialmente en **vidrio** y **papel**— se emplearon **fuentes secundarias** recientes (ver 4.2.2) para completar consumos y rendimientos, manteniendo la integridad del inventario.

REPRESENTATIVIDAD Y VALIDEZ DE LOS DATOS

Los datos representan adecuadamente el sistema evaluado, al provenir de gestores y transformadores activos en la red de Visión Circular ANDI y cubrir una proporción relevante de los flujos gestionados en 2024. Su validez se verificó mediante comparación entre actores de una misma corriente, contraste con literatura científica reciente sobre reciclaje y revisión frente a procesos equivalentes en **Ecoinvent 3.10**. En casos con faltantes —especialmente en vidrio y papel— se usaron fuentes secundarias seleccionadas por su similitud tecnológica (ver 4.2.2). En conjunto, la consistencia entre datos primarios, literatura y datasets asegura una base suficientemente robusta para el análisis comparativo entre escenarios.

Anexo 3

Interpretación específica por corriente material

CARTÓN

Los resultados muestran que la gestión realizada a través de Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales en todas las categorías evaluadas para la corriente de cartón. En Potencial de Calentamiento Global/Huella de carbono, la gestión de Visión Circular ANDI evita 69 % de emisiones frente al BAU y 3 % frente al escenario de producción con materia prima virgen. La mayor parte del beneficio proviene de evitar la disposición en relleno sanitario, que aporta -51.8 % del impacto total, seguida por la producción virgen con -24.4 %. Los impactos propios del sistema de gestión representan +23.7 %, un valor que es compensado ampliamente por los impactos evitados en el sistema lineal.

En el Consumo de agua, el sistema logra una reducción del 76 % frente al BAU y del 65 % frente a la producción virgen. La disposición final evitada aporta -23.9 % del beneficio total, mientras que la sustitución del cartón primario contribuye con -56.6 %. La operación de Visión Circular ANDI genera +19.5 %, un impacto menor respecto a la reducción combinada de los escenarios alternativos.

Para la Demanda de energía, el beneficio total es del 55 % frente al BAU y 54 % frente a la materia prima virgen. La producción de cartón primario representa la carga más relevante, con -67.8 %, y la disposición final aporta -1.2 % adicionales. La gestión circular introduce +48.1 %, que es compensado por los impactos evitados tanto por la no disposición como por la sustitución del material virgen.

En cuanto al Agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, la gestión de Visión Circular ANDI evita 7 % frente al BAU y 4 % frente a la producción virgen. La mayor parte del beneficio proviene de la sustitución del material primario –50.0 % y en menor medida de la disposición evitada –1.9 %. La operación de Visión Circular ANDI aporta +48.1 %, reduciendo el beneficio neto pero sin revertirlo.

Para el Agotamiento de recursos abióticos – minerales y metales, esta categoría, el escenario de Visión Circular ANDI presenta un impacto relativo mayor que los escenarios comparativos (p. ej., –104% frente a materia prima virgen y –19,1% frente a BAU; valores negativos indican mayor carga relativa). No obstante, el diagrama de red muestra que este resultado está dominado por dos decisiones/condiciones de inventario: (i) el suministro de agua modelado como agua potable (tap water) en el proceso del aliado, mientras que el dataset de producción de cartón virgen emplea agua de origen natural; y (ii) el uso de gas natural asociado a la cogeneración para soportar la energía del proceso. En conjunto, estas entradas introducen cargas de fondo adicionales (tratamiento/distribución de agua y suministro energético), que pueden aumentar el ADP minerales/metales del escenario de aprovechamiento respecto a la referencia. Por lo tanto, este indicador debe interpretarse como altamente sensible a la parametrización del suministro de agua y energía en el modelado, más que como una desventaja inherente del aprovechamiento del cartón.

Finalmente, en la categoría de Residuos, el beneficio es del 100 % frente al BAU, ya que el cartón gestionado por Visión Circular ANDI evita completamente la disposición en relleno sanitario –92.9 %. La contribución por sustitución de material virgen –7.1 % complementa este resultado. Dado que los sistemas de manejo de cartón producen cantidades mínimas de rechazo, el impacto directo es prácticamente nulo.

En conjunto, los resultados muestran que los beneficios ambientales para la corriente de cartón se explican principalmente por dos mecanismos: (i) la eliminación del flujo hacia relleno sanitario y (ii) la sustitución del cartón virgen, especialmente en categorías asociadas a energía, agua y combustibles fósiles. En estas categorías, los impactos evitados superan a los impactos operativos generados por la gestión de Visión Circular ANDI, lo que da lugar a balances netos positivos. En contraste, en el indicador de minerales y metales la gestión presenta cargas superiores a los escenarios de referencia, lo que refleja una mayor demanda operativa del proceso de recuperación para esta categoría específica. Aun así, el modelo circular mantiene beneficios ambientales relevantes en la mayoría de los indicadores evaluados, reforzando la importancia del aprovechamiento del cartón en la reducción de impactos frente al modelo lineal y la producción desde materia prima virgen.

PAPEL

Los resultados muestran que la gestión realizada a través de Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales en la mayoría de las categorías evaluadas, particularmente frente al escenario BAU y en varios casos también frente a la producción desde materia prima virgen. En Huella de carbono, el sistema evita 50 % de emisiones frente al BAU, lo que confirma que el mayor beneficio proviene de evitar la disposición en relleno sanitario, que aporta –33.7 % del impacto total, seguida por la producción virgen con –33.1 %. Los impactos propios del sistema de gestión representan +33.2%, un valor que es compensado ampliamente por los impactos evitados en el sistema lineal.

—

¹ Se debe tener en cuenta que para papel se trabajó a partir de información de ACV de referencia existentes debido a la falta de participación de transformadores de papel.

En Consumo de agua se observa una reducción del 68 % frente al BAU y 64 % frente a la producción primaria, reflejando la diferencia significativa entre el uso hídrico del reciclaje y el del papel virgen. De manera similar, este beneficio proviene de evitar la disposición en relleno, que aporta -7.7% y la producción virgen con -67.8%.

Demanda de energía, el sistema evita 51 % frente al BAU y al escenario a partir de materia prima virgen, destacando la intensidad energética de la producción de fibra primaria frente a la operación circular, el beneficio proviene de evitar la disposición en relleno sanitario, que aporta -0.6% y la producción virgen con -66.6%.

Para el Agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, En esta categoría, el escenario de Visión Circular ANDI presenta cargas superiores a los escenarios de referencia (p. ej., -57% frente a materia prima virgen y -52% frente a BAU), es decir, no se observa una reducción neta para este indicador. Este comportamiento está dominado por el requerimiento energético del reciclaje de papel (etapas de pulpeo/limpieza/refinado y, especialmente, el secado), el cual en el inventario secundario empleado se abastece principalmente mediante energía térmica y/o eléctrica asociada al uso de gas natural (esquemas tipo cogeneración y/o caldera). Bajo este supuesto tecnológico, el consumo de gas natural se convierte en el principal contribuyente del ADP fósil y puede superar al desempeño de los escenarios comparativos, particularmente cuando éstos se representan con procesos de referencia con diferente configuración energética (p. ej., mayor participación de fuentes no fósiles o menores demandas térmicas).

En consecuencia, este resultado debe interpretarse como una sensibilidad del indicador a la fuente y eficiencia del suministro energético asumido para la transformación del papel, más que como una desventaja intrínseca del aprovechamiento. Como

oportunidad prioritaria, se recomienda enfocar acciones en eficiencia energética y sustitución progresiva de combustibles fósiles (p. ej., optimización de secado/recuperación de calor e incorporación de FNCE) y, en la medida de lo posible, actualizar el inventario con datos primarios representativos del contexto colombiano.

En Agotamiento de recursos abióticos – minerales y metales, El sistema evita 90 % frente al BAU y **90 % frente a materia prima virgen. La mayor parte de este beneficio proviene de no fabricar papel primario, ya que la extracción de minerales y recursos asociados al proceso de producción virgen tiene una carga significativamente más alta que la recuperación de material. La gestión circular mantiene un impacto relativamente bajo en comparación.**

Finalmente, en Residuos, en esta categoría, la gestión circular presenta mayores cargas frente al escenario virgen -49 %, pero evita 97 % frente al BAU, donde la totalidad del papel se dispondría en relleno sanitario. El resultado muestra que la ventaja principal se concentra en evitar la disposición, mientras que la comparación con el papel virgen depende del nivel de rechazo generado en los procesos de recuperación.

La corriente de papel presenta beneficios ambientales relevantes frente al modelo lineal y frente a la producción a partir de materia prima virgen en la mayoría de los indicadores evaluados, particularmente en agua, energía, minerales y huella de carbono. Las ventajas se explican por la menor intensidad de recursos del reciclaje y por la eliminación de la disposición. No obstante, en categorías específicas, como combustibles fósiles y residuos frente al escenario virgen, la gestión circular presenta cargas mayores debido a requerimientos operativos de energía y rechazos del proceso. Aun así, el balance ambiental general favorece la circularidad del papel frente a las alternativas lineales y primarias.

PLÁSTICO FLEXIBLE

Los resultados evidencian que la gestión realizada a través de Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales muy elevados para la corriente de plástico flexible en prácticamente todas las categorías evaluadas. En todos los casos —excepto en residuos frente a materia prima virgen— los impactos evitados superan ampliamente las cargas operativas de la cadena circular. Esto se debe a que la producción de plástico primario presenta cargas ambientales extremadamente altas y a que el modelo circular reduce casi totalmente el flujo al relleno sanitario.

En huella de carbono, la gestión de Visión Circular ANDI evita 87 % frente al BAU y 86 % frente a la materia prima virgen. La producción primaria aporta el mayor impacto negativo, equivalente a -852%, mientras que la disposición final evita apenas -3.0%. Las cargas propias del sistema de Visión Circular ANDI representan +12 %, pero se ven ampliamente compensadas por los impactos evitados de los escenarios lineales.

En consumo de agua, la gestión evita 92 % frente al BAU y 91 % frente al virgen. La mayor parte del impacto proviene de la fabricación del plástico primario -82.9 % y, en menor medida, de la disposición final evitada -9.7 %. El sistema circular introduce un impacto operativo de +7.4 %, pero este es marginal comparado con los beneficios acumulados.

En demanda de energía, la gestión evita 92 % tanto frente al BAU como frente al virgen. La producción de material primario constituye la carga más significativa -91.9 %, mientras que la disposición evita -0.3 % adicionales. Las actividades de recolección, acopio y transformación en Visión Circular ANDI aportan +7.8 %, peso que sigue siendo reducido frente al ahorro energético derivado de la sustitución del polímero primario.

En agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, se evita 95 % frente al BAU y 95 % frente al virgen. La fabricación del plástico primario aporta -94.6 %, reflejando la alta dependencia del petróleo y el gas natural, mientras que la gestión circular representa solamente +5.1 %. La disposición final evita otro -0.4 %, reforzando el balance neto positivo.

En agotamiento de recursos abióticos – minerales, la gestión evita 90 % tanto frente al BAU como frente al virgen. La mayor parte del beneficio proviene del proceso primario -90 %², ya que la cadena de recuperación requiere escasos insumos minerales adicionales. Las operaciones circulares generan +8.7 %, manteniéndose muy por debajo de los impactos evitados.

En residuos, los resultados muestran dos comportamientos diferentes. Frente al BAU, la gestión evita 97 %, ya que prácticamente todo el plástico flexible es desviado del relleno sanitario, lo que coincide con el aporte de -96.4 % de la disposición final evitada. Sin embargo, frente al escenario virgen, el balance es -200 %, debido a la generación de rechazos en los procesos de clasificación y transformación (cercanos al -2.7 % del sistema circular), que resultan mayores que los asociados a la producción primaria del polímero.

En conjunto, la corriente de plástico flexible presenta beneficios ambientales especialmente significativos en carbono, agua, energía y combustibles fósiles, impulsados por los altos impactos evitados de la producción primaria. Aunque la categoría de residuos frente al virgen presenta una carga neta, el balance general es ampliamente positivo y refuerza el valor ambiental de incorporar esta corriente al modelo de economía circular.

PLÁSTICOS RÍGIDOS

Los resultados muestran que la gestión realizada a través de Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales muy altos para la corriente de plástico rígido en todas las categorías evaluadas. En cada indicador, los impactos evitados por sustitución del material virgen y por evitar la disposición final superan ampliamente las cargas propias del sistema circular, lo que se traduce en beneficios cercanos al 100 % en la comparación con el modelo lineal y la fabricación primaria.

En huella de carbono, la gestión de Visión Circular ANDI evita 95 % frente al BAU y 94 % frente a la materia prima virgen. La mayor parte del beneficio proviene de la sustitución del plástico virgen -92.0 %, mientras que la disposición final evitada aporta un beneficio adicional de -2.8 %. Las cargas propias del sistema circular representan +5.2 %, pero quedan ampliamente superadas por los impactos evitados.

En consumo de agua, se observa un beneficio del 100 % frente a ambos escenarios. Esto se debe a que la producción de plástico rígido virgen presenta consumos hídricos significativos -82.2%, mientras que la disposición final aporta otro -17.6 % de beneficio. El sistema circular introduce cargas adicionales 0.2 %.

En demanda de energía, la gestión evita 94 % tanto frente al BAU como frente al virgen. La producción primaria explica la mayor parte del impacto negativo -87.9 %, mientras que la disposición final aporta -6.6 % adicionales. La operación de Visión Circular ANDI introduce una carga de +5.58 %, pero esta se ve ampliamente compensada por los beneficios asociados a la sustitución del material virgen.

En agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, la gestión evita 96 % frente a ambos escenarios, reflejando la alta dependencia del plástico virgen de recursos fósiles -96.1 %. La gestión circular aporta +3.5 %, pero su contribución es mínima comparada con los recursos fósiles evitados por no fabricar polímeros primarios.

En agotamiento de recursos abióticos – minerales, el beneficio es del 100 % frente al BAU y frente al virgen. La extracción de minerales para aditivos, catalizadores y cargas del plástico primario representa la totalidad del impacto evitado (-100 %), mientras que el sistema circular no genera cargas adicionales (0 %).

En residuos, la gestión evita 100 % frente al BAU y 100 % frente al virgen, ya que el material recuperado se reincorpora completamente al ciclo productivo y la producción de plástico primario no genera residuos significativos en esta categoría. La disposición final evitada aporta -98.6 %, mientras que la gestión circular introduce apenas -1.4 %, resultando en un beneficio total del 100 %.

En conjunto, el plástico rígido presenta un desempeño ambiental sobresaliente, con beneficios cercanos al 100 % en todas las categorías evaluadas. Estos resultados confirman que la recuperación y transformación de esta corriente dentro del modelo Visión Circular ANDI ofrece ventajas ambientales sustanciales frente al modelo lineal y la fabricación de resina virgen.

METALES

Los resultados muestran que la gestión realizada por Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales importantes para la corriente de metal en la mayoría de las categorías evaluadas. Estos beneficios provienen principalmente de la sustitución del material virgen y de evitar la disposición final, aunque las cargas propias del sistema circular pueden tener un peso mayor en algunas categorías como consumo de agua. En conjunto, los resultados reflejan que el aprovechamiento del metal ofrece ventajas ambientales relevantes frente a los escenarios de referencia.

En huella de carbono, la gestión de Visión Circular ANDI evita 84 % tanto frente al BAU como frente al escenario de materia prima virgen. La mayor parte del beneficio corresponde a la sustitución del metal primario -85.6 %, mientras que la disposición final aporta un beneficio marginal -0.7 %. El sistema circular introduce una carga de +13.7 %, que queda ampliamente compensada por los impactos evitados de los modelos lineales y de fabricación virgen.

En consumo de agua, la gestión evita 33 % frente al BAU y 21 % frente al virgen. En esta categoría, la carga del sistema circular es relativamente alta (+39.9 %), superando parcialmente los beneficios aportados por la sustitución de material primario -50.8 % y por la disposición final evitada -9.3 %. Esto indica que los procesos de transformación metalúrgica asociados al aprovechamiento requieren un uso de agua más significativo que las alternativas comparadas, reduciendo el beneficio neto.

En demanda de energía, la gestión evita 80 % tanto frente al BAU como frente al virgen. La producción de metal primario representa la mayor carga ambiental -82.4 %, mientras que la disposición final aporta un beneficio adicional -1.2 %. La gestión cir-

cular introduce un impacto operativo de +16.5 %, que es superado por los impactos evitados asociados a la fabricación virgen del metal.

En agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, la gestión evita 82 % frente a ambos escenarios. Este beneficio proviene principalmente de la intensa demanda de combustibles fósiles asociada a la producción de metal primario -83.6 %, mientras que la disposición final aporta un beneficio menor -1.2 %. La gestión circular representa una carga de +15.2 %, que se mantiene muy por debajo del impacto evitado por la sustitución del material virgen.

En agotamiento de recursos abióticos – minerales, la gestión evita 3 % tanto frente al BAU como frente al virgen. En esta categoría, el metal primario presenta una carga considerable -50.8 %, pero la gestión circular aporta un impacto operativo de mayor magnitud +49.1 %. Esto reduce el beneficio neto y muestra que, para este indicador específico, la operación del sistema circular tiene un peso relevante en comparación con los escenarios de referencia.

En residuos, la gestión evita 90 % frente al BAU y 20 % frente al escenario virgen. La mayor parte del beneficio se debe a que el material gestionado no llega al relleno sanitario (-80 %) y a que la gestión circular introduce un impacto mínimo -11.2 %. Frente al virgen, sin embargo, el beneficio neto es menor debido a que el proceso de transformación genera rechazos en cantidades superiores a las del proceso primario del metal.

En conjunto, la corriente de metal presenta beneficios ambientales significativos en carbono, energía y combustibles fósiles, impulsados principalmente por la sus-

titución del metal primario, cuya producción es altamente intensiva en recursos y energía. Aunque en minerales y agua las cargas del sistema circular reducen el beneficio neto, el balance general sigue favoreciendo el aprovechamiento del metal dentro del modelo Visión Circular ANDI.

VIDRIO

Los resultados² muestran que la gestión realizada a través de Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales moderados en la mayoría de las categorías para la corriente de vidrio. Estos beneficios se explican principalmente por la sustitución del vidrio virgen —altamente intensivo en energía y recursos— y por evitar la disposición final. Sin embargo, las cargas operativas de la cadena circular son más altas que en otras corrientes, especialmente en agua y energía, lo que reduce el beneficio neto en esas categorías.

En huella de carbono, la gestión de Visión Circular ANDI evita 36 % frente al BAU y 35 % frente a la materia prima virgen. El beneficio se debe principalmente a los impactos evitados por la sustitución del vidrio primario -60.1 % y por la disposición final evitada -0.7%. La operación de Visión Circular ANDI introduce +39.1 %, pero aun así los impactos evitados superan las cargas del sistema circular.

En consumo de agua, el beneficio es 53 % frente al BAU y 28 % frente al virgen. La disposición final evitada aporta -23.0 %, mientras que la sustitución del vidrio virgen contribuye con -44.8 %. El sistema circular introduce una carga de +32.2 %, lo que

—

² Se debe tener en cuenta que para vidrio se trabajó a partir de información de ACV de referencia existentes debido a la falta de participación de transformadores de vidrio.

reduce notablemente el beneficio neto, mostrando que el reciclaje de vidrio requiere un uso considerable de agua, especialmente en lavado y tratamiento de calcín.

En demanda de energía, la gestión evita 9 % frente al BAU y 7 % frente al virgen. La mayor parte del impacto evitado se debe a la fabricación primaria del vidrio -51.4 %, con una contribución menor de la disposición final -1.0 %. Las operaciones de Visión Circular ANDI aportan +47.6 %, lo que explica que el beneficio neto sea más bajo en esta categoría en comparación con otras corrientes.

En agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, la gestión evita 12 % frente al BAU y 10 % frente al virgen. La producción virgen aporta una carga de -51.9 %, y la disposición final -1.2 %, mientras que la operación circular introduce +47.6 %. Esto indica que, aunque existe un beneficio neto, los procesos térmicos y logísticos del reciclaje de vidrio son intensivos en consumo energético y fósil.

En agotamiento de recursos abióticos – minerales, el beneficio es 79 % frente al BAU y 79 % frente al virgen, impulsado por la elevada carga minera de la producción de arena sílica, calizas y feldespatos -82.4%. La gestión circular introduce una carga de +17.4 %, pero esta se ve ampliamente compensada por los impactos evitados en la producción primaria de vidrio.

En residuos, la gestión evita 98 % frente al BAU y 20 % frente al virgen. La casi totalidad del beneficio proviene de evitar la disposición final -95.2 %, mientras que la operación circular introduce una carga marginal +2.7 %. Frente al virgen, el beneficio es menor debido a que la producción primaria de vidrio genera muy pocos residuos sólidos.

En conjunto, los resultados muestran que el vidrio presenta beneficios ambientales relevantes frente a los escenarios de referencia, especialmente en minerales y huella de carbono. No obstante, el uso de agua y energía en el proceso de reciclaje reduce el beneficio neto en esas categorías, lo que refleja la intensidad operativa asociada al tratamiento y preparación del calcín. Aun así, el modelo circular sigue siendo ambientalmente favorable en la mayoría de los indicadores evaluados.

MULTIMATERIAL

Los resultados muestran que la gestión realizada por Visión Circular ANDI genera beneficios ambientales muy altos para la corriente de envases multimaterial, impulsados principalmente por la sustitución de material virgen —altamente intensivo en energía y recursos— y por evitar la disposición final. En todas las categorías se observan beneficios significativos frente a los modelos de referencia, con impactos operativos del sistema circular relativamente bajos.

En huella de carbono, la gestión de Visión Circular ANDI evita 84 % frente al BAU y 84 % frente a la materia prima virgen. La mayor parte del beneficio proviene de sustituir el material primario, cuyos procesos tienen una carga elevada –85.5 %, mientras que la disposición final aporta un impacto marginal –0.6 %. El sistema circular introduce +13.9 %, pero este valor queda ampliamente compensado por los impactos evitados.

En consumo de agua, la gestión evita 79 % frente al BAU y 75 % frente al virgen. La producción de cartón para bebidas virgen presenta un consumo hídrico considerable –69.6 %, mientras que la disposición final contribuye con –13.0 %. Las operaciones circulares agregan una carga moderada +17.5 %, pero sin revertir los beneficios globales del sistema.

En demanda de energía, la gestión evita 87 % tanto frente al BAU como frente al virgen. Esto se explica por la alta carga energética asociada a la producción primaria –87.7 %. La disposición final aporta un beneficio menor –0.6% y la gestión circular introduce una carga operativa de +11.7 %, manteniéndose por debajo de los impactos evitados.

En agotamiento de recursos abióticos – combustibles fósiles, la gestión evita 81 % frente a ambos escenarios. El principal aporte proviene de evitar la fabricación primaria del material multimaterial –83.4 %, mientras que la carga circular es de +15.6 %. La disposición final evita –1 %, completando el balance positivo.

En agotamiento de recursos abióticos – minerales, la gestión evita 99 % frente al BAU y 99 % frente al virgen, reflejando la altísima demanda de minerales y metales que implica la producción primaria del envase –99.2%. La gestión circular prácticamente no introduce cargas relevantes 0.2 %, lo que explica el beneficio total.

En residuos, la gestión evita 100 % frente al BAU y 97 % frente al virgen. La disposición final evitada aporta prácticamente la totalidad del beneficio –98.5 %, mientras que las operaciones circulares generan una carga mínima (0%). Frente al virgen, el beneficio sigue siendo muy alto porque la fabricación primaria genera muy pocos residuos sólidos.

En conjunto, los resultados muestran que la corriente multimaterial presenta beneficios ambientales muy significativos en todas las categorías evaluadas, especialmente frente a la producción de material virgen. Las cargas operativas del sistema circular son bajas en comparación con los impactos evitados, lo que refuerza la relevancia ambiental de gestionar esta corriente dentro del modelo Visión Circular ANDI.

Anexo 4

Análisis de Sensibilidad y Robustez del Modelo

En concordancia con ISO 14044 (fase de interpretación), se evaluó la robustez de las conclusiones comparativas frente a variaciones razonables en supuestos críticos del inventario. El objetivo fue verificar que la dirección de los resultados (i.e., ventaja o desventaja ambiental del escenario circular frente a los escenarios de referencia) no dependa de un valor puntual de entrada, y documentar qué supuestos generan mayor variabilidad y, por tanto, deben priorizarse en futuros ciclos de mejora de datos.

El análisis se realizó para las categorías de impacto: Huella de carbono, Demanda de energía, Consumo de agua, ADP fósil, ADP minerales/metales y Generación de residuos, evaluando la estabilidad del diferencial $\Delta = (\text{Referencia} - \text{Circular})$ por corriente de material. Para facilitar la lectura, los resultados detallados por variación se presentan en el Anexo 1 (Tabla de sensibilidad), y en el cuerpo del informe se reportan: (i) el supuesto evaluado, (ii) el rango de cambio observado y (iii) si se mantiene o no la conclusión comparativa (signo de Δ).

DISEÑO DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se aplicó una sensibilidad one-at-a-time (OAT), modificando un supuesto a la vez y manteniendo constantes los demás parámetros, con el fin de aislar el efecto de cada hipótesis. Se evaluaron cuantitativamente los siguientes casos:

- A.** Gestión de aguas (ratio de descarga/retorno): Se varió la fracción de agua que retorna como efluente en procesos sin dato primario de descargas (p. ej., lavado y acondicionamiento), considerando tres niveles representativos del grado de recirculación operativa: 50%, 80% (base) y 100%. Esta prueba representa la variabilidad entre sistemas con mayor recirculación/circuitos parciales y sistemas más abiertos con purgas/descargas cercanas al total del agua ingresada.
- B.** Logística (stress test de distancias): Se evaluó la sensibilidad a distancias asumidas en transporte a disposición final mediante un stress test de $\pm 30\%$ sobre las distancias/t.km, reflejando variabilidad plausible en rutas, consolidación y localización.
- C.** Regionalización del suministro eléctrico: se trató como un criterio de representatividad aplicado al caso base (no como escenario alternativo de sensibilidad), con el fin de mejorar coherencia con el contexto colombiano.
- D.** Sustitución y E) Proxies: se discuten como condicionantes conceptuales de la magnitud del beneficio (Δ) y como prioridades de mejora de datos; cuando se disponga de tiempo/datos, se recomienda explorarlos con rangos conservadores (p. ej., sustitución 70–100%) y proxies alternativos (“market for” vs “production of”, RoW vs GLO).

HALLAZGOS SOBRE LA ESTABILIDAD DE RESULTADOS

- A.** Ratio de descarga: sensibilidad acotada y sin cambio de conclusión. En las corrientes donde se aplicó la variación del ratio de descarga (50–80–100%), el indicador de consumo de agua responde de forma directa a la hipótesis de retorno/descarga; sin embargo, en los casos evaluados la variación observada del diferencial Δ se mantiene por debajo del umbral del 10% y no invierte la conclusión comparativa entre escenarios en las categorías principales. En categorías donde Δ es cercano a cero (p. ej., ADP minerales/metales), puede observarse “cruce por

cero” por efectos numéricos; estos casos deben interpretarse como no materiales por su baja magnitud absoluta y no afectan la lectura del desempeño global.

- B.** Sensibilidad logística ($\pm 30\%$): efecto marginal cuando el transporte no domina el total. El stress test de $\pm 30\%$ en distancias a disposición mostró, en general, variaciones pequeñas en Δ (inferiores al 10%) y sin cambio del signo en los indicadores principales. Esto sugiere que, dentro de rangos razonables, la incertidumbre en distancias asumidas no controla la dirección de las conclusiones BAU vs. Visión Circular ANDI. No obstante, la relevancia de la logística debe interpretarse en función de su contribución porcentual al total de impactos: en corrientes donde el transporte/logística representa una fracción material del impacto, acciones de consolidación, densificación de carga, tipología vehicular y optimización de rutas (logística inversa) pasan de ser buenas prácticas a palancas prioritarias.
- C.** Sustitución y proxies: condicionantes de magnitud (discusión cualitativa). La eficiencia de sustitución de material virgen y la selección de proxies influyen principalmente en la magnitud del beneficio ambiental (Δ), porque afectan los créditos por desplazamiento y la representatividad tecnológica. Aunque no se modelaron rangos alternativos en esta iteración, se documenta su potencial influencia y se recomienda priorizar en futuros ciclos: (i) parametrizar la sustitución con datos de calidad/uso final del material reciclado, y (ii) contrastar proxies alternativos para los procesos dominantes.

CONCLUSIÓN DE VALIDACIÓN

En conjunto, el modelo se considera robusto a nivel de conclusión comparativa para los supuestos evaluados cuantitativamente: variaciones razonables en distancia a disposición ($\pm 30\%$) y en ratio de descarga (50–80–100%) no generan cambios materiales ($>10\%$) ni invierten la dirección de las conclusiones principales. El análisis confirma

como prioridades para ciclos futuros: (i) fortalecer datos primarios en consumos/descargas de agua (recirculación/efluentes) y (ii) caracterizar mejor logística en corrientes donde su contribución sea significativa, además de documentar explícitamente el supuesto de sustitución y la selección de proxies para procesos dominantes.

Análisis transversal

La mayor oportunidad está en reducir la variabilidad (benchmark por material). La variación observada para una misma corriente —especialmente en plásticos rígidos— sugiere un potencial de optimización significativo. Se recomienda establecer un esquema de benchmark interno por material, con metas de mejora por factores clave de desempeño (energía, agua, generación de residuos y rendimiento del proceso) y ciclos anuales de seguimiento.

Priorizar factores claves de desempeño con co-beneficios, en la mayoría de las corrientes, las palancas con mayor impacto operativo y ambiental tienden a ser:

- **Eficiencia energética** (reduce huella, energía y ADP fósil).
- **Recirculación/gestión hídrica** (reduce consumo neto y, a veces, residuos asociados).
- **Reducción de rechazos/mermas** (mejora residuos y reduce consumos por tonelada útil).
- **Calidad de entrada** (palanca costo-efectiva que reduce reprocesos y pérdidas).