



**Implementación de estrategias de recolección y valorización de residuos de vasos de yogurt de poliestireno posconsumo**

**Melissa Silva Padilla**

Informe final de semestre de industria presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniera de Materiales**

Asesores:

Franklin Jaramillo Isaza, Profesor del Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia

Milena Hurtado Hurtado, Investigador en economía circular, Instituto de capacitación e investigación del plástico y caucho (ICIPC)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Materiales

Medellín

2024

---

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>Cita</b>               | (Silva Padilla, 2024)   |
| <b>Referencia</b>         | Silva Padilla, M. (2024). <i>Implementación de estrategias de recolección y valorización de residuos de vasos de yogurt de poliestireno posconsumo</i> , Semestre de Industria. Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, 2024. |
| <b>Estilo IEEE (2020)</b> |   |

---



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Julio César Saldarriaga Molina.

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Este trabajo de grado está dedicado a todas aquellas personas que han sido faros de guía y apoyo en mi camino. A mi familia, por su amor incondicional y su fe incansable en mis sueños, incluso cuando el camino parecía incierto. A mis amigos, por ser mi red de seguridad, ofreciendo risas y consuelo en los momentos necesarios. A mis profesores, por su dedicación y paciencia, por desafiar mi pensamiento y expandir mis horizontes más allá de lo que imaginaba posible.

## **Agradecimientos**

A mis asesores Milena Hurtado Hurtado y Franklin Jaramillo Isaza, por la paciencia, apoyo, acompañamiento y guía durante todo el desarrollo del proyecto de mi etapa práctica.

Al Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho ICIPC, por brindarme la oportunidad, el entorno y los recursos necesarios para llevar a cabo mi práctica profesional.

## Tabla de contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>   | <b>11</b> |
| <b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>   | <b>12</b> |
| <b>3. JUSTIFICACIÓN</b>  | <b>13</b> |
| <b>4. OBJETIVOS</b>  | <b>14</b> |
| 4.1. Objetivo general  | 14        |
| 4.2. Objetivos específicos   | 14        |
| <b>5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b>  | <b>15</b> |
| 5.1. Principios de economía circular y su aplicación al poliestireno   | 15        |
| 5.2. Propiedades y usos del poliestireno rígido  | 15        |
| 5.3. Importancia de cerrar el ciclo del poliestireno   | 16        |
| 5.4. Producción de poliestireno rígido: procesos e impactos  | 17        |
| 5.5. Reciclaje de Poliestireno Rígido  | 18        |
| 5.5.1. Tecnologías y métodos de reciclaje mecánico   | 20        |
| 5.6. Reciclaje de Poliestireno (PS) grado alimento.  | 21        |
| 5.7. Aplicaciones y reutilización de poliestireno reciclado  | 23        |
| 5.8. Casos de economía circular para poliestireno  | 24        |
| 5.9. Obstáculos en el reciclaje de poliestireno (PS) en Colombia   | 25        |
| <b>6. METODOLOGÍA</b>  | <b>26</b> |
| 6.1. ETAPA 1. Diagnóstico y Selección de Fuentes de Materiales   | 26        |
| 6.1.1. Refinación del estado del arte frente a recuperación y aprovechamiento de los residuos de PS  | 26        |
| 6.1.2. Selección de fuentes de materiales e identificación de los principales actores en la cadena para la red logística, transformación y aprovechamiento de los residuos de PS | 26        |
| 6.1.3. Visita de Diagnóstico a las empresas involucradas en la cadena de valor   | 27        |
| 6.2. ETAPA 2. Implementación de Estrategias para la Circularidad de Residuos   | 27        |
| 6.3. Fuentes de acopio   | 27        |
| 6.3.1. Fuentes de acopio posconsumo controladas  | 28        |
| 6.3.2. Fuentes de acopio posconsumo no controladas   | 30        |
| 6.4. ETAPA 3. Evaluación del Proceso de Valorización de Residuos   | 31        |
| 6.4.1. Proceso de molienda, lavado y secado del material en el laboratorio del ICIPC   | 31        |
| 6.4.2. Proceso de molienda, lavado y secado del material en la planta de Ecopositiva   | 32        |
| 6.4.3. Proceso de obtención de los vasos en la planta de Carvajal Empaques   | 32        |
| 6.4.4. Caracterización de las muestras en escamas  | 32        |
| 6.4.5. Caracterización del producto terminado  | 34        |
| <b>7. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>  | <b>36</b> |
| 7.1. ETAPA 1. Diagnóstico y Selección de Fuentes de Materiales   | 36        |
| 7.1.1. Selección de fuentes de materiales e identificación de los principales actores en la cadena   |           |

|  |           |
|--|-----------|
| para la red logística, transformación y aprovechamiento de los residuos de PS                        | 36        |
| 7.1.2. Visita de Diagnóstico a las empresas involucradas en la cadena de valor                       | 41        |
| 7.1.2.1. Asociación de Recicladores de Cajicá (ARCA)   | 42        |
| 7.1.2.2. Ecopositiva S.A.S   | 47        |
| 7.1.2.3. Carvajal Empaques S.A   | 52        |
| 7.2. ETAPA 2. Implementación de Estrategias para la Circularidad de Residuos                         | 57        |
| 7.2.1. Análisis de las fuentes de acopio   | 57        |
| 7.2.1.1. Fuentes de acopio controladas   | 57        |
| 7.2.1.2. Fuentes de acopio no controladas  | 61        |
| 7.3. ETAPA 3. Evaluación del Proceso de Valorización de Residuos                                     | 61        |
| 7.3.1. Caracterización de las muestras en escamas provenientes de los dos tipos de fuentes evaluadas | 61        |
| 7.3.1.1. Determinación del perfil cromatográfico de contaminantes (GC-MS)                            | 62        |
| 7.3.1.2. Caracterización térmica y analítica   | 65        |
| 7.3.1.2.1. calorimetría diferencial de barrido (DSC)   | 65        |
| 7.3.1.2.2. termogravimetría (TGA)  | 68        |
| 7.3.1.2.3. Espectrometría infrarroja (FTIR)  | 71        |
| 7.3.1.3. Caracterización reológica   | 73        |
| 7.3.1.3.1. Índice de fluidez (MFI)   | 73        |
| 7.3.1.4. Caracterización mecánica  | 75        |
| 7.3.1.4.1. Resistencia a la tensión  | 75        |
| 7.3.1.4.2. Resistencia al impacto  | 78        |
| 7.3.1.5. Caracterización física  | 79        |
| 7.3.1.5.1. Densidad de empaque   | 79        |
| <b>8. Conclusiones</b>   | <b>81</b> |
| <b>9. Referencias</b>  | <b>83</b> |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Información de los centros de acopio controlados que tuvo el proyecto..... | 30 |
| <b>Tabla 2.</b> Índice de fluidez de las muestras evaluadas.....                           | 75 |
| <b>Tabla 3.</b> Resultados de resistencia a la tensión.....                                | 77 |
| <b>Tabla 4.</b> Resultados de resistencia al impacto.....                                  | 78 |

## Lista de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Cadena de valor en el reciclaje del plástico[20].....                                      | 37 |
| <b>Figura 2.</b> Esquema REP en envases y empaques en Colombia.....   | 45 |
| <b>Figura 3.</b> Pruebas de control de calidad realizadas al rPS.....                                       | 53 |
| <b>Figura 4.</b> Sistema de rotación múltiple (MRS). Tomado de [23].....                                    | 54 |
| <b>Figura 5.</b> Unidad de Procesamiento Gneuss (GPU). Tomado de [23].....                                  | 55 |
| <b>Figura 6.</b> Diseño de la etiqueta que llevan los contenedores en los puntos de acopio.....             | 59 |
| <b>Figura 7.</b> Diseño del hablador que acompañan los puntos de recolección.....                           | 59 |
| <b>Figura 8.</b> Punto de acopio de los vasos de yogur en los colegios.....                                 | 60 |
| <b>Figura 9.</b> Registro fotográfico de la difusión de las campañas educativas.....                        | 61 |
| <b>Figura 10.</b> Perfil cromatográfico del vaso poliestireno virgen.....                                   | 63 |
| <b>Figura 11.</b> Perfil cromatográfico de la muestra controlada.....                                       | 64 |
| <b>Figura 12.</b> Perfil cromatográfico de la muestra controlada.....                                       | 65 |
| <b>Figura 13.</b> Termograma de DSC de la muestra controlada.....   | 67 |
| <b>Figura 14.</b> Termograma de DSC de la muestra no controlada.....  | 68 |
| <b>Figura 15.</b> Termograma de TGA de la muestra controlada.....   | 70 |
| <b>Figura 16.</b> Termograma de TGA de la muestra no controlada.....  | 71 |
| <b>Figura 17.</b> Espectro FTIR de la muestra controlada.....   | 73 |
| <b>Figura 18.</b> Espectro FTIR de la muestra no controlada.....  | 73 |
| <b>Figura 19.</b> Curva esfuerzo - deformación para las muestras de fuentes controlada y no controlada..... | 77 |
| <b>Figura 20.</b> Curvas de densidad de empaque para fuente controlada y no controlada.....                 | 80 |

## **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

|              |   |
|--------------|---|
| <b>HIPS</b>  | Poliestireno de alto impacto                                    |
| <b>PS</b>    | Poliestireno  |
| <b>ICIPC</b> | Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y Caucho |
| <b>rPS</b>   | Poliestireno reciclado  |
| <b>MFI</b>   | Índice de fluidez   |

---

## RESUMEN

El proyecto de grado se enfocó en explorar y analizar la viabilidad de implementar estrategias de recolección y valorización de residuos de poliestireno (PS) posconsumo, específicamente vasos de yogurt, mediante la identificación de los actores pertenecientes a la cadena de valor y orientar las acciones de los mismos en el cierre de ciclo del poliestireno, empleando como estrategia de recolección en fuentes controladas y no controladas de material reciclado. A través de una investigación detallada que incluyó la comparación de propiedades físicas y mecánicas del poliestireno reciclado, el estudio buscó determinar la factibilidad de reintegrar estos materiales en el ciclo productivo, alineándose con los principios de la economía circular y la sostenibilidad. Los hallazgos del proyecto revelaron diferencias apreciables en la calidad y las propiedades del material reciclado, dependiendo de la fuente. Las muestras provenientes de fuentes controladas mostraron una mayor uniformidad en términos de densidad de empaque, resistencia a la tensión, elongación a la rotura, y resistencia al impacto, indicando una calidad superior y una mayor facilidad de procesamiento. Por el contrario, las muestras de fuentes no controladas presentaron propiedades mecánicas, térmicas y físicas inferiores, además de una mayor variabilidad en las propiedades reológicas, lo que sugiere desafíos adicionales en términos de su procesabilidad y aplicabilidad en nuevos productos.

***Palabras clave:*** reciclaje, posconsumo, economía circular, cadena de valor, poliestireno.

## ABSTRACT

The thesis project focused on exploring and analyzing the feasibility of implementing collection and valorization strategies for post consumer polystyrene (PS) waste, specifically yogurt cups, by identifying the actors within the value chain and directing their actions towards closing the cycle of polystyrene, using collection strategies from both controlled and uncontrolled sources of recycled material. Through detailed research that included the comparison of physical and mechanical properties of recycled polystyrene, the study sought to determine the feasibility of reintegrating these materials into the production cycle, aligning with the principles of the

circular economy and sustainability. The findings of the project revealed noticeable differences in the quality and properties of the recycled material, depending on the source. Samples from controlled sources showed greater uniformity in terms of packing density, tensile strength, elongation at break, and impact resistance, indicating superior quality and greater ease of processing. Conversely, samples from uncontrolled sources presented inferior mechanical, thermal, and physical properties, in addition to greater variability in rheological properties, suggesting additional challenges in terms of their processability and applicability in new products.

***Keywords:*** recycling, post consumer, circular economy, value chain, polystyrene.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente conciencia ambiental y la necesidad de gestionar los residuos de manera sostenible han dado lugar a términos cada vez más familiares como la economía circular y la valorización de productos. Este cambio de paradigma ha impulsado la creación de propuestas legislativas destinadas a fomentar la economía circular y reducir la generación de desechos.

En este contexto, la industria del plástico ha estado en constante búsqueda de alternativas para valorizar los residuos, permitiéndole integrar mayores cantidades de materia prima reciclada en la fabricación de nuevos productos, especialmente en el sector de los envases alimentarios. Un ejemplo destacado de éxito en el cierre del ciclo de producto es el proceso de reciclaje del PET botella-botella. Siguiendo este modelo, se ha demostrado que el poliestireno (PS) posee un potencial similar para alcanzar su cierre de ciclo a través del reciclaje mecánico.

Carvajal Empaques, consciente de esta oportunidad y de las demandas normativas, obtuvo la aprobación del INVIMA para utilizar material reciclado posconsumo de PS en envases destinados a alimentos, convirtiéndose en un hito significativo al ser el segundo material plástico en recibir esta certificación. Esta aprobación subraya la importancia de desarrollar fuentes controladas de material reciclado, evitando la contaminación cruzada y garantizando la calidad de los envases alimentarios.

Por tanto, la ejecución de este proyecto tiene como objetivo principal establecer una fuente controlada de residuos de PS posconsumo. Específicamente, el piloto de recolección se enfoca en los vasos de yogur de poliestireno, una iniciativa que no solo promueve la gestión responsable de los residuos, sino que también contribuye a cerrar el ciclo de vida de los productos plásticos, fomentando así la economía circular y la sostenibilidad ambiental en la industria del envasado de alimentos.

---

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el contexto de la industria de empaques para alimentos, el uso del poliestireno (PS) ha generado un problema significativo de gestión de residuos. Esta problemática se agrava debido a la baja densidad de este material, lo cual hace que no sea atractivo para la cadena de recicladores su acopio, sumado a la falta de desarrollo de su cadena de valor. Lo que ha dado lugar a la acumulación de estos residuos en vertederos, contribuyendo a la contaminación ambiental y violando las regulaciones establecidas por la Ley 2232, artículo 18.

El principal desafío en la cadena de valorización de los residuos de PS para alcanzar su uso en aplicaciones en contacto con alimentos radica en la ausencia de metodologías específicas y recursos técnicos para gestionar estos residuos de manera efectiva. En este sentido la propuesta con la ejecución de este proyecto y teniendo en cuenta que desde el 2021 Carvajal Empaques cuenta con aprobación del Invima para incorporación de materia prima reciclada de PS para su uso en envases para contacto con alimentos, es desarrollar un piloto de articulación de los actores de la cadena de valor de residuos de vasos de yogur de PS. El objetivo del encadenamiento es buscar desarrollar una fuente de vasos de yogur controlada y trazable, de tal manera que pueda cumplir con los requerimientos del Invima para su uso en contacto con alimentos.

El proyecto se plantea desarrollar en tres etapas, la primera consiste en identificar los actores, sus capacidades y vincularlos al proyecto, definiendo un rol específico en él, la segunda etapa consiste en establecer una metodología de recolección de los vasos de yogur que permita garantizar su trazabilidad y evitar al máximo cualquier posible contaminación cruzada, una vez acopiados los vasos se le realizará el proceso de reciclaje correspondiente, iniciando con la molienda y terminando con un nuevo vaso para envasar yogur, la formulación y los detalles del proceso de reciclaje corresponden al know how de Carvajal Empaques. Finalmente, la tercera etapa consiste en evaluar la calidad de la materia prima reciclada obtenida y las condiciones de inocuidad requeridas en el producto final.

---

### 3. JUSTIFICACIÓN

La importancia de comprender y abordar el tema de la valorización de residuos en la industria del plástico y la búsqueda de alternativas sostenibles en la gestión de los mismos radica en varios aspectos fundamentales.

En primer lugar, la creciente preocupación por el medio ambiente y la necesidad imperante de reducir el impacto negativo de los residuos plásticos en los ecosistemas y la salud humana demandan soluciones innovadoras y sostenibles. La gestión adecuada de los residuos plásticos no solo contribuye a la preservación del medio ambiente, sino que también responde a las demandas sociales y normativas cada vez más estrictas en torno a la protección ambiental.

La selección de este tema se justifica por su relevancia y actualidad en el contexto global. La crisis ambiental derivada del uso indiscriminado de plásticos de un solo uso y la acumulación de residuos plásticos en los océanos y vertederos ha generado una urgente necesidad de encontrar soluciones efectivas y sostenibles. Además, el enfoque en la valorización de materiales plásticos no solo aborda la problemática de los residuos, sino que también promueve la economía circular y la optimización de recursos.

El proyecto de práctica en ingeniería de materiales contribuirá significativamente al avance y la innovación en este campo. La investigación y desarrollo de procesos de valorización de residuos plásticos, como el reciclaje mecánico del poliestireno (PS) mencionado, representan un área de interés clave para la ingeniería de materiales. El proyecto no solo explorará nuevas tecnologías y metodologías para la valorización de residuos, sino que también generará conocimientos y experiencia práctica en la implementación de soluciones sostenibles en la industria.

Además, el proyecto tiene el potencial de impulsar la colaboración entre diferentes disciplinas, como la ingeniería de materiales, la ingeniería ambiental, la química y la ingeniería de procesos, fomentando así un enfoque interdisciplinario para abordar los desafíos complejos relacionados con la gestión de residuos plásticos.

---

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo general

Desarrollar un piloto de articulación de la cadena de valor para la recuperación de residuos de poliestireno (PS) posconsumo grado alimenticio, con el propósito de determinar la viabilidad de su reintegración en empaques destinados a alimentos.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar y definir los principales desafíos relacionados con la utilización de residuos provenientes de vasos de yogurt de poliestireno (PS) posconsumo en la industria de empaques para alimentos, mediante la realización de sesiones de trabajo con actores clave de su cadena de valor.
- Desarrollar una metodología de recolección y preparación que permita la valorización de los residuos provenientes de los vasos de yogurt de poliestireno (PS) posconsumo, asegurando que posean propiedades adecuadas para su uso en empaques destinados a contacto con alimentos, a través de la articulación de los actores clave de su cadena de valor.
- Evaluar la valorización de residuos provenientes de vasos de yogurt de poliestireno (PS) posconsumo, enfocándose en la efectividad del proceso de descontaminación y la calidad de la materia prima reciclada mediante pruebas de laboratorio.

---

## 5. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 5.1. Principios de economía circular y su aplicación al poliestireno

La economía circular es un enfoque económico y ambiental que busca reducir el desperdicio y la extracción de recursos al máximo, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la regeneración de productos y materiales en la cadena de valor. En contraste con el modelo lineal tradicional de "tomar, hacer, desechar", la economía circular se basa en varios principios clave que pueden aplicarse al poliestireno, para mitigar su impacto ambiental y fomentar su reutilización.

El poliestireno (PS) es un polímero con baja capacidad de absorción y transferencia de sustancias a través de su masa, es decir presenta baja migración, y, por lo tanto, es un candidato prometedor para ser reciclado nuevamente en contacto con alimentos de manera similar al tereftalato de polietileno (PET). Sin embargo, para tal reciclaje de vasos de PS no se ha establecido hasta la fecha una cadena de valor completamente articulada a escala comercial [1], [2]. Aunque aún existen algunas incógnitas en cuanto al reciclaje de PS posconsumo para su uso en envases en contacto directo con alimentos, tras un análisis más detenido, se encontró suficiente información para dar una primera indicación de su seguridad.

### 5.2. Propiedades y usos del poliestireno rígido

El poliestireno (PS), es un termoplástico formado a partir de la polimerización del monómero estireno, la cual estructuralmente facilita dicho proceso gracias al grupo funcional vinilo que da lugar a la reacción de los mismos. Además dicha estructura le otorga excepcionales propiedades, como insolubilidad dada por el carácter apolar de sus enlaces, brillo, transparencia, bajo peso, aislante tanto térmico como eléctrico, buena estabilidad dimensional al encontrarse bajo condiciones de humedad o cambios ambientales y facilidad de procesamiento. Se puede fabricar utilizando técnicas de extrusión o moldeo por inyección. En el proceso de extrusión, el polímero se funde y se moldea en formas continuas, como láminas o perfiles. Por otro lado, en el moldeo por inyección, el poliestireno fundido se inyecta en un molde para producir piezas

---

individuales, luego, las piezas moldeadas se enfrían y solidifican para mantener su forma, permitiendo así una ventaja para aplicaciones en industrias como alimentos, automotriz, eléctricas, farmacéutica, entre otros. La economía circular, un enfoque fundamental en la actualidad, se erige como un modelo económico y ambiental orientado a minimizar el desperdicio y la extracción de recursos al máximo, incentivando la reutilización, el reciclaje y la regeneración de productos y materiales en toda la cadena de valor. En contraposición al modelo lineal tradicional de "tomar, hacer, desechar", la economía circular se basa en principios clave que pueden aplicarse al poliestireno (PS) para atenuar su impacto ambiental y promover su reutilización [1]. En Colombia, la gestión del poliestireno (PS) comienza con la importación del monómero estireno, ya que a nivel mundial se producen alrededor de 19,15 millones de toneladas de PS anualmente y se importan aproximadamente 6,282 toneladas [3]. Estas importaciones tienen como objetivo fundamental la polimerización del estireno para la generación de poliestireno, que se emplea en una amplia variedad de productos, incluyendo envases, empaques y utensilios de consumo. En el país, destacan empresas líderes en la producción de poliestireno, como Americas Styrenics de Colombia Ltda y Dexton-Ajover S.A, las cuales no solo fabrican la materia prima, sino que también abastecen las diversas necesidades nacionales relacionadas con envases y contenedores alimenticios. Este análisis no sólo arroja luz sobre la situación actual en Colombia en cuanto a la producción de poliestireno, sino también sobre la proporción de residuos de este material en el país. Entender la magnitud de la producción y las importaciones de poliestireno, así como identificar a los principales actores en esta industria, es esencial para desarrollar estrategias efectivas de manejo de residuos y promover prácticas más sostenibles en la cadena de valor del poliestireno en el país.

### **5.3. Importancia de cerrar el ciclo del poliestireno**

Según un estudio realizado por la universidad de Manizales se encontró que la cantidad de desecho sólido asociada al poliestireno oscila alrededor del 13% de todo el desecho sólido generado en Colombia [4] [5]. Lo cual es preocupante debido al gran impacto negativo que esto representa para el país. La contaminación, el espacio empleado en los depósitos, los gases que liberan durante la incineración y el agravante del daño generado en la fauna y flora, lo cual es

---

evidente en el notable avance de la contaminación ambiental. La necesidad urgente de abordar el problema de contaminación causado por productos de poliestireno, tanto rígido como expandido, se destaca en diversos estudios; estos materiales han contribuido significativamente al aumento de la contaminación en los últimos años, afectando tanto el medio ambiente como la economía; para contrarrestar este impacto, es crucial cerrar el ciclo de la cadena de valor del poliestireno, implementando sistemas de reciclaje eficientes que permitan su reintegración adecuada en la industria productiva.

#### **5.4. Producción de poliestireno rígido: procesos e impactos**

El poliestireno es un termoplástico que se obtiene por la polimerización de un monómero de estireno. La polimerización es una reacción química en la que se unen muchas moléculas pequeñas (monómeros) para formar una molécula grande (polímero). En el caso del poliestireno, los monómeros de estireno se unen entre sí para formar una cadena larga y lineal.

Hay dos tipos principales de polimerización del poliestireno:

**Polimerización por masa:** En este método, el monómero de estireno se mezcla con un iniciador, que es una sustancia que inicia la reacción de polimerización. El iniciador crea radicales libres, que son moléculas inestables con un electrón desapareado. Los radicales libres reaccionan con los monómeros de estireno para formar nuevas cadenas; así bien este método es el más común para fabricar poliestireno, ofreciendo varias ventajas, como tiempos de reacción más cortos y un mayor control sobre las propiedades del polímero. Sin embargo, también conlleva algunos desafíos, como la necesidad de un mayor control para obtener la longitud y distribución de pesos moleculares adecuadas.

**Polimerización en suspensión:** En este método, el monómero de estireno se suspende en un líquido, como agua o aceite. El iniciador se agrega al líquido y crea radicales libres. Los radicales libres reaccionan con los monómeros de estireno para formar nuevas cadenas.

Por otro lado, la constante fabricación de poliestireno (PS) genera preocupación debido al incremento evidente de los desechos plásticos, las prácticas inadecuadas de reciclaje y la escasa

---

respuesta de algunas entidades gubernamentales. Por lo tanto, es necesario conocer los impactos ambientales y sociales que conlleva la producción de PS, para buscar soluciones que afronten o contrarresten esta realidad. En particular, el proceso de reciclaje de vasos de yogur, hechos comúnmente de PS, representa un desafío y una oportunidad significativa en el manejo de desechos plásticos.

El proceso de reciclaje de vasos de yogur de PS comienza con la recolección y separación de los desechos plásticos, donde los vasos deben estar limpios y libres de residuos orgánicos para evitar la contaminación del material reciclable. Luego, estos se someten a un proceso de trituración para reducir su tamaño y facilitar su manejo. Posteriormente, los trozos triturados pasan por un proceso de lavado y secado para eliminar etiquetas, adhesivos y otros contaminantes. El material limpio y seco se funde y se extruye en forma de pellets, que pueden ser utilizados para producir nuevos artículos de plástico, incluyendo, potencialmente, nuevos envases para alimentos.

Este proceso no solo ayuda a reducir la cantidad de desechos que terminan en vertederos y océanos, sino que también contribuye a la economía circular, promoviendo el uso eficiente de los recursos. Sin embargo, el reciclaje de PS, especialmente para aplicaciones en contacto con alimentos, requiere de tecnologías avanzadas y estándares de seguridad rigurosos para asegurar que los productos reciclados sean seguros para los consumidores. A pesar de estos desafíos, el reciclaje de vasos de yogur de PS y otros productos similares es un paso crucial hacia la reducción del impacto ambiental de los desechos plásticos y la promoción de prácticas de producción y consumo más sostenibles.

### **5.5. Reciclaje de Poliestireno Rígido**

El reciclaje del poliestireno implica una serie de desafíos químicos y técnicos, especialmente debido a su susceptibilidad a la degradación durante el procesamiento térmico, al grado de contaminación que pueda presentar y los deterioros o disminución de las propiedades ocasionadas por técnicas de procesamiento previas, entre estas se encuentra el reciclaje mecánico, el cual, está basado en la trituración y posterior extrusión del polímero, pero, 23

---

requiere un control preciso de las condiciones de temperatura y tiempo para minimizar la degradación, por lo que Chea et al [6], plantea como alternativa el reciclaje químico, donde la pirólisis y la despolimerización asistida por catalizadores emergen como opciones prometedoras para el reciclaje del poliestireno, permitiendo la regeneración de monómeros de estireno para su posterior polimerización.

Se han explorado varios métodos para abordar los desafíos asociados con el reciclaje de PS, donde se destacan la importancia de desarrollar una tecnología económica para reciclar poliestireno (PS) debido a la contaminación que impide el reciclaje mecánico, de modo que se busca un enfoque en el que sobresale el uso de procesos basados en solventes, Kara et al [7], muestra un proceso de reciclaje basado en solventes, utilizando p-cimeno y heptano, para producir resina de PS reciclado de alta pureza, desarrollando un método de espectroscopia infrarroja (IR) para cuantificar las concentraciones de estos componentes en diferentes etapas del proceso a nivel de planta, de modo que el método permite una cuantificación simultánea con límites de detección del 0,5% para el p-cimeno y del 1% para el heptano, aplicándose así a muestras de una planta piloto de reciclaje de PS para mejorar la eficiencia del proceso de lavado.

Márquez et al [8] por otro lado muestra la despolimerización catalítica del PS como alternativa para superar estas limitaciones en el reciclaje del poliestireno, ya que la presencia de un catalizador puede mejorar la selectividad de productos para el reciclaje químico y la mejora del PS, por lo que este estudio se centra en los procesos catalíticos para la producción de estireno y otros aromáticos valiosos a partir de residuos de PS, y tiene como objetivo sentar las bases para la reciclabilidad del PS y la producción sostenible a largo plazo de PS.

Niessner et al [9] estudió la viabilidad técnica del reciclaje de poliestireno a través de la despolimerización y repolimerización donde identificaron fuentes adecuadas de residuos de poliestireno posconsumo y se investigó su preacondicionamiento, la despolimerización se realizó a nivel de laboratorio y en un extrusor piloto, produciendo monómero de estireno de alta calidad, el cual se utilizó con éxito para repolimerizar el poliestireno, demostrando así con éxito que estos resultados respaldan la incorporación del poliestireno en un enfoque de economía circular.

---

Para que la economía circular sea realmente circular, el reciclaje de plástico debe ampliarse más allá de las botellas de PET. El poliestireno (PS) es un candidato prometedor, pero existen obstáculos que deben superarse antes de que se pueda utilizar de forma segura en el contacto directo con alimentos.

El PS recuperado de fuentes posconsumo está disponible, pero los procesos de reciclaje mecánico a escala industrial para PS posconsumo en contacto directo con alimentos aún no están establecidos plenamente. Además, los procesos de reciclaje de superlimpieza de PS aún no han sido evaluados completamente para su cumplimiento de la legislación alimentaria. Como resultado, no existen criterios de evaluación para el reciclaje seguro de PS posconsumo en contacto directo con alimentos [10].

La Comisión Europea ha aprobado un nuevo reglamento para aumentar el uso de plásticos reciclados en contacto con alimentos. El objetivo es reducir la contaminación por plásticos y promover una economía circular. El nuevo reglamento establece dos categorías de tecnologías de reciclaje: "adecuadas" y "novedosas". Las tecnologías adecuadas ya han sido evaluadas por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y autorizadas por la Comisión Europea. Las tecnologías novedosas aún están en desarrollo y requieren un seguimiento y una evaluación más detallados [11].

El reglamento también establece nuevos criterios para evaluar la seguridad de los plásticos reciclados. Estos criterios se basan en tres factores:

- La concentración de contaminantes potenciales en los polímeros posconsumo.
- La eficiencia de limpieza de los procesos de reciclaje empleando las tecnologías de súper limpieza.
- El escenario de exposición del consumidor.

---

El antiguo reglamento de la UE sobre plásticos reciclados en contacto con alimentos era muy restrictivo y sólo permitía el uso de PET. Esto se debe a que los criterios de evaluación de la EFSA para plásticos reciclados son muy conservadores.

El PET es un polímero de baja difusión, lo que significa que es poco probable que los contaminantes migren de él a los alimentos. Además, existen procesos de reciclaje súper limpios que pueden eliminar la mayoría de los contaminantes, es decir, usan los materiales de salida de los procesos de reciclaje convencionales como material de entrada y aplican más pasos de limpieza profunda para eliminar las sustancias posconsumo. En la mayoría de los casos, se utilizan procesos especiales de lavado, alta temperatura, vacío, tratamiento de superficie, fusión, filtración de fusión y pasos de degasificación de fusión para eliminar los contaminantes posconsumo. El producto de los procesos súper limpios se puede utilizar para aplicaciones de envasado en contacto directo con el alimento, siempre que cumplan con las pautas reglamentarias o los requisitos legales correspondientes. Si es así, estos productos no contienen migrantes medibles que no sean los del PS virgen de calidad alimentaria.

Sin embargo, el antiguo reglamento no permitía el uso de otros polímeros de baja difusión, como el PS. Esto se debe a que los procesos de reciclaje súper limpios, no están disponibles a escala industrial para este tipo de polímeros.

### **5.5.1. Tecnologías y métodos de reciclaje mecánico**

El reciclaje mecánico del poliestireno (PS) es un proceso crucial para abordar los desafíos ambientales asociados con este material plástico ampliamente utilizado. El PS se encuentra en una variedad de productos, desde envases y utensilios de cocina hasta juguetes y componentes automotrices. Su reciclaje mecánico busca reducir la dependencia de recursos no renovables y minimizar la generación de residuos plásticos [6].

El proceso de reciclaje mecánico del PS implica varias etapas clave. Los productos de PS posconsumo se recolectan y clasifican para separarlos de otros materiales. La pureza del PS recogido es esencial para garantizar la calidad del material reciclado. Posteriormente, se tritura o

---

muele en pequeños fragmentos conocidos como "escamas" o "pellets". Esta etapa reduce el volumen del material y facilita su procesamiento posterior. Se eliminan los restos de alimentos, etiquetas y otros contaminantes para obtener un PS reciclado limpio y seguro. Finalmente, las escamas de PS se funden y se extruyen en forma de gránulos o pellets. Estos gránulos pueden utilizarse en la fabricación de nuevos productos de PS, como envases, utensilios y piezas de plástico.

El reciclaje mecánico presenta ventajas significativas, pues la implementación de rPS en los procesos productivos, representa una disminución en el empleo de la materia prima virgen, lo cual en función del rPS empleado representará una reducción de la demanda de petróleo crudo, disminución de la huella de carbono y la conservación de recursos. Sin embargo, también enfrenta desafíos, como la contaminación del PS posconsumo y la necesidad de sistemas de recolección eficientes [5].

#### **5.6. Reciclaje de Poliestireno (PS) grado alimento.**

El aumento del reciclaje de plástico es un requisito previo esencial para la transición a una economía circular. El poliestireno (PS) es un polímero de baja difusión y, por lo tanto, un candidato prometedor para reciclar nuevamente en contacto con alimentos de manera similar al tereftalato de polietileno (PET) [10]. Sin embargo, tal reciclaje de vasos PS no se ha establecido hasta la fecha a escala comercial. Incluso si se desea reciclar de nuevo en contacto con alimentos, la salud del consumidor no debe estar en riesgo [12]. Como consecuencia, los procesos de reciclaje deben pasar por una evaluación conservadora por parte de las autoridades pertinentes. Para PS, sin embargo, no se publican los criterios de evaluación, lo que es un inconveniente para los desarrolladores de procesos.

Se avanza en investigaciones alrededor de tecnologías de reciclaje mecánico que permitan el uso de PS posconsumo de nuevo en envases en contacto directo con los alimentos, todavía hay algunos puntos abiertos que no pueden ser respondidos de manera concluyente en la actualidad. Después de una inspección más cercana, parece haber suficiente información disponible para dar

---

una primera indicación de si el reciclaje de materiales de empaque de PS posconsumo para volver a ponerlos en contacto directo con los alimentos puede considerarse seguro [10].

Es importante asegurarse de que el poliestireno reciclado cumpla con los estándares de calidad y seguridad. Para ello, se realizan pruebas de resistencia, durabilidad y propiedades químicas.

El reciclaje mecánico del poliestireno es una alternativa para contrarrestar la problemática ambiental asociada a este material. La investigación sobre este proceso está en constante desarrollo, con el objetivo de mejorar su eficiencia y sostenibilidad [13].

Goshayeshi et al [14], estudiaron sobre la sensibilidad del poliestireno (PS) al estrés termo mecánico y las dificultades en su reciclaje mecánico convencional y presenta avances en técnicas emergentes de reciclaje, como la disolución rápida en solventes industriales, y mejoras en la extrusión para facilitar su reciclaje. Se destaca el gran aporte que una extrusora doble husillo corrotante puede ofrecer al reciclaje mecánico, pues en esta se puede controlar la degradación térmica del material a reciclar, aumenta la eficiencia del proceso .

Netsch et al [15], esta publicación se centra en el reciclaje mecánico y termoquímico combinado de sistemas compuestos de aislamiento térmico exterior (ETICS) basados en poliestireno, evaluando oportunidades de economía circular, al someter un residuo de poliestireno a un tratamiento mecánico y a un modelo de ETICS representativo de desechos de construcción. Luego, se emplean pasos de pirólisis y/o gasificación, con balances de masa y energía completos. El reciclaje combinado permite separar en gran medida los compuestos inorgánicos y generar un preconcentrado rico en plásticos.

Larrain et al [16], estudió la evaluación técnico económica del reciclaje mecánico de residuos de envases de plástico posconsumo desafiantes, centrándose así en la viabilidad económica del reciclaje mecánico de plásticos como el polipropileno, poliestireno, películas de polietileno y poliolefinas mixtas. Se menciona que, en la mayoría de los países europeos, estas fracciones plásticas suelen ser incineradas o depositadas en vertederos, a pesar de que existen

---

tecnologías para reciclarlas mecánicamente. Los resultados resaltan que los incentivos económicos para el reciclaje de envases plásticos dependen principalmente del precio del producto y el rendimiento del mismo.

En Colombia, empresas como Alpina y Carvajal Empaques están liderando la adopción de buenas prácticas de reciclaje, colaborando para introducir material plástico reciclado de poliestireno (PS) en envases de alimentos, incluyendo el producto Mini BonYurt de Alpina, con un contenido de hasta un 30% de material reciclado, lo que representa una innovación en el país. Esta iniciativa no solo promueve la tecnificación de los recicladores, sino también crea una demanda constante de plástico de PS posconsumo, fomentando su reciclaje y uso en envases de alto valor, de modo que, para garantizar la pureza requerida en plástico reciclado para su contacto con alimentos, se emplea una tecnología de ultra-limpieza, así bien, Alpina también se ha comprometido a ser plástico neutral, comprometiéndose a recuperar y transformar la misma cantidad de plástico que introduce en el mercado, y continúa trabajando en estrategias y tecnologías para aprovechar y transformar el plástico de manera más sostenible [17].

### **5.7. Aplicaciones y reutilización de poliestireno reciclado**

El poliestireno reciclado ha ganado importancia en la búsqueda de soluciones sostenibles para abordar los desafíos ambientales relacionados con los plásticos, a medida que la conciencia sobre la gestión de residuos plásticos y la necesidad de reducir la dependencia de recursos no renovables ha aumentado, el poliestireno reciclado ha encontrado diversas aplicaciones y oportunidades de reutilización. Una de las aplicaciones más comunes del poliestireno reciclado es en la fabricación de productos de construcción, como aglutinante en pintura en emulsión, paneles aislantes, bloques y materiales de acabado, su ligereza, capacidad aislante, y durabilidad lo hacen ideal para estos fines; además, se utiliza en la fabricación de productos de consumo, como marcos de cuadros, perchas, bandejas de alimentos y envases [18].

El poliestireno reciclado también ha encontrado un nicho importante en la industria del embalaje, se utiliza en la fabricación de envases para productos electrónicos, juguetes y otros bienes de consumo, lo que demuestra su versatilidad y capacidad para reducir la demanda de

---

plásticos vírgenes, ofreciendo entonces una variedad de aplicaciones y oportunidades de reutilización en diversas industrias, al tiempo que contribuye a mitigar los impactos ambientales asociados con la producción y el desecho de plásticos, su versatilidad y capacidad para reducir los residuos plásticos lo convierten en un material valioso en la búsqueda de soluciones sostenibles, por esta razón Ortiz et al [19], aborda la relevancia de los envases alimentarios y destaca la necesidad de garantizar su seguridad e impacto ambiental, centrándose en analizar la viabilidad del uso de poliestireno (PS) reciclados mecánicamente posconsumo en estos envases.

### **5.8. Casos de economía circular para poliestireno**

La economía circular es una filosofía que busca prolongar la vida útil de materiales y productos, minimizando la generación de residuos. El poliestireno (PS) y el poliestireno expandido (EPS), también conocido como espuma de poliestireno, pueden integrarse en estrategias de economía circular de varias maneras.

Uno de los enfoques clave es el reciclaje de envases de PS, desde vasos desechables hasta bandejas de carne, implementar sistemas de recolección y reciclaje permite recuperar este material para transformarlo en nuevos envases, reduciendo así la necesidad de plástico virgen.

Por otro lado, el reciclaje de EPS, un material utilizado en envases y construcción puede transformarse en productos como marcos de cuadros o bloques de construcción, disminuyendo la cantidad de EPS en vertederos.

La reutilización de envases de alimentos de EPS, como bandejas de comida rápida, es otra opción que prolonga la vida útil de este material y reduce la fabricación de nuevos envases, además, el EPS reciclado se emplea como aislamiento en la construcción, reemplazando materiales convencionales y mejorando la eficiencia energética de los edificios.

El diseño para el desmontaje en productos con PS o EPS facilita la recuperación de componentes plásticos al final de la vida útil del producto; las empresas pueden establecer procesos de reciclaje internos o colaborar con recicladores para reducir los residuos de PS o EPS en sus operaciones; las campañas de educación pública también son fundamentales para aumentar

---

la conciencia sobre la importancia del reciclaje y la reutilización de estos materiales, alentando una participación activa en prácticas de economía circular, por lo tanto se puede decir, que el poliestireno y el poliestireno expandido pueden desempeñar un papel crucial en un enfoque de economía circular, reduciendo residuos, conservando recursos y minimizando el impacto ambiental.

### **5.9. Obstáculos en el reciclaje de poliestireno (PS) en Colombia**

**Complejidad en la recolección y clasificación:** La recolección y clasificación del PS pueden ser complicadas debido a la variedad de formas, colores y tipos de PS utilizados en productos como envases, utensilios de cocina y productos de consumo. Esto dificulta su manejo eficiente en los sistemas de reciclaje.

**Contaminación y pureza del material:** El PS recogido a menudo está contaminado con etiquetas, adhesivos o residuos de alimentos, lo que reduce la pureza del material reciclado. Eliminar estas impurezas puede requerir recursos adicionales y procesos costosos.

**Costos de procesamiento:** El reciclaje del PS suele implicar la trituración, el lavado y la extrusión, que son procesos costosos. Dado que el PS es menos denso que otros plásticos, se necesita una gran cantidad de material recogido para obtener una cantidad significativa de material reciclado.

**Falta de mercado para productos reciclados:** Puede haber una falta de demanda para productos fabricados con PS reciclado en Colombia. Esto puede desalentar la inversión en infraestructura de reciclaje y limitar las oportunidades de mercado para el material reciclado.

**Degradación de calidad:** Cada vez que el PS se recicla, puede experimentar cierta degradación en sus propiedades físicas y mecánicas. Esto limita la cantidad de veces que el PS puede ser reciclado antes de perder sus características originales.

---

## 6. METODOLOGÍA

Este proyecto se enfocó en diagnosticar e implementar estrategias de recolección y valorización de residuos de PS posconsumo y evaluar la calidad del material reciclado a escala piloto industrial. Con el objetivo de promover la circularidad de estos residuos en la industria de empaques para alimentos. Para ello, se dividió en tres etapas, las cuales se describen a continuación.

### 6.1. ETAPA 1. Diagnóstico y Selección de Fuentes de Materiales

Esta etapa consistió en seleccionar un grupo objetivo con el cual trabajar, que representara cada eslabón de la cadena productiva de PS: dueños de marca, fabricantes de empaque, consumidores, asociaciones de reciclaje y transformadores de material reciclado. Una vez seleccionados los representantes de cada eslabón se estableció una mesa de trabajo donde se determinaron los objetivos del piloto para cada una de las partes involucradas. Por otro lado, se seleccionaron las fuentes de los residuos de PS y se diagnosticó la capacidad de la cadena de valor para recuperarlos, identificarlos, separarlos, valorarlos y aprovecharlos. Este diagnóstico consideró a los gestores, transformadores y productores. A continuación, se detalla cada una de las actividades que incluyó esta etapa.

#### 6.1.1. Refinación del estado del arte frente a recuperación y aprovechamiento de los residuos de PS

Se hizo una búsqueda en el estado del arte de diferentes estrategias de aprovechamiento de los residuos de PS. Se acudió a bases de datos de patentes (Acclaim IP), artículos científicos (Scopus y ScienceDirect) y literatura gris.

#### 6.1.2. Selección de fuentes de materiales e identificación de los principales actores en la cadena para la red logística, transformación y aprovechamiento de los residuos de PS

A través de un estudio que abarcó tanto fuentes primarias como secundarias, se procedió a identificar los actores clave de la cadena de valor (gestores, transformadores, productores y

---

dueños de marca). La selección de los actores involucrados se hizo teniendo en cuenta los requisitos técnicos específicos del transformador. Este fue un paso crucial, ya que el transformador no solo posee la tecnología necesaria para la descontaminación del material que se puede reutilizar, sino que también es el responsable de establecer las condiciones que debe cumplir el material recogido. Este enfoque integrado aseguró que se maximice el aprovechamiento de los residuos de PS, alineando el proceso de selección de actores con las capacidades tecnológicas y los estándares de calidad requeridos para la transformación efectiva del material.

### **6.1.3. Visita de Diagnóstico a las empresas involucradas en la cadena de valor**

Se realizó una visita a las empresas involucradas en la cadena de valor identificadas. Previo a las visitas se realizaron entrevistas telefónicas que permitieron recolectar información preliminar y planear el diagnóstico.

## **6.2. ETAPA 2. Implementación de Estrategias para la Circularidad de Residuos**

Esta etapa buscó desarrollar una metodología para la recolección de vasos de yogurt de PS posconsumo, para que sean nuevamente aprovechados como materia prima para fabricar el mismo producto. Para ello, inicialmente se propuso una campaña para recolectar los vasos desde la fuente (consumidores), evitando cualquier tipo de contaminación cruzada que pudiera interferir en el proceso de aprobación del material como materia prima para su uso en empaques para alimentos. No obstante, las cantidades de material acopiadas no fueron suficientes para realizar la prueba piloto industrial en las condiciones que se tenían previsto realizarla. De esta manera el acopio del material se realizó en diferentes fuentes de suministro. A continuación se detalla el proceso de recolección en las diferentes fuentes.

### **6.3. Fuentes de acopio**

El residuo de interés, poliestireno de alto de impacto proveniente de la industria de alimentos fue recolectado en dos tipos de fuentes diferentes:

1. Fuentes de acopio posconsumo controladas
2. Fuentes de acopio posconsumo no controladas

A continuación se detalla cada una de las fuentes:

### **6.3.1. Fuentes de acopio posconsumo controladas**

En los procesos de reciclaje de PS, uno de los primeros aspectos que debe resolverse es aumentar las tasas de recolección y la calidad del flujo de residuos. Está claro que son necesarias más recogidas separadas de residuos y una mejor clasificación. Por lo tanto, para mejorar la capacidad de reciclaje de los vasos de yogurt, específicamente su proceso de acopio se propuso realizarlo directamente en instituciones educativas y unidades residenciales, para garantizar la calidad del flujo de los residuos y evitar la posible contaminación cruzada. Para lograrlo se implementaron medidas diferentes en los diferentes tipos de fuentes. En los colegios se realizaron campañas de recolección de los residuos, invitando a los estudiantes a enjuagar los vasos inmediatamente después de consumir el producto. Esto con el propósito de evitar el mal olor que se genera en los mismos por la proliferación de bacterias.

La campaña invitaba a los niños y profesores a cerrar ciclos, enseñándoles sobre la forma correcta de disponer los residuos y darles una segunda vida a los materiales. Los puntos de acopio se instalaron en las instituciones definidas en la Etapa 1. Se instalaron sitios de almacenamiento para los vasos, financiados por la asociación nacional de empresarios de Colombia (ANDI). La idea fue que los estudiantes enjuagaran los vasos y les retiraran las etiquetas y la lámina de aluminio antes de disponerlos en los contenedores. Para esto se realizaron campañas de sensibilización y la empresa de gestores se encargó de recolectar y enseñarles el manejo de estos residuos.

El personal designado por Arca, empresa gestora del proyecto, realizó visitas periódicas de seguimiento y control en los diferentes colegios con el fin de mejorar la calidad del material recogido. Además, se estableció un calendario para la recolección del material en los puntos de acopio cada dos semanas, o antes si fuera necesario.

---

Después de la recolección en los colegios, el personal de Arca se encargaba de seleccionar los vasos que cumplieran con los criterios establecidos por el transformador (Carvajal), los cuales debían ser productos blancos o transparentes sin ninguna impresión. Esto se debe a que los aditivos utilizados en las tintas fabricadas en Colombia no cuentan con la aprobación de la FDA para el contacto con alimentos, y la tecnología de descontaminación disponible no elimina dichas sustancias. En los colegios, se recogieron todo tipo de vasos de PS con el fin de evitar confusiones entre los usuarios y registrar la tasa de rechazo del material apto para el proceso de reciclaje de grado alimenticio.

En las unidades residenciales, se implementó una metodología de recolección diferente a la de los colegios. Se colocaron contenedores similares a los utilizados en los colegios en los puntos de acopio de residuos de cada unidad. Se enviaron comunicados y diseños gráficos a los residentes a través de las respectivas administraciones, solicitando que separaran los productos de PS de grado alimenticio y los depositaran en los contenedores correspondientes. Además, los recicladores asociados a Arca, encargados de recolectar todos los residuos aprovechables en estos lugares, clasificaban y recogían el material de interés, llevándolo luego a la bodega de Arca donde se completaba el proceso de beneficio, incluyendo la eliminación de etiquetas, láminas de aluminio y un enjuague con agua para evitar la proliferación de bacterias.

La recolección de vasos en la universidad se limitó a la Universidad Eafit de Medellín, debido a su fácil acceso ya que el instituto se encuentra en su propio campus. Inicialmente, se intentó instalar un punto de recolección de vasos cerca de las zonas de comida del campus, acompañado de la publicidad del proyecto, pero desafortunadamente, la publicidad no fue suficiente para incentivar a la comunidad universitaria a depositar selectivamente los vasos de yogur, terminando por depositar todo tipo de residuos sólidos.

Por lo tanto, se decidió acopiar los vasos en el centro de clasificación de residuos sólidos del campus. El personal de la empresa de aseo encargada de gestionar los residuos en Eafit apoyó el proyecto clasificando los vasos de PS blancos y transparentes que se les retira la etiqueta. Posteriormente, el personal del instituto recogía diariamente estos vasos para realizarles el

proceso de eliminación de etiquetas y láminas de aluminio, así como un enjuague con agua para evitar la proliferación de microorganismos.

En la **Tabla 1** se muestra el detalle de las instituciones y las unidades residenciales donde se realizó el acopio controlado de los vasos de yogurt.

**Tabla 1.** Información de los centros de acopio controlados que tuvo el proyecto.

| NOMBRE                            | UBICACIÓN                 | TIPO        |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------|
| Colombohispano                    | Avenida Cavelier          | Colegio     |
| Campo verde                       | Bogotá                    | Colegio     |
| Grandes Personitas                | Calle 23D N° 80B- 52      | Colegio     |
| Fray Francisco Chacon             | Cl. 3 #489                | Colegio     |
| Gimnasio Santa Maria de la Sabana | Cra. 2 #1-2a 1-32         | Colegio     |
| Fundación Casa Vieja              | Cra central del nte Km 26 | Colegio     |
| Pablo Herrera                     | Vereda Chuntame           | Colegio     |
| San Carlos                        | Cl. 192 #9 - 45           | Colegio     |
| Campestre San José                | Cl. 128b #20 - 80         | Colegio     |
| Piedra Luna                       | a 189a-42, Cra 8 #189a-2  | Unidad      |
| Piedra santa                      | Cl 167 #5625              | Unidad      |
| Eafit                             | Carrera 49, Cl. 7 Sur #50 | Universidad |

### 6.3.2. Fuentes de acopio posconsumo no controladas

Este tipo de fuentes, hacen referencia a un punto de recolección donde el material, en este caso el PS al final de su vida útil, se acumula sin estar bajo la gestión formal o regulación de programas de reciclaje. Esto incluye lugares como vertederos no autorizados, áreas de acumulación informal, y otros espacios públicos o privados donde los residuos de poliestireno se recogen sin un control sistemático, en donde a diferencia de las fuentes controladas, que forman parte de sistemas de reciclaje estructurados, las fuentes no controladas presentan retos como inconsistencias en la calidad, limpieza del poliestireno recolectado, variabilidad en los tipos de material, posibilidad de contaminación cruzada y separación efectiva del material, complicando su reintegración efectiva en el ciclo de reciclaje.

---

Teniendo en cuenta lo anterior, se contactaron diversas empresas gestoras ubicadas en Medellín y en el Oriente Antioqueño, especializadas en el reciclaje de residuos sólidos, así como varias empresas dedicadas a la transformación de productos plásticos. Inicialmente, se enfrentó dificultad para reunir la cantidad de material requerido para el proyecto debido a las condiciones específicas que este debía cumplir. Son escasas las empresas que llevan a cabo el proceso de recolección y clasificación de residuos de PS, dado que el mercado es muy específico y su comercialización no es tan sencilla.

Las empresas que realizan una clasificación selectiva por tipo de material suelen agrupar el PS en bolsas o tulas donde se incluyen diversos productos de este material, tales como vasos de yogur, juguetes, vallas publicitarias, envases de lavaplatos, entre otros. Se realizaron acercamientos con estas empresas que permitieron el ingreso de personal del instituto a sus instalaciones para realizar el proceso de selección del material en las condiciones requeridas por el proyecto. De las tulas que contenían PS, se seleccionaron los vasos blancos y transparentes que contaban con etiquetas removibles, las cuales fueron retiradas junto con las láminas de aluminio. Después de esta clasificación, los envases sucios fueron transportados a una planta de reciclaje de plásticos, donde fueron triturados junto con el material recogido de otras fuentes descritas a continuación.

Otra fuente de acopio no controlada de material fue una empresa dedicada a la transformación de plásticos, la cual realiza el proceso completo de reciclaje de diferentes tipos de materiales plásticos, incluyendo el PS. Esta empresa lleva a cabo una clasificación del PS blanco, que comercializa como una referencia especial. Para el proyecto, se adquirió una cantidad de este material beneficiado y se transportó a la planta donde se llevó a cabo el proceso de trituración.

#### **6.4. ETAPA 3. Evaluación del Proceso de Valorización de Residuos**

Esta etapa consistió en evaluar el proceso de reciclaje mecánico aplicado para la valorización de residuos provenientes de vasos de poliestireno (PS) posconsumo, que realizó la empresa transformadora. Específicamente esta etapa se centró en los residuos acopiados en la Etapa 2. A continuación, se describen las actividades realizadas.

#### **6.4.1. Proceso de molienda, lavado y secado del material en el laboratorio del ICIPC**

El material recopilado en la Universidad Eafit fue sometido a un proceso de trituración y lavado a escala de laboratorio, debido a la cantidad reducida de material recopilado y con el fin de mantener la trazabilidad.

#### **6.4.2. Proceso de molienda, lavado y secado del material en la planta de Ecopositiva**

El material proveniente de fuentes no controladas fue triturado. Las escamas sucias resultantes fueron enviadas a la planta de Ecopositiva para el proceso de lavado. Este proceso se llevó a cabo utilizando una solución compuesta por agua (92%), trietanolamina como tensoactivo (5%) y lauril éter como espumante (3%), mantenida a una temperatura entre 80-100°C. Las escamas fueron sometidas a un proceso de agitación durante 7-10 minutos, seguido de un enjuague con agua limpia a temperatura ambiente y un proceso de secado mediante centrifugado.

Por otro lado, el material recopilado por Arca fue compactado y enviado a la planta de Ecopositiva para su posterior trituración, lavado y secado.

#### **6.4.3. Proceso de obtención de los vasos en la planta de Carvajal Empaques**

#### **6.4.4. Caracterización de las muestras en escamas**

Después del proceso de trituración, lavado en caliente y secado de las escamas provenientes de las dos fuentes estudiadas, se procedió a su caracterización.

- **Determinación del perfil cromatográfico de contaminantes (GC-MS)**

Se empleó la técnica de cromatografía de gases acoplada con Head Space (GC-HS) para identificar posibles elementos volátiles presentes en las muestras. Se utilizó un cromatógrafo de gases Hewlett Packard 6890 1.1 acoplado a un detector selectivo de masas Hewlett Packard 5973. La muestra fue calentada a 110°C durante 15 minutos en el Head Space, y los elementos volátiles fueron inyectados en el cromatógrafo para su identificación.

- **Caracterización térmica y analítica**

---

Con el propósito de identificar posibles mezclas de materiales, así como las temperaturas de fusión, cristalización y transición vítrea, a las muestras se les realizó un ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) siguiendo el método de ensayo estándar para temperaturas de transición y entalpías de fusión y cristalización de polímeros basados en la norma ASTM D3418–15. Este ensayo es fundamental para definir criterios de procesamiento y posibles aplicaciones, así como la composición cualitativa de la muestra. Para el ensayo se usan entre 10 y 15 mg de muestra que se colocan en cápsulas de aluminio herméticamente selladas, se realiza un primer calentamiento de borrado térmico, seguido de un enfriamiento, acompañado de un segundo ciclo de calentamiento para determinar las temperaturas de transición. Los calentamientos se realizaron a  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y las temperaturas iniciales y finales de cada ciclo se determinan dependiendo del material o muestra a analizar. La atmósfera del ensayo se mantuvo con nitrógeno al 99.995% a una tasa de 50 ml/min. Los ensayos se realizaron en un calorímetro diferencial de barrido con calentamiento modulado MDSC Q200, marca TA Instruments.

Para cuantificar el contenido de cenizas y material no polimérico presente en las muestras (cargas, aditivos volátiles, entre otros) se realizó un análisis de composición por termogravimetría (TGA), de acuerdo con la norma ASTM E1131-20. Alrededor de 15 mg de muestra se calentó en una cápsula de platino a una velocidad de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , en una atmósfera de nitrógeno entre 0 y  $560^{\circ}\text{C}$  y en una de oxígeno entre  $560$  y  $900^{\circ}\text{C}$ . Los ensayos se realizaron en un analizador Termogravimétrico, TGA Q500, marca TA Instruments.

La identificación de los polímeros presentes en las muestras se realizó mediante espectrometría infrarroja (FTIR) de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM E1252-98 (2013). Práctica estándar por técnicas generales para la obtención de espectros infrarrojos para el análisis cualitativo. Se empleó una fuente infrarroja, con frecuencia láser  $15798.2\text{ cm}^{-1}$ , con un detector DTGS KBr, una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$  y la técnica de transmisión. Los ensayos se realizaron en un espectrofotómetro Infrarrojo Perkin Elmer, modelo SpectrumTwo.

- **Caracterización reológica**

---

La medición del índice de fluidez - MFI es un parámetro de gran relevancia en los materiales, siendo una de las propiedades que más se referencia en las fichas técnicas. El ensayo se realiza haciendo fluir el polímero caliente a una temperatura establecida por norma, a través de un capilar. El material es empujado por un pistón que es accionado por una carga constante, también definida por norma. Los parámetros de masa y temperatura empleados para determinarlo en cada muestra se listan en la sección de resultados. Los ensayos se realizaron en un equipo de medición de índice de fluidez marca Göttfert, modelo MP – E, siguiendo la norma ASTM D1238-13. Se reporta la masa que fluye a través del capilar en 10 minutos y por eso las unidades de esta propiedad son g/10 min.

- **Caracterización mecánica**

Para la caracterización mecánica de las muestras se realizó la determinación de la curva esfuerzo-deformación, utilizando una máquina universal de ensayos, marca Zwick / Roell BZ1-MM14550.ZW02, con un sensor óptico acoplado que actúa como extensómetro de la firma Zwick identificado como BTC–ExVideo: 006 serie 821271/10. Los ensayos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D638, a  $22.5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura,  $45.2\% \pm 5\%$  de humedad relativa, velocidad de 5 mm/min para módulo elástico y velocidad de 50 mm/min para resistencia y elongación.

Por otro lado, se determinó la resistencia al Impacto Izod con muesca de acuerdo a la norma ISO 180, con una capacidad del péndulo de 1.0 J, masa de 0.17 kg, longitud de 330 mm, velocidad de impacto de 3.5 m/s y un ángulo de caída  $147.96^{\circ}$ . Los ensayos se realizaron en un Péndulo de impacto de la firma Zwick/Roell, Modelo BPI-5.5 COMC.

- **Caracterización física**

Se realizó la medición de la densidad de empaque a las muestras de acuerdo a la norma bajo la norma ISO 60-1977. Esta última es importante para determinar las condiciones de alimentación de las escamas en la extrusora.

#### 6.4.5. Caracterización del producto terminado

Durante el desarrollo del proyecto y dentro del alcance del mismo, no se llevaron a cabo pruebas de caracterización al producto terminado. Sin embargo, la realización de estas pruebas formará parte de la continuación del proyecto. Este paso es esencial para avanzar hacia la obtención de la aprobación por parte de INVIMA, asegurando que el material reciclado cumple con todos los requisitos y normativas aplicables para su uso en contacto con alimentos. La caracterización del producto terminado permitirá evaluar de manera integral las propiedades y la seguridad del poliestireno reciclado, contribuyendo significativamente a los esfuerzos por cerrar el ciclo de vida de este material de manera sostenible y segura.

A los nuevos vasos obtenidos a partir de la materia prima valorizada, se les realizará las siguientes pruebas en el laboratorio para determinar que cumplan con los requerimientos exigidos por el Invima para uso en contacto con alimentos.

- **Ensayo de migración global por llenado**

La migración global permite determinar el cumplimiento de las exigencias de inocuidad de los materiales para las aplicaciones que tienen requerimientos relacionados con polímeros en contacto con alimentos. La migración se mide por llenado de los vasos con agua destilada durante 10 días a  $40^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ . La norma utilizada es la NTC 5022-14:2010.

De acuerdo al **Artículo 7o. de la Resolución 4143 de 2012 del INVIMA**, los materiales, objetos, envases y equipamientos plásticos que entren en contacto con los alimentos, no deben ceder a estas sustancias en cantidades superiores al límite máximo para la migración global establecido de 50 mg de componentes liberados por kilogramo de alimento o simulante (50 mg/kg) u 8 mg por decímetro cuadrado de área superficial en contacto (8 mg/dm<sup>2</sup>).

- **Prueba de cromatografía de gases acoplado con el Head Space (GC-HS)**

para tratar de identificar posibles elementos volátiles presentes en la muestra. En esta técnica una porción de cada muestra es calentada en el Head Space a una temperatura de 110°C

---

por 15 min para luego los elementos volátiles que se encuentren en el Head Space son inyectados en el cromatógrafo para su identificación.

---

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1. ETAPA 1. Diagnóstico y Selección de Fuentes de Materiales

Esta etapa tuvo como objetivo analizar la cadena de valor de los residuos de Poliestireno (PS) para identificar oportunidades de mejora y maximizar el valor de estos materiales en su ciclo de vida. Se llevaron a cabo entrevistas con actores clave de la industria para comprender mejor el flujo de estos residuos desde su generación hasta su disposición final.

#### 7.1.1. Selección de fuentes de materiales e identificación de los principales actores en la cadena para la red logística, transformación y aprovechamiento de los residuos de PS

Actualmente en Colombia el PS de alto impacto recuperado de fuentes posconsumo, es el segundo material que cuenta con aprobación INVIMA para su uso en la producción de envases en contacto con alimentos. No obstante, el desarrollo de su cadena de valor aún es incipiente, dado el riguroso control que se debe tener en la fuente de suministro de este material. De allí se deriva la importancia de desarrollar fuentes del residuo que permitan verificar su trazabilidad durante todo el proceso de beneficio.

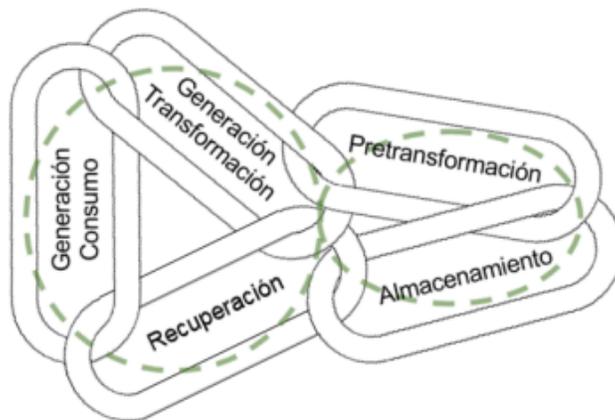
Acorde a la entrevista realizada a la Asociación de Recicladores de Cajicá (ARCA) y a otras asociaciones de reciclaje, en la actualidad no se están recogiendo los vasos de yogur de PS pues no se tiene demanda de este material. Tienen la capacidad de recoger y separar este material en fuentes controladas y trazables. Ellos pueden realizar la separación de la etiqueta y la tapa de aluminio. Los vasos que tienen dificultades para retirar la etiqueta y sean impresos son descartados. Buenas prácticas de ecodiseño ayudarían a que se aprovechen muchos más vasos.

Por otro lado, la fuente de material que aprovecha Carvajal Empaques para la línea de productos que fabrica a partir de materia prima reciclada es una fuente de posconsumo muy específica. Se trata de los vasos de yogur provenientes de las devoluciones de los establecimientos comerciales por vencimiento del producto.

#### **Cadena de valor del reciclaje de poliestireno alto impacto**

La cadena de valor consiste en una serie de etapas productivas y servicios diseñados para recopilar, vender y procesar materias primas obtenidas a partir de residuos de otras cadenas de producción o desechos posconsumo. En el contexto del reciclaje de PS, se ha identificado una cadena de valor que busca desarrollar una fuente de recolección de material posconsumo controlada que permita su reciclaje y posterior uso como materia prima para obtener nuevos envases en contacto con alimentos. Avanzando hacia el enfoque circular que transforma el plástico reciclado en un modelo sostenible.

En la **Figura 1** se muestran los cinco componentes de la cadena de valor del proceso de reciclaje de plástico en Colombia, [20]. La cadena de valor del reciclaje de plástico se origina a partir de dos fuentes de generación: los consumidores y los transformadores. Estos actores generan residuos sólidos denominados posconsumo y posindustrial, respectivamente. Cabe destacar que los transformadores son también responsables de poner en circulación los plásticos para su consumo. La etapa de recuperación, almacenamiento y pretransformación desempeña un papel fundamental en la creación de un modelo circular que permite aprovechar al máximo el ciclo de vida de los plásticos.



**Figura 1.** Cadena de valor en el reciclaje del plástico [20].

Las etapas dentro de la cadena de valor se describen de la siguiente manera:

#### **Eslabón 1: Generación de residuos**

La generación de residuos marca el inicio del proceso de reciclaje. Implica el uso de productos, como envases y componentes adicionales, que no son totalmente utilizados por los consumidores y que pueden o no ser aprovechables. Esta etapa se origina a partir de dos fuentes principales: residuos posconsumo y residuos posindustriales.

### **Eslabón 2: Recuperación de residuos**

La recuperación de residuos involucra actividades como la separación y el transporte, que pueden ser llevadas a cabo por recicladores informales, organizaciones dedicadas al reciclaje o empresas privadas. La separación puede ser particularmente desafiante en el caso de residuos posconsumo debido a posibles contaminantes y residuos orgánicos que dificultan su reutilización o transformación, mientras que los residuos posindustriales suelen estar más limpios y separados. El transporte hacia los centros de acopio es responsabilidad de los separadores, que utilizan diversos medios como sacos, carretillas o vehículos motorizados.

### **Eslabón 3: Almacenamiento**

El almacenamiento se realiza en centros de acopio, estaciones de clasificación y aprovechamiento (conocidas como ECA) o chatarrerías. En estos lugares, se lleva a cabo una nueva ronda de separación para clasificar, pesar, empacar y luego enviar los materiales a las instalaciones de almacenamiento. Cuando la cantidad alcanza un nivel comercializable, se vende a las empresas transformadoras, lo que suele requerir el uso de camiones debido a la gran cantidad de residuos.

### **Eslabón 4: Pretransformación**

El proceso de pretransformación se enfoca en limpiar y, en algunos casos, purificar parcialmente los materiales. Luego se realizan actividades de procesamiento del plástico, como molido, aglutinado o peletizado, con el fin de reempacarlos y comercializarlos como materia prima secundaria para las industrias manufactureras. Estos materiales se venden a las empresas transformadoras y son transportados en camiones.

---

### **Eslabón 5: Transformación**

La transformación tiene lugar en las empresas convencionales que producen artículos de plástico para consumo. Estas empresas reintroducen el plástico reciclado en la cadena de valor del plástico. Si bien este es el último eslabón de la cadena de valor del reciclaje, también está vinculado al eslabón 1, lo que destaca el enfoque circular del proceso de reciclaje de plástico.

Cuando se habla de reciclaje de materiales posconsumo o posindustrial para contacto con alimentos hay varios desafíos que deben ser superados para poder lograr su reincorporación en esta aplicación. Si bien es cierto la cadena de valor que se describió anteriormente es aplicable a este tipo de reciclaje, el control de la fuente de la materia prima aprovechable es clave para alcanzar la descontaminación del material grado alimenticio, pues se debe evitar una posible contaminación cruzada.

### **Actores en la cadena de valor del reciclaje de vasos de yogur de poliestireno**

En cada uno de los eslabones de la cadena de valor, participan diversos actores responsables de facilitar el desarrollo del proceso. La presencia y contribución de estos actores es esencial para la implementación exitosa del modelo circular de reciclaje de plástico. A continuación, se describe cada uno de los actores involucrados en la fuente de vasos de yogur provenientes de instituciones educativas.

#### **1. Generadores de residuos o dueños de marca**

Este actor es referido a las empresas que comercializan sus productos en los vasos de PS. Las empresas vinculadas al proyecto como marcas son Alpina y Alquería. Su rol en el proyecto es más como observador y parte interesada en los resultados obtenidos. A continuación se listan las principales responsabilidades que tiene este actor en el marco del proyecto.

- Comunicar al consumidor la necesidad de retornar el envase y cómo hacerlo.
- Permitir un diseño de envase intuitivo con una buena experiencia para el usuario que permita la correcta disposición del envase por parte del consumidor.

- 
- Impulsar publicidad y redes sociales para comunicar a los consumidores los avances del proyecto.
  - Diseñar un empaque que facilite el cierre de ciclo, incorporando estrategias de ecodiseño, como: No pigmentar el material, usar etiquetas removibles, diseñar la geometría del envase para facilitar su manipulación haciéndola eficiente.
  - Etiquetar la información de identificación del material del envase e incluir recomendaciones de disposición al usuario.

## **2. Gestores**

Este actor es referido a empresas que se dedican a la recolección y acopio de los vasos de yogur. La empresa vinculada al proyecto como gestor es la ASOCIACIÓN DE RECICLADORES DE CAJICÁ (ARCA). A continuación se listan las principales responsabilidades que tiene este actor en el marco del proyecto.

- Implementación de los puntos de acopio en los colegios seleccionados, a través de campañas de sensibilización y capacitación a la comunidad educativa.
- Monitoreo constante en los puntos de recolección de los vasos, preservando la inocuidad de los mismos en todo el proceso logístico.
- Almacenar, clasificar y transportar los vasos hasta la planta de Ecopositiva.

## **3. Transformadores**

Este actor es referido a empresas que se encargan de valorizar los residuos acopiados y producir materia prima reciclada apta para la producción de nuevos productos. La empresa vinculada al proyecto como transformador es Carvajal Empaques, quien cuenta con aprobación INVIMA para la producción de envases con incorporación de residuos posconsumo de PS. Carvajal trabaja de la mano de Ecopositiva en el proceso de descontaminación y valorización de los residuos de vasos de PS. A continuación se listan las principales responsabilidades que tiene Ecopositiva y Carvajal en el marco del proyecto.

### **1. Ecopositiva**

- 
- Recepción de los vasos de yogur
  - Trituración y lavado de los vasos de yogur de acuerdo a los lineamientos desarrollados con Carvajal Empaques previamente.
  - Garantizar las condiciones de calidad del producto para que sea apto para su reproceso, evitando una posible contaminación cruzada.
  - Entrega del producto a Carvajal.

## **2. Carvajal Empaques**

- Recibir el producto que le entrega Ecopositiva.
- Aplicar tecnologías de super limpieza y descontaminación al material que le entrega Ecopositiva, asegurando cumplir con los estándares de calidad químicos y físicos exigidos por el INVIMA.
- Establecer una ficha técnica de rPS y garantizar sus propiedades lote a lote.

## **4. Productores**

Este actor es referido a empresas que producen empaques con la materia prima reciclada. La empresa vinculada al proyecto como productor es Carvajal Empaques, quien además de producir la materia prima reciclada con aprobación INVIMA, produce nuevos vasos de yogur. A continuación se listan sus principales responsabilidades como productor en el marco del proyecto.

- Fabricar el envase de yogurt de PS posconsumo con las características de inocuidad y calidad requeridas por las marcas.
- Desarrollar las formulaciones de las mezclas de materia prima virgen y reciclada para obtener nuevos vasos de yogur.

### **7.1.2. Visita de Diagnóstico a las empresas involucradas en la cadena de valor**

En esta sección se presenta la información recolectada acerca de las empresas involucradas en el proceso de valorización de los residuos de PS, con respecto a los procesos y tecnologías de recuperación del residuo de interés. Se describen las operaciones que se realizan en la planta, desde el ingreso de la materia prima hasta el despacho del material, así como los equipos que

---

poseen y posibles inconvenientes presentados en el proceso. Además, se resaltan las experiencias previas que tiene cada empresa con respecto al reciclaje del residuo de interés.

#### **7.1.2.1. Asociación de Recicladores de Cajicá (ARCA)**

ARCA, con personería jurídica bajo la forma de asociación de carácter privado, sin ánimo de lucro. Tiene como fin mejorar la calidad de vida de las personas naturales, recicladores de oficio del municipio de Cajicá que aceptan los objetivos y los estatutos reglamentarios de la asociación haciendo parte de esto y las acciones que promueven el aprovechamiento de los materiales reciclables y/o aprovechables del municipio, bajo las respectivas entidades de control y vigilancia y la observancia de la Ley [21]. Prestan servicio en 3 municipios: Cajicá, Tabio y Tenjo, en las rutas establecidas, viviendas, comercio y conjuntos residenciales.

En 2012 la asociación inició con 17 recicladores asociados y actualmente son 76. Arca está comprometida con dignificar la labor de sus asociados y busca mejorar su calidad de vida. Desde hace 6 años se inició con el proceso de bancarización y pago quincenal a los recicladores, desde entonces no ha sido fácil pero sí muy gratificante, expresa su actual gerente Nidia Salamanca. En su portafolio de servicios se encuentra:

- **Gestión integral de residuos sólidos aprovechables.** Su capacidad técnica y operativa les permite recolectar, transportar, clasificar y entregar para la disposición final dichos residuos. Se especializan en el manejo y aprovechamiento de residuos sólidos reciclables de la industria y de usuarios residenciales.
- **Aprovechamiento del servicio público de aseo.** ARCA realiza la recolección, transporte, clasificación y pesaje de los residuos sólidos aprovechables entregados en rutas selectivas de residuos, en el servicio público de aseo. Estas rutas selectivas llegan a usuarios de conjuntos residenciales, usuarios comerciales, parques empresariales, usuarios institucionales, entidades públicas, entre otros.
- **Compra de materiales aprovechables.** ARCA compra residuos aprovechables a cualquier tipo de industria y empresa, fortaleciendo la economía circular y la

---

sostenibilidad de los programas ambientales de cada compañía. Los principales materiales comercializados son: cartón, plegadiza, archivo, envases de polietileno tereftalato (PET), periódico, aluminio, chatarra, plástico soplado, bolsa de polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE), polyboard, Tetra Pak, aceite vegetal usado de cocina, entre otros.

- **Servicios ambientales.** ARCA fórmula y/o ejecuta diferentes planes de gestión ambiental. También presta el servicio de capacitaciones ambientales, sobre el manejo de separación en la fuente, basados en las normas.

### **Descripción de la operación del gestor. Plantas, proceso y productos**

Para los procesos de recolección, separación (manual), compactación y envío, ARCA cuenta con camiones, operarios, embaladoras, montacargas y compactadoras. En la empresa no existen procesos de lavado, aglutinado o peletizado. Por otra parte, los procesos no están estandarizados.

Actualmente, los residuos de poliestireno que se aprovechan son los de poliestireno expandido proveniente de electrodomésticos. Los vasos de yogur los desechan de su flujo de aprovechamiento por no tener un mercado desarrollado.

Los recicladores asociados disponen de un espacio en la bodega para almacenar y clasificar allí sus productos un día a la semana. Es decir, que ARCA recibe el material clasificado por tipo de material y lo almacena para cumplir con los pedidos de sus clientes.

### **Control de calidad del material**

En ARCA los controles de calidad son visuales y basados en la experiencia de los recicladores, y se da en la recepción del material su clasificación y compactación, y está a cargo del líder de bodega.

De cara al proyecto, Ecopositiva fue el responsable de los procesos de lavado, limpieza y secado del material que es recogido por los gestores, quienes tienen la responsabilidad de

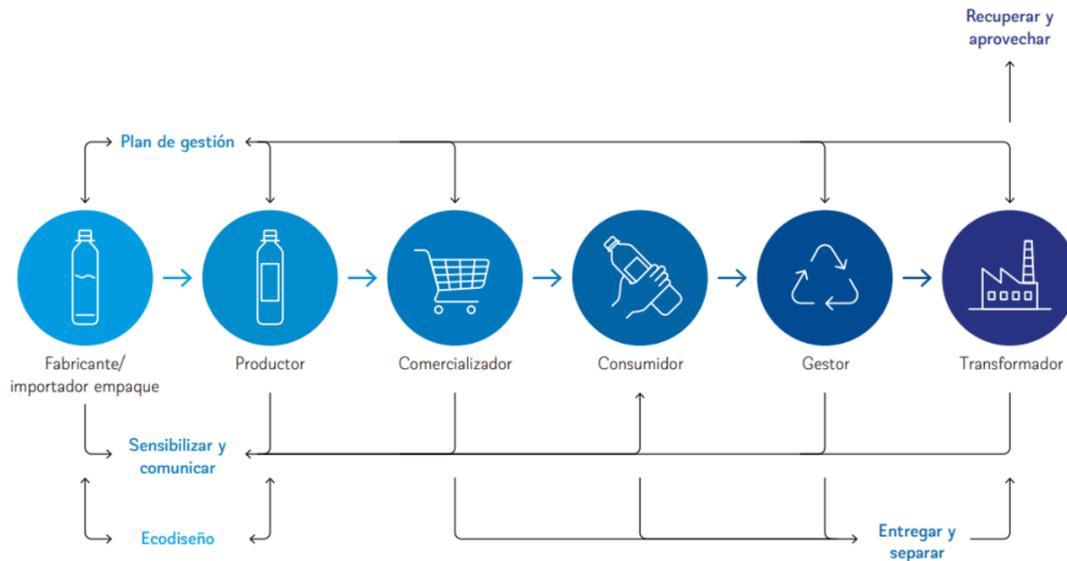
---

incentivar la recolección selectiva de los vasos de yogur en los puntos específicos dispuestos en algunos colegios, así como clasificar, separar y custodiar la corriente de material de tal manera que se mantenga dentro de los requerimientos de calidad e inocuidad necesarios para el proyecto.

### **Personal clave e información relacionada al esquema REP**

Entre el personal clave se encuentran: jefes de ruta, conductores y ayudantes, coordinadores logísticos, jefes de planta y el gerente, siendo los más críticos para el proyecto todo el personal operativo responsable en el día a día de la sensibilización con la comunidad educativa, acopio, identificación, separación y custodia del material de interés.

ARCA dentro del esquema REP tiene el rol de gestor de acuerdo con la **Figura 2**. Su labor en la gestión ambiental de residuos de envases y empaques, está enmarcada en la Resolución 1407 del 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [22]. ARCA realiza campañas en más de 20 conjuntos residenciales para recolectar directamente de consumidores finales los residuos de envases y empaques y participa en diferentes proyectos con colegios públicos patrocinados por marcas como Alquería, aprovechando el material que se acopia en los colegios, como archivo, botellas de PET, entre otros. Esta experiencia le ha permitido a ARCA interactuar de cerca con la comunidad institucional y esto ha beneficiado el proyecto, pues ya son reconocidos en la localidad por ser líderes en proyectos ambientales y de capacitación con la comunidad. La empresa cuenta con línea directa de venta de los residuos a fábricas transformadoras, lo que permite una mayor eficiencia en los procesos de certificación de los residuos efectivamente aprovechados.



**Figura 2.** Esquema REP en envases y empaques en Colombia.

### **Fortalezas de la entidad dentro de la cadena de recuperación del residuo de interés**

Importante labor comercial que le permite acceder a nuevas fuentes de generación de materiales de la industria o comercio, lo que permite mayor estabilidad en cuanto a la disponibilidad de la fuente de material.

Mayor formalidad e infraestructura con respecto a algunas asociaciones de recicladores que suministran material

La formación de alianzas estratégicas con empresas de aseo y entidades gubernamentales como la alcaldía de Cajicá, que hacen parte de la cadena de valor. El objetivo de estas alianzas es contribuir significativamente a los índices de aprovechamiento de residuos sólidos del sector.

### **Brechas tecnológicas y de conocimiento de la entidad dentro de la cadena de recuperación del residuo de interés**

Debido a la naturaleza manual de los procesos de selección y separación de materiales, es deseable profundizar en los conocimientos en cuestión de la correcta identificación de residuos

---

sólidos, transformación de estos materiales, y pruebas de caracterización e identificación ágil y rápida que les ayude a mejorar su producto final.

La calidad e idoneidad del material recuperado para el propósito del proyecto depende de contar con una fuente apropiada y constante así como de la capacidad de identificar, separar y resguardar el material de manera adecuada para poder alcanzar su certificación para uso en contacto con alimentos.

Proceso de prelavado del residuo de interés en los puntos de acopio, lo cuál aumenta su nivel de inocuidad y prolonga su aprovechabilidad.

### **Recomendación de oportunidades de aprovechamiento y reincorporación del residuo de interés**

Se sugiere evaluar la posibilidad de implementar un proceso de prelavado de los vasos de yogur proveniente de los colegios que puedan estar contaminados de residuos de yogur en la bodega de ARCA, con el propósito de entregarlos en mejores condiciones a Ecopositiva.

Es recomendable identificar muy bien posibles rutas en las que se recoge material pos consumo doméstico para evaluar la trazabilidad y calidad del material proveniente de esa fuente contaminaciones cruzadas, o en su defecto asegurar al interior del transporte esquemas de separación física que evite posibles contaminaciones del material de interés..

Es recomendable desarrollar algunas pruebas de identificación rápidas “In Situ” de materiales, para aquellos casos en los que se tengan dudas de la naturaleza de los materiales que se recogen.

Es recomendable implementar tableros visuales que representen los materiales y las fuentes más idóneas para la aplicación, visibles durante los procesos de beneficio de los materiales para todas aquellas personas que realizan dicha labor.

Evaluar la posibilidad de desarrollar protocolos específicos de separación de materiales para contacto con alimentos y validar los conocimientos de las personas que realizan dicha labor

---

mediante procesos de “certificación” en conocimientos fundamentales para el manejo de materiales en contacto con alimentos, situación que permitirá elevar el nivel de formación, experiencia e idoneidad del personal que realiza la labor.

#### **7.1.2.2. Ecopositiva S.A.S**

Ecopositiva S.A.S. es una empresa dedicada a la gestión de residuos sólidos (metales, madera, papel, plástico), dentro de los cuales, se destacan varios polímeros de uso común como lo son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el tereftalato de polietileno (PET) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Normalmente, reciben la materia prima ya separada. Las fuentes principales de los residuos que son tratados en la empresa son pos-industrial proveniente de empresas privadas o pos-consumo proveniente de entes recicladores privados. Cada tipo de material está ubicado en una zona respectiva de la planta y son procesados de acuerdo con una programación establecida de producción.

En algún momento intentaron trabajar con recicladores de calle, pero debido a problemas con la incorrecta separación e inconvenientes financieros, decidieron no seguir recibiendo residuos de esta fuente.

#### **Ingreso de materia prima y almacenamiento**

Ecopositiva S.A.S. es una empresa que recicla plástico posindustrial. Cuenta con personal propio en cada uno de sus proveedores, que se encarga de seleccionar y limpiar el material antes de enviarlo a la planta de procesamiento. Esto permite que el material llegue a la planta clasificado y limpio en un 90%.

Una vez en la planta, el material se clasifica de acuerdo con su tipo y se almacena en su lugar correspondiente. La empresa tiene la capacidad de recolectar y almacenar 12,800 toneladas de material al mes, y puede procesar 2,069 toneladas al mes.

Ecopositiva S.A.S. recibe dos tipos de material:

**Material plástico posindustrial**, como preformas defectuosas provenientes de procesos de inyección. Este material se clasifica por color antes de ser procesado.

**Materiales como bolsas o películas**, principalmente de clientes que desean la destrucción controlada de sus residuos defectuosos. Esta destrucción se conoce como "destrucción de marca" y se realiza para evitar que el material sea utilizado por terceros o para ingeniería inversa.

El material normalmente llega en "big bags" a granel. Dado que Ecopositiva S.A.S. tiene un previo conocimiento del tipo de material que llega en cada envío, no se realiza un control de calidad exhaustivo para el ingreso de materias primas. Sin embargo, se realiza una inspección inicial cuando el material proviene de una empresa con la que no cuenta con personal propio.

La única separación que se realiza a un lote de material que ingresa a la planta sucede cuando el cliente previamente hace el aviso de que el material no viene completamente clasificado. En este caso, Ecopositiva S.A.S. realiza la separación correspondiente, pero a cambio de un menor monto de dinero.

### **Proceso productivo**

La planta de Ecopositiva S.A.S. se encuentra en una bodega de 3,000 metros cuadrados con techo alto y grandes ventanales. En un extremo de la bodega hay dos entradas para camiones, donde se pesa el material que ingresa. En el otro extremo hay dos salidas, donde se pesa el material que sale.

El proceso de reciclaje de la empresa consta de tres etapas:

**Reducción de tamaño:** El material se tritura con molinos.

**Reducción de volumen:** El material triturado se aglutina para reducir su volumen.

**Pelletización:** El material aglutinado se convierte en gránulos con una extrusora.

El tipo de proceso que se aplica depende de las necesidades del cliente. El material puede ser molido, aglutinado o ambos. La peletización se realiza con un tercero que posee una extrusora.

Ecopositiva S.A.S. tiene dos molinos en su planta principal. Además, la empresa tiene molinos en algunos de los centros de acopio de sus proveedores. Esto permite que el material se triture en el lugar donde se genera, lo que reduce el costo del transporte.

La empresa también tiene una aglutinadora vertical. Esta máquina transporta el material triturado hasta cierto nivel y lo deja caer en una tolva. Luego, una prensa empuja el material para obtener un bloque aglutinado.

Ecopositiva S.A.S. también tiene compactadoras en los centros de acopio de sus proveedores. Estas máquinas comprimen el material aglutinado para reducir aún más su volumen.

El producto final se entrega a los clientes en sacos o big bags.

La empresa ha identificado algunos problemas relacionados con la productividad en los casos en los que se debe realizar una separación de los materiales en la planta. Si el material está contaminado con grapas u otros objetos metálicos, se debe extender el tiempo de procesamiento para removerlos. En casos muy complejos, el material se destina a relleno sanitario o incineración.

### **Información referente a poliestireno**

Se reciben láminas termoformadas provenientes de la industria cosmética pos comercial, las cuales ingresan directamente al proceso de molienda y dado su procedencia no se requiere un proceso de lavado. Debido al bajo espesor de las láminas estas deben ser aglutinadas para aumentar su densidad y no afectar el proceso de peletización realizado en la planta de Carvajal.

### **Otra información**

---

La empresa cuenta con buenas prácticas de manufactura y todos los elementos de protección personal requeridos.

Además, tiene la intención principal de recibir el material proveniente del gestor y realizar el respectivo proceso de valorización. También menciona su interés por recuperar PE, PP, ABS, PS y PET, los cuales son materiales que maneja diariamente en su planta de producción.

Dentro del personal clave para el desarrollo del proyecto, se encuentran Arturo Rojas, Director Comercial y Especialista en residuos - Valentina Sánchez, Auxiliar ambiental y Estudiante de Ingeniería Ambiental - Giovanni Lesmes, Coordinador HSEQ, Profesional en administración y gestión ambiental de Ecopositiva S.A.S. Este personal mencionado y otro personal de la planta de recuperación de residuos desean profundizar sus conocimientos en separación de residuos, transformación de estos materiales, y pruebas de caracterización fisicoquímicas.

La empresa actualmente no cuenta con lineamientos para el tratamiento de agua y aire después de la limpieza del residuo, ni tampoco tienen generación de algún desecho peligroso que pueda ser potencialmente dañino para el ambiente o personal de trabajo.

La empresa actualmente se encuentra inscrita ante la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) como transformadora de residuos plásticos dentro del programa de Responsabilidad Extendida del Productor bajo la resolución 1407 de 2018 y 1342 de 2020, con el fin de darle un cierre de ciclo a los materiales plásticos recolectados, minimizando la generación de los impactos negativos al medio ambiente.

Dentro de los casos de éxito que ha logrado la empresa en reciclaje, se destaca la elaboración de estibas a partir de láminas de cartón.

A futuro, la empresa desea implementar un sistema de “containers” móviles con los equipos necesarios para realizar la destrucción específica del material de sus clientes.

**Fortalezas de la empresa dentro de la cadena de recuperación del residuo de interés**

---

Gracias a las instalaciones de personal y/o equipos que tiene Ecopositiva S.A.S. en la mayoría de sus proveedores, la operación de clasificación y procesamiento (molido o aglutinado) es bastante limpia y fácil de estandarizar.

Capacidad de operar con menores costos de logística en la cadena de valor gracias al personal y/o equipos “in house” que provee a sus proveedores.

La empresa posee la infraestructura y los recursos suficientes para capacitar e instalar personal y/o equipos de recuperación de material reciclado en las plantas que lo requieran y sean fuentes de estos residuos.

Capacidad de aseguramiento del tamaño de material dados los equipos de molienda que poseen actualmente.

Relación existente con la empresa Carvajal, para el procesamiento del residuo de interés, lo cual le otorga experiencia acerca de los requerimientos del material que debe ser entregado.

### **Brechas tecnológicas y de conocimiento de la empresa dentro de la cadena de recuperación del residuo de interés**

Debido a que el material de interés, al llegar a la planta trae consigo posibles residuos se debe realizar el respectivo lavado del material, asegurando que las sustancias empleadas en el proceso de lavado cuenten con aprobación para material para contacto con alimentos. Actualmente todo el material que ingresa proviene de la industria de cosméticos y es poscomercial.

Debido a que en el momento no hay una aplicación específica para los vasos de yogur, el producto se termina desechando para rellenos sanitarios.

No se cuenta con un proceso de lavado especializado para material que va para contacto con alimento. No obstante, si se cuenta con infraestructura de lavado.

### 7.1.2.3. Carvajal Empaques S.A

Carvajal Empaques S.A es una empresa colombiana filial de Carvajal S.A dedicada a la fabricación de empaques para productos de consumo masivo. Fundada en 1956, es una de las empresas líderes en el mercado colombiano en los sectores de empaques, pulpa y papel, artículos escolares y muebles de oficina, con presencia en Colombia, Perú, México, Estados Unidos y Centroamérica y Caribe. La empresa tiene su sede en Bogotá, Colombia.

La empresa tiene un portafolio amplio de productos, que incluye empaques de cartón, plástico, aluminio y vidrio. Sus productos se utilizan en una variedad de industrias, como alimentos, bebidas, cuidado personal, aseo del hogar y farmacéuticos.

Carvajal Empaques atiende a un mercado diverso de clientes, que incluye empresas multinacionales, empresas locales y pequeñas empresas. La empresa se enfoca en proporcionar soluciones de empaques personalizadas que satisfagan las necesidades específicas de sus clientes.

El portafolio de productos de Carvajal Empaques incluye una amplia gama de empaques, que incluyen:

**Empaques de cartón:** cajas, bandejas, envases, etc.

**Empaques de plástico:** botellas, bolsas, bandejas, etc.

**Empaques de aluminio:** latas, bandejas, etc.

**Empaques de vidrio:** frascos, botellas, etc.

Carvajal Empaques está comprometida con la sostenibilidad. La empresa ha desarrollado una serie de iniciativas para reducir su impacto ambiental, incluyendo el uso de materiales reciclados, la optimización del uso de energía y agua, y la reducción de residuos.

En 2023, Carvajal Empaques obtuvo el Sello de Sostenibilidad Excelencia de ICONTEC, la máxima distinción en sostenibilidad otorgada por esta entidad. Este reconocimiento demuestra el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y su liderazgo en el sector de empaques.

### Recepción y control de calidad la materia prima

La materia prima se recibe en escamas del proveedor y se le realizan las pruebas de control de calidad mostradas en la **Figura 3**. Por temas de inocuidad y seguridad alimentaria, el rPS que se definió y quedó parametrizado en la certificación Invima, hace referencia únicamente a rPS translúcido o blanco sin impresión. Ya que la tecnología para el proceso de reciclaje no cuenta con coextrusores que puedan aportar barreras funcionales de materia prima virgen, por lo que el rPS impreso por el momento está descartado, pues las tintas de impresión empleadas en la industria colombiana no son aptas para ir en contacto directo con alimentos.

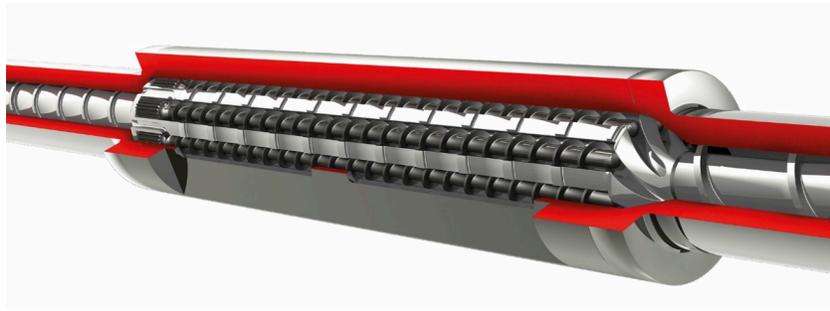
| DESCRIPCION Y APARIENCIA DEL PRODUCTO                        |  |        |
|--|--|--------|
| VARIABLES / ATRIBUTOS  | ESTANDAR   | UNIDAD |
| % HUMEDAD  | < 1.0  | %      |
| DENSIDAD APARENTE  | > 350  | g / L  |
| VARIACIÓN DE pH DE 500 mL DE AGUA EN CONTACTO CON 50g ESCAMA | ± 0,5  | pH     |
| ETIQUETAS ADHERIDAS Y PEGANTES                               | < 300  | ppm    |
| ETIQUETAS SUELTAS  | < 15   | ppm    |
| MATERIALES EXTRAÑOS (madera, caucho y metales)               | < 10   | ppm    |
| CONTENIDO DE PVC Y GOMAS                                     | < 10   | ppm    |
| PARTICULAS INORGÁNICAS                                       | < 10   | ppm    |
| APARIENCIA   | ESCAMA INODORA, LIBRE DE DAÑOS FÍSICOS, SUCIEDAD, ETC. QUE AFECTEN LA APARIENCIA Y FUNCIONALIDAD DEL MATERIAL. | PASA   |
| EMPAQUE  |  |        |
| CONDICIONES DE EMPAQUE PROVEEDOR                             | DESCRIPCION  |        |
| MATERIAL   | RESINA PS POSCONSUMO   |        |
| UNIDADES DE EMPAQUE  | Big Bag 1000 kg  |        |

**Figura 3.** Pruebas de control de calidad realizadas al rPS

### Proceso productivo

Una vez verificada la calidad de la materia prima reciclada, se ingresa al proceso de extrusión. La tecnología adquirida por Carvajal para el reciclaje de residuos posconsumo de PS rígido es la extrusora Gneuss MRS, proceso de reciclaje que ha logrado los estándares establecidos por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos, Invima. Los residuos de posconsumo de poliestireno pueden reprocesarse en la extrusora Gneuss MRS a una lámina para envases de contacto con alimentos rígidos y espumados.

La extrusora Gneuss cuenta con el sistema de rotación de múltiples husillos (MRS), también conocida como extrusora de husillos planetarios, que se muestra en la Figura 2. Este sistema se basa en una extrusora de tornillo único convencional, pero está equipado con una sección de tornillo múltiple para una desvolatilización óptima. La masa fundida del polímero se entrega en un solo tambor grande del tornillo. El tambor contiene ocho pequeñas camisas barrera, paralelas al eje de tornillo principal. En estas camisas están instalados los tornillos satelitales, que son accionados por un engranaje de arrastre en el tornillo principal. Los tornillos satelitales giran alrededor del eje del tornillo y en dirección opuesta [23].



**Figura 4.** Sistema de rotación múltiple (MRS). Tomado de [23].

La extrusora MRS es una máquina que combina una extrusora monohusillo con una sección especial de desgasificación y mezcla. Esta sección está compuesta por ocho husillos planetarios, que generan una gran área disponible para la desgasificación.

Los husillos planetarios permiten obtener una superficie de intercambio de la masa fundida mucho mayor que en las extrusoras convencionales. Por ejemplo, la extrusora MRS tiene una superficie de intercambio de la masa fundida 40 veces mayor que una extrusora de doble husillo corrotante y 80 veces mayor que una extrusora monohusillo convencional.

El sistema de desgasificación de la extrusora MRS es modular, lo que permite adaptarlo a las necesidades específicas de cada aplicación. Por ejemplo, se puede modificar la posición, la longitud o el diseño de los módulos de desgasificación.



**Figura 5.** Unidad de Procesamiento Gneuss (GPU). Tomado de [23].

Carvajal ha recibido la certificación de INVIMA para una mezcla específica que incluye un 30% de rPS, combinado con material virgen y aditivos que facilitan el proceso. Esta certificación abre la puerta a explorar la implementación de estos parámetros certificados con variaciones en la fuente del rPS. Además, la línea de reciclaje de Carvajal está equipada con tecnología de punta, reforzando su compromiso con prácticas sostenibles y de alta calidad.

### **Discusión sobre el proceso productivo**

Los equipos con los que cuenta la empresa son de última generación y cuentan con la aprobación INVIMA para el uso de rPS en contacto con alimentos, por tanto, se ajustan a las necesidades del proyecto.

---

La logística de recolección y clasificación del residuo está en cabeza de Ecopositiva, por lo cual la empresa no tiene control de este proceso. No obstante si se verifica la calidad del material a la entrada del proceso. Para este tipo de aplicaciones el control de la fuente y su trazabilidad es fundamental, por lo tanto si el piloto de recolección de los vasos de yogur en los colegios es exitoso, se aumentaría la cantidad de material valorizado posconsumo.

Cuentan con un laboratorio con los requerimientos necesarios para monitorear la calidad del material obtenido en las diferentes etapas del proceso.

Fortalezas de la entidad dentro de la cadena de recuperación del residuo de interés

Carvajal Empaques es una empresa líder en la fabricación de empaques en América Latina. Cuenta con una amplia experiencia en el uso de tecnologías de punta en su proceso productivo.

En el caso del reciclaje de vasos de yogur, Carvajal Empaques cuenta con una tecnología avanzada que le permite recuperar y valorizar este residuo de manera eficiente para contacto con alimentos. También cuenta con un aliado logístico para la proveeduría del material. Además, está abierto a sumar esfuerzos para mejorar la interacción con los demás actores de la cadena de valor de rPS, como la participación en proyectos como este. En el cual Carvajal Empaques es un aliado fundamental

### **Brechas tecnológicas y de conocimiento de la entidad dentro de la cadena de recuperación del residuo de interés**

Para conocer las brechas tecnológicas, es necesario saber las especificaciones detalladas de los equipos, que se conocerán una vez se realice la visita y la empresa exponga la información solicitada. El conocimiento del proceso y la cadena de reciclaje por parte del personal de la empresa es elevado y permite trabajar a la altura de los retos que propone el proyecto.

Las mayores brechas se presentan en la falta de desarrollo de varias fuentes posconsumo que permitan aumentar el consumo de material reciclado para estar en contacto con alimentos,

---

sumado a la falta de experiencia, tecnologías y conocimientos en general que se tiene en el país para el reciclado del PS grado alimento. Se recomienda hacer una formación específica únicamente en estos temas. Adicionalmente, se requiere desarrollar conocimiento y tecnologías para caracterizar posibles contaminantes, y agentes que afecten la calidad de los envases, y el sabor de los productos empacados. Lo anterior implica el desarrollo de nuevas técnicas de laboratorio de recepción de materia prima y de producto terminado.

Adicionalmente, es posible que se requiera reforzar la trazabilidad de la fuente del material reciclado, y desarrollar métodos en el tiempo para verificar que la composición de la fuente no ha cambiado, y sigue siendo apta para la aplicación.

### **Recomendación de oportunidades de aprovechamiento y reincorporación del residuo de interés**

Dentro de las recomendaciones que se pueden mencionar para la valorización de rPS para contacto con alimentos se tiene:

Evaluar la pertinencia de implementar como control de calidad sobre los lotes de material PCR recibidos la cuantificación de marcadores tales como el limoneno y el benceno, sustancias que han sido utilizadas como marcadores para el control de calidad de los materiales PCR en la industria del PET debido a que son ampliamente utilizados en la industria de los alimentos y su remoción resulta especialmente difícil por los procesos de limpieza y reciclaje, de tal manera que un bajo contenido de estos elementos (10 ppb) indica una adecuada limpieza del material.

## **7.2. ETAPA 2. Implementación de Estrategias para la Circularidad de Residuos**

En esta etapa del proyecto se implementaron estrategias de recolección del material en los dos tipos de fuentes analizadas.

## **7.2.1. Estudio de las fuentes de acopio**

### **7.2.1.1. Fuentes de acopio controladas**

#### **Estrategia de logística inversa para la recolección de vasos de yogur en los colegios**

Durante la primera etapa del proyecto se trabajó de la mano de ARCA para implementar puntos de recolección del material aprovechable específicos que puedan facilitar su valorización y evitar su posible contaminación.

#### **Proceso de acopio. Misión reciclaje de vasos de yogur para chicos**

##### **Actores involucrados**

**Colegios:** Instituciones educativas que participan en el proyecto.

- Colombohispano
- Campo verde
- Grandes Personitas
- Fray Francisco Chacon
- Gimnasio Santa Maria de la Sabana
- Fundación Casa Vieja
- Pablo Herrera
- San Carlos
- Campestre San José

**Arca:** Empresa encargada de la recolección y clasificación de los vasos.

**Ecopositiva:** Empresa encargada del tratamiento y transformación de los vasos.

**Carvajal:** Empresa que utiliza los vasos reciclados para fabricar nuevas láminas de PS.

##### **Pasos a seguir**

### 1. Definición de la identidad gráfica

Se definió una identidad gráfica para el proyecto, con el siguiente eslogan "**Misión reciclaje de vasos de yogur para chicos**". Con esto se diseñó una etiqueta para rodear el contenedor, para que se asemejara a un vaso de yogur y también se diseñó un hablador, que se muestran en la **Figura 4** y **Figura 5**, respectivamente.



**Figura 6.** Diseño de la etiqueta que llevan los contenedores en los puntos de acopio.



**Figura 7.** Diseño del hablador que acompañan los puntos de recolección.

## 2. Instalación de contenedores

En los colegios se instalaron los contenedores con la información gráfica definida en el punto anterior. Estos se instalaron estratégicamente cerca de las zonas donde se generan los residuos, y que quede cerca a una fuente de agua para poder enjuagar los vasos.



**Figura 8.** Punto de acopio de los vasos de yogur en los colegios.

### 3. Campañas educativas

Se diseñó una campaña para instruir a la comunidad educativa sobre los vasos que se quieren recoger y cómo realizar su correcta disposición. Adicionalmente se realizó una campaña de incentivos para aumentar el volumen de vasos acopiados.



**Figura 9.** Registro fotográfico de la difusión de las campañas educativas.

#### **7.2.1.2. Fuentes de acopio no controladas**

Para esto se contactó a diferentes empresas de gestores ubicados en Medellín y en el Oriente Antioqueño que se dedican al proceso de reciclaje de residuos sólidos y a varias empresas de transformación de productos plásticos. En un principio fue difícil reunir la cantidad de material requerido para el proyecto por las condiciones tan específicas que debe cumplir el material. Son pocas las empresas que realizan proceso de recolección y clasificación de residuos de PS dado que el mercado es muy específico y no es tan fácil su comercialización. Las empresas que realizan clasificación selectiva por tipo de material, separan el PS en tulas donde se reúne todo tipo de productos de PS, incluidos los vasos de yogur, juguetes, vallas de publicidad, envases de lavaplatos, entre otros. En la Figura se muestra lo que se encuentra en el mercado de reciclaje como PS.

### **7.3. ETAPA 3. Evaluación del Proceso de Valorización de Residuos**

#### **7.3.1. Caracterización de las muestras en escamas provenientes de los dos tipos de fuentes evaluadas**

---

### 7.3.1.1. Determinación del perfil cromatográfico de contaminantes (GC-MS)

Los resultados de cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) de las muestras de poliestireno virgen, reciclado de fuente controlada, y reciclado de fuente no controlada se presentan en las **Figura 10-12**, donde a partir de los perfiles cromatográficos se revelan diferencias significativas en la composición química, las cuales son un indicativo de los procesos a los que ha sido sometido el material y la presencia de impurezas o aditivos. El poliestireno virgen muestra una composición simple y homogénea, con picos muy definidos y concentrados en compuestos específicos como el estireno, lo cual refleja la pureza del material y la ausencia de contaminantes o productos de degradación.

En contraste, la muestra de poliestireno reciclado de la fuente controlada, aunque mantiene el estireno como componente principal, se observan picos adicionales, mostrando una mayor complejidad en su composición. Esta complejidad se puede atribuir a la presencia de contaminantes introducidos durante el uso previo del material o el proceso de reciclaje, y los residuos de aditivos empleados en el producto original. Estos factores introducen variabilidad en la composición del material reciclado, lo que puede afectar sus propiedades finales y, por lo tanto, limitar su aplicabilidad.

La muestra proveniente de una fuente no controlada, presenta la mayor diversidad de compuestos, lo que evidencia los retos asociados con el reciclaje de materiales de fuentes variadas. La amplia gama de compuestos detectados sugiere la mezcla de diferentes tipos de poliestireno, la presencia de otros plásticos y una variedad de contaminantes y aditivos. Esta diversidad implica un desafío mayor para asegurar la pureza y las propiedades deseadas del material reciclado, lo que requiere procesos de reciclaje y purificación más avanzados y específicos, con el fin de poder garantizar la inocuidad de la materia prima reciclada para el empleo de la misma en proceso de productos con contacto con alimentos.

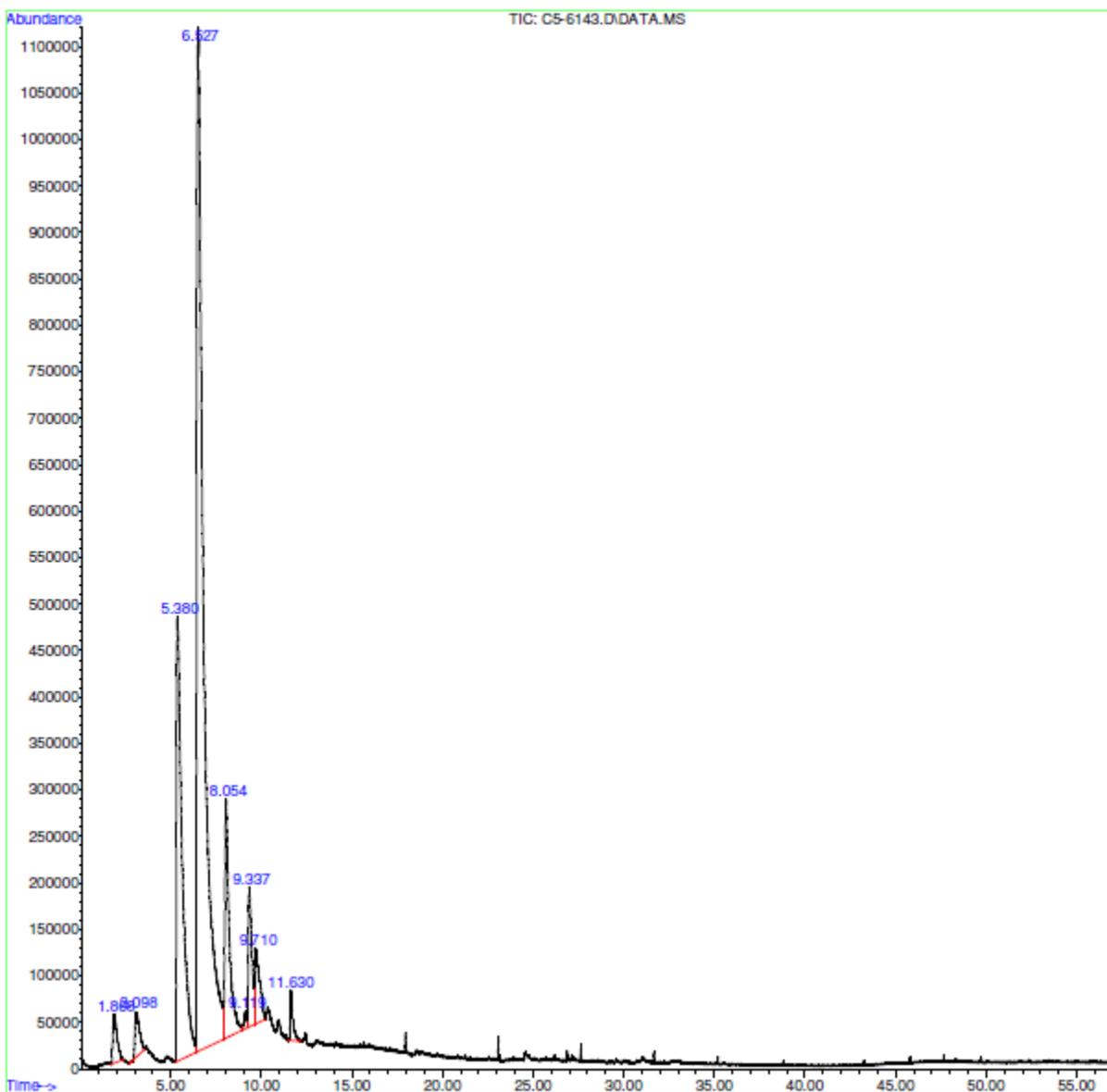


Figura 10. Perfil cromatográfico del vaso poliestireno virgen.

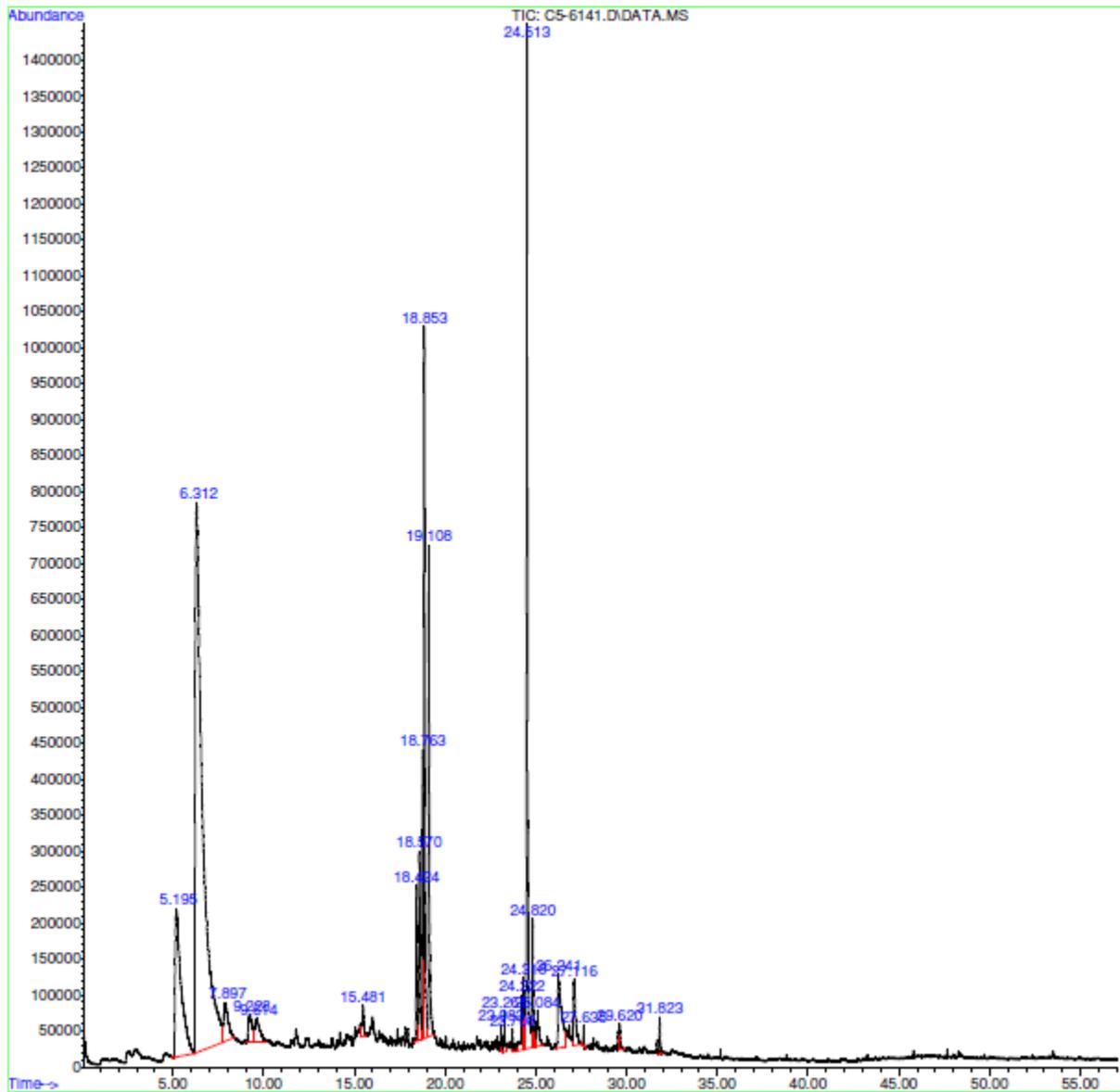


Figura 11. Perfil cromatográfico de la muestra controlada.

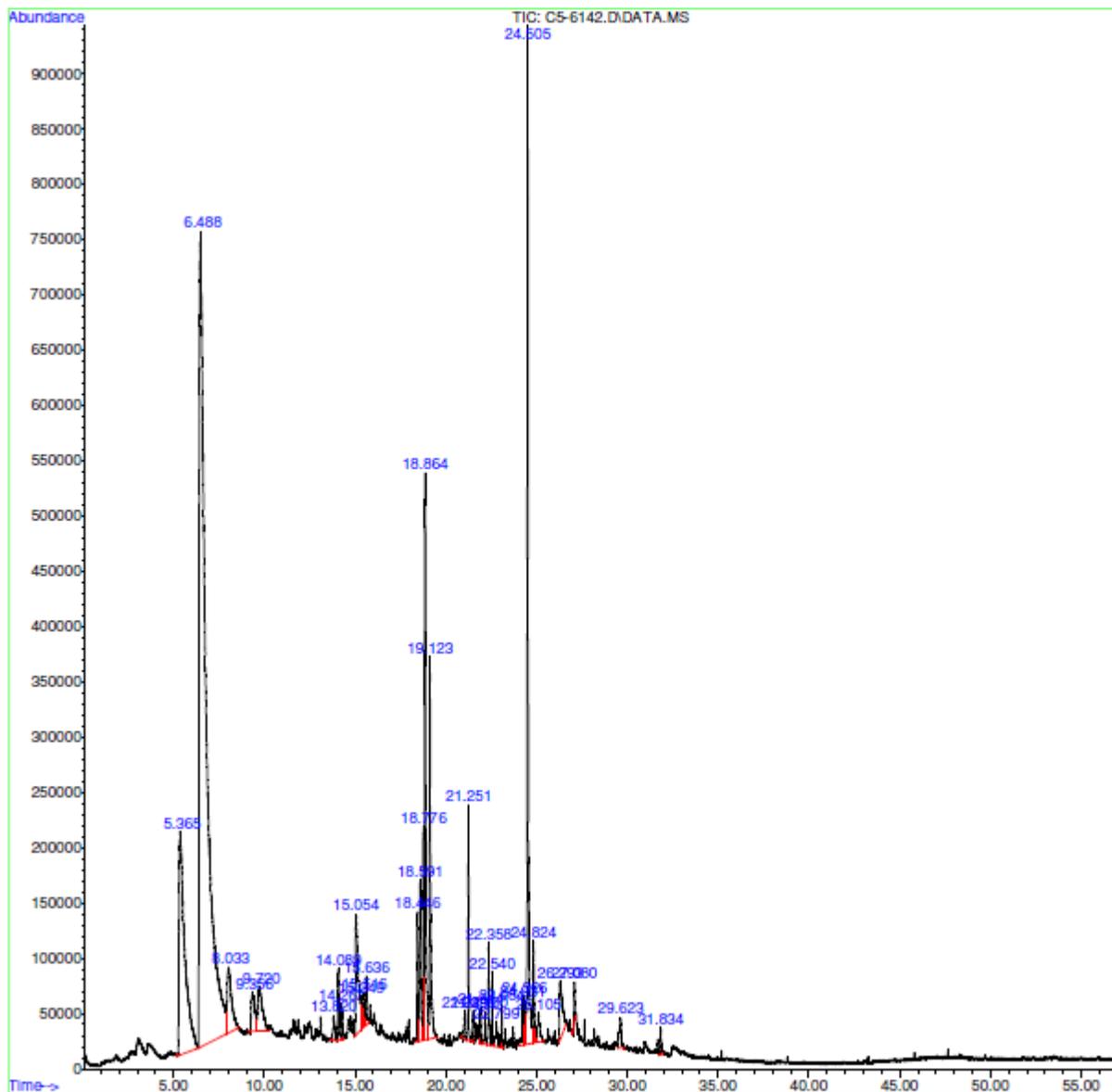


Figura 12. Perfil cromatográfico de la muestra controlada.

### 7.3.1.2. Caracterización térmica y analítica

#### 7.3.1.2.1. calorimetría diferencial de barrido (DSC)

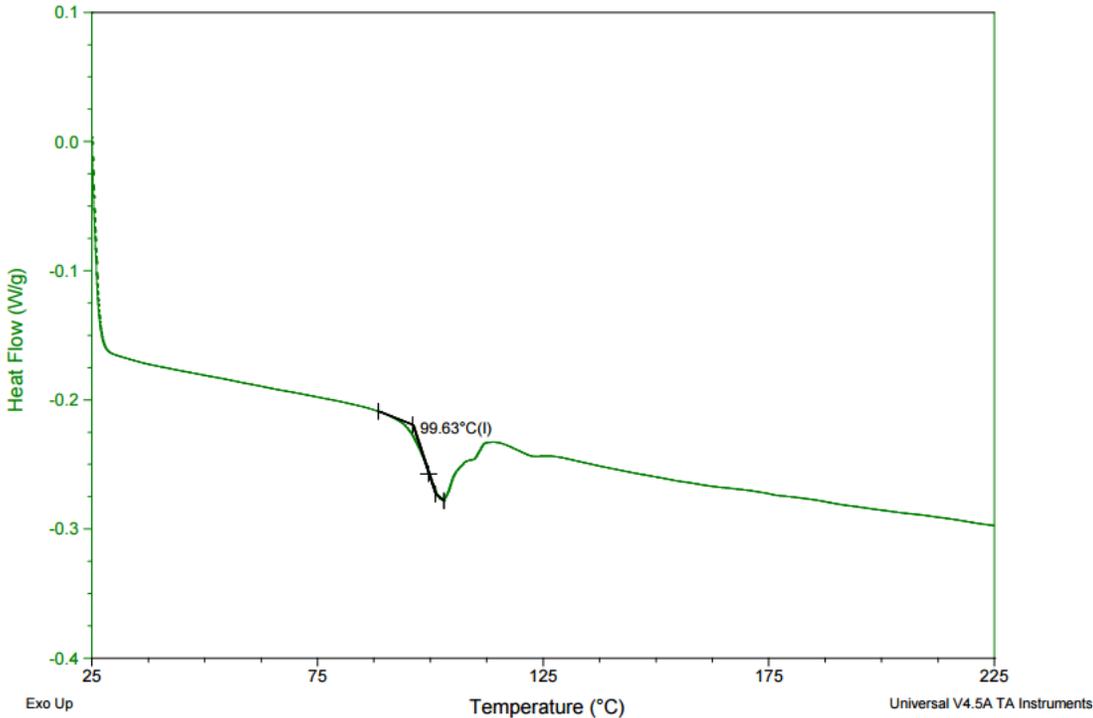
Los resultados de DSC para las muestras de poliestireno reciclado, provenientes tanto de la fuente controlada como de la no controlada se presentan en la **Figura 13** y **Figura 14**, revelando aspectos sobre las propiedades térmicas del material en ambos escenarios. Ambas muestras

---

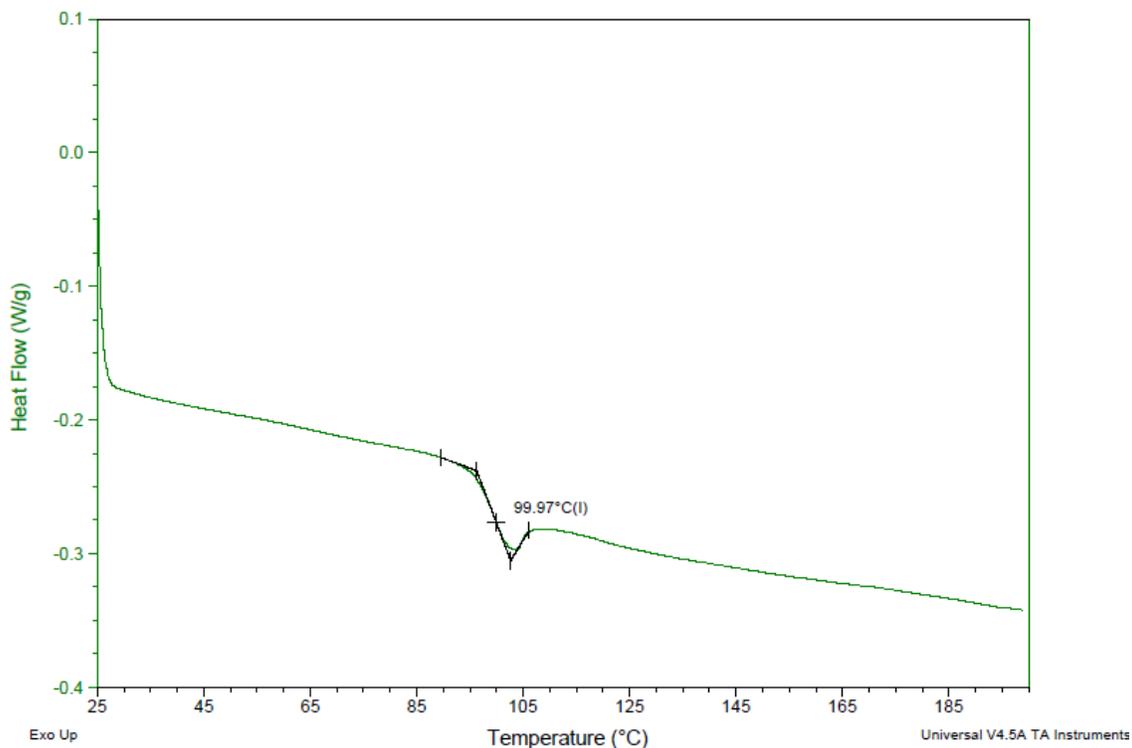
mostraron transiciones vítreas ( $T_g$ ) en un rango muy similar, con la muestra de la fuente controlada presentando una  $T_g$  a  $99.63^\circ\text{C}$  y la muestra de la fuente no controlada ligeramente más alta a  $99.97^\circ\text{C}$ . Este hallazgo sugiere que el poliestireno reciclado, independientemente de su origen, mantiene propiedades térmicas comparables a las del poliestireno virgen, lo cual es un indicador positivo para su reutilización y aplicabilidad en diversas aplicaciones.

La ligera variación en las temperaturas de transición vítrea podría interpretarse como una indicación de la presencia de aditivos o de una mayor cristalinidad en el material reciclado de fuente no controlada. Sin embargo, esta diferencia es mínima, lo que sugiere que la calidad del poliestireno reciclado es bastante homogénea y que las impurezas o aditivos residuales tienen un impacto limitado en sus propiedades térmicas fundamentales. Esto es particularmente relevante en un contexto donde la sostenibilidad y el reciclaje de materiales plásticos se están convirtiendo en una prioridad.

La muestra procedente de la fuente controlada probablemente ofrece una mayor homogeneidad debido a procesos de reciclaje más rigurosos, que minimizan la contaminación y aseguran una consistencia en el material. Por otro lado, la muestra de fuente no controlada, a pesar de la variabilidad potencial en su composición y procedimientos de fabricación, muestra propiedades térmicas muy similares, lo que indica que los procesos de reciclaje, incluso los menos controlados, son capaces de producir material reciclado de alta calidad.



**Figura 13.** Termograma de DSC de la muestra controlada.



**Figura 14.** Termograma de DSC de la muestra no controlada.

#### 7.3.1.2.2. termogravimetría (TGA)

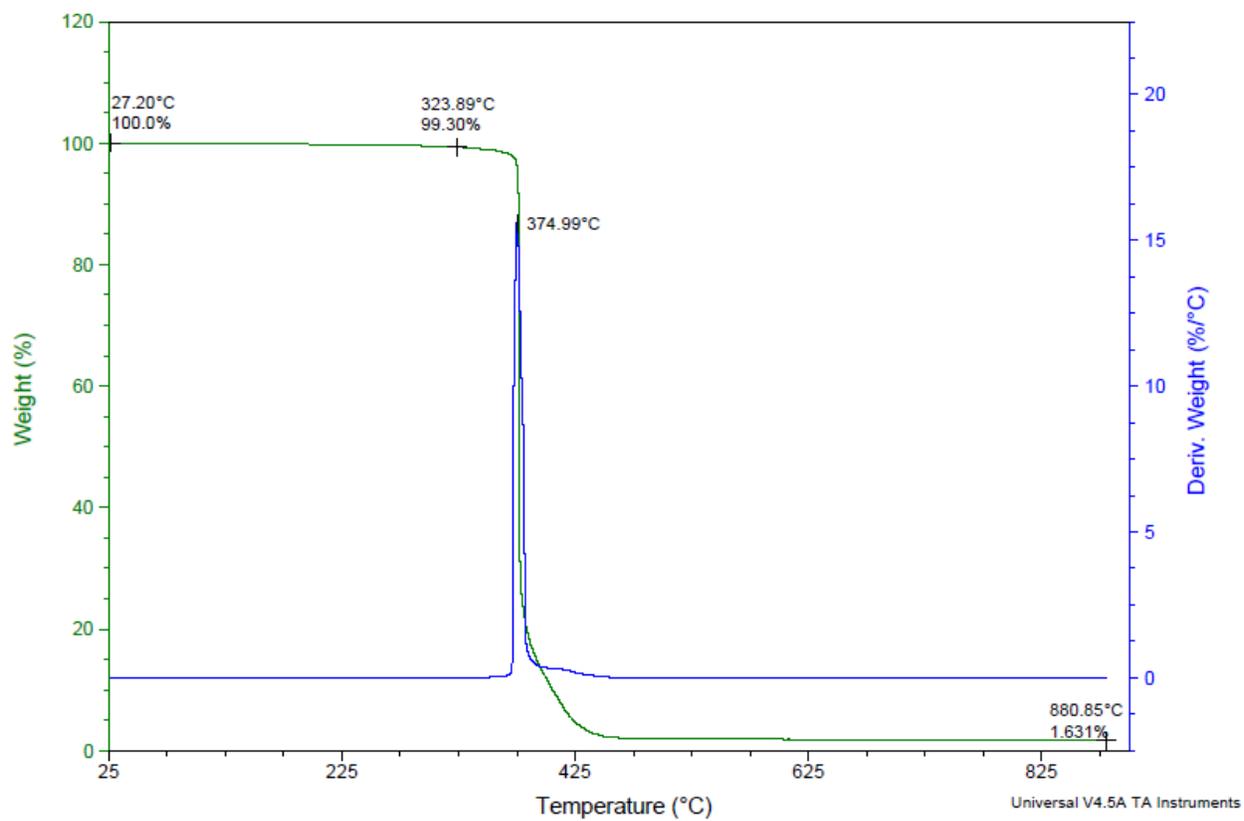
Los termogramas de TGA de las escamas de la muestra controlada y no controlada se muestran en la **Figura 15** y **Figura 16** respectivamente, brindando información sobre la composición, estabilidad térmica y pureza de cada muestra, datos que permiten entender la calidad del material reciclado. Por medio de este ensayo se mide cómo varía el peso de la muestra con el aumento de la temperatura, lo que proporciona una visión sobre los procesos de degradación térmica que experimenta el material.

La muestra de poliestireno reciclado de la fuente controlada inició su proceso de degradación térmica a una temperatura de 323.89°C, alcanzando su máxima tasa de degradación a 374.99°C. Al final del análisis, a una temperatura de 880.85°C, casi todo el material se ha descompuesto, dejando un residuo mínimo del 1.631%, lo que sugiere una alta pureza del material y posiblemente menores cantidades de aditivos o impurezas inorgánicas.

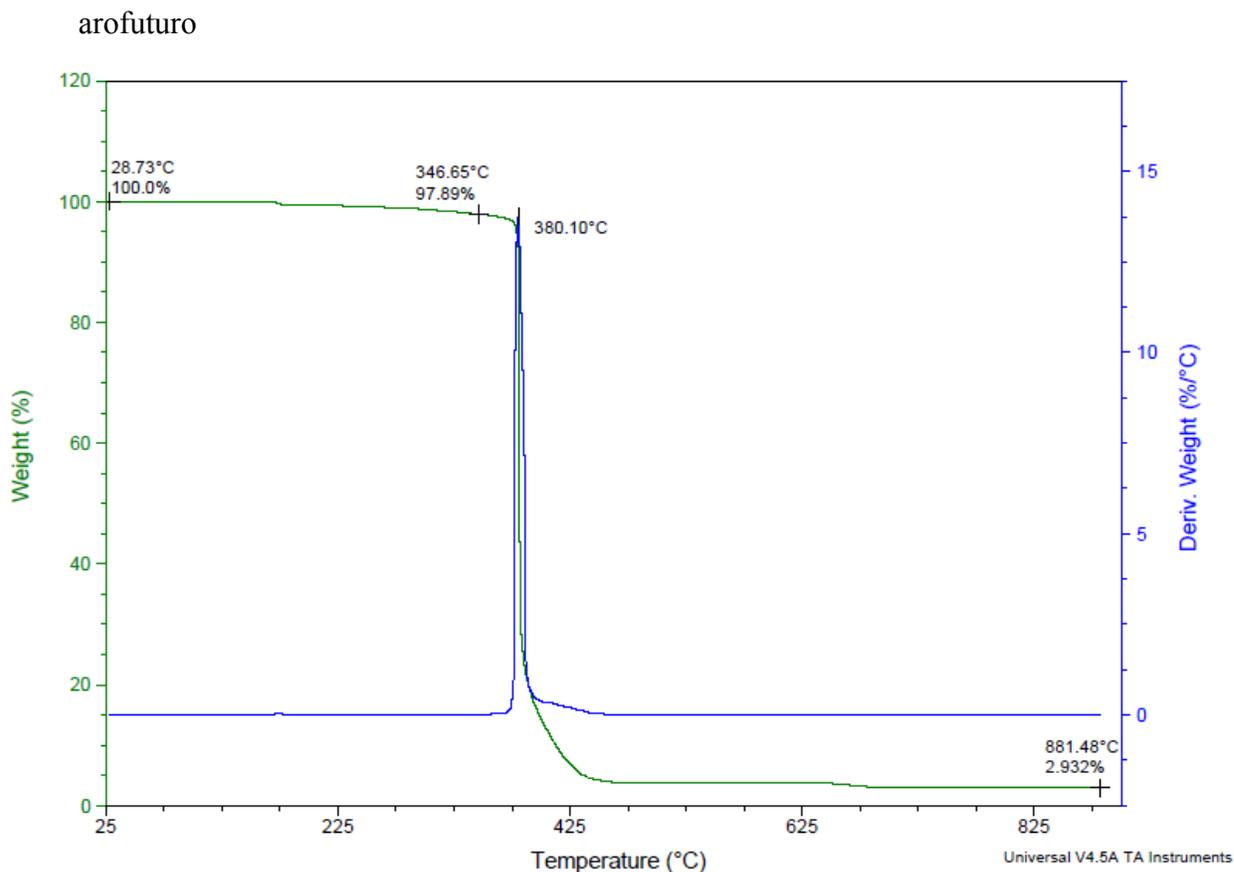
---

Por otro lado, la muestra procedente de la fuente no controlada muestra un comportamiento ligeramente diferente, iniciando su degradación a una temperatura más elevada de 346.65°C, con un pico de máxima degradación a 380.10°C. Este comportamiento podría indicar que el ensayo se realizó sobre una escama de poliestireno con una composición con mayor resistencia térmica, posiblemente debido a la presencia de aditivos diseñados para tal fin. Sin embargo, esta muestra deja un residuo considerablemente mayor del 2.932% al final del análisis, sugiriendo la presencia de una cantidad más significativa de impurezas o aditivos no volátiles.

Estas diferencias entre las muestras pueden ser indicativas de varios factores, incluyendo la pureza del material reciclado y la presencia de aditivos o impurezas que pueden influir en las propiedades finales del poliestireno reciclado. La muestra de fuente controlada, con su inicio de degradación a una temperatura más baja y un residuo final menor, sugiere un material más puro y posiblemente más homogéneo, ideal para aplicaciones donde se requiera una alta calidad del poliestireno reciclado. En contraste, la muestra de la fuente no controlada, con su mayor estabilidad térmica y mayor residuo final, podría contener aditivos que mejoran ciertas propiedades pero también introduce impurezas que pueden afectar negativamente otras características del material.



**Figura 15.** Termograma de TGA de la muestra controlada.



**Figura 16.** Termograma de TGA de la muestra no controlada.

### 7.3.1.2.3. Espectrometría infrarroja (FTIR)

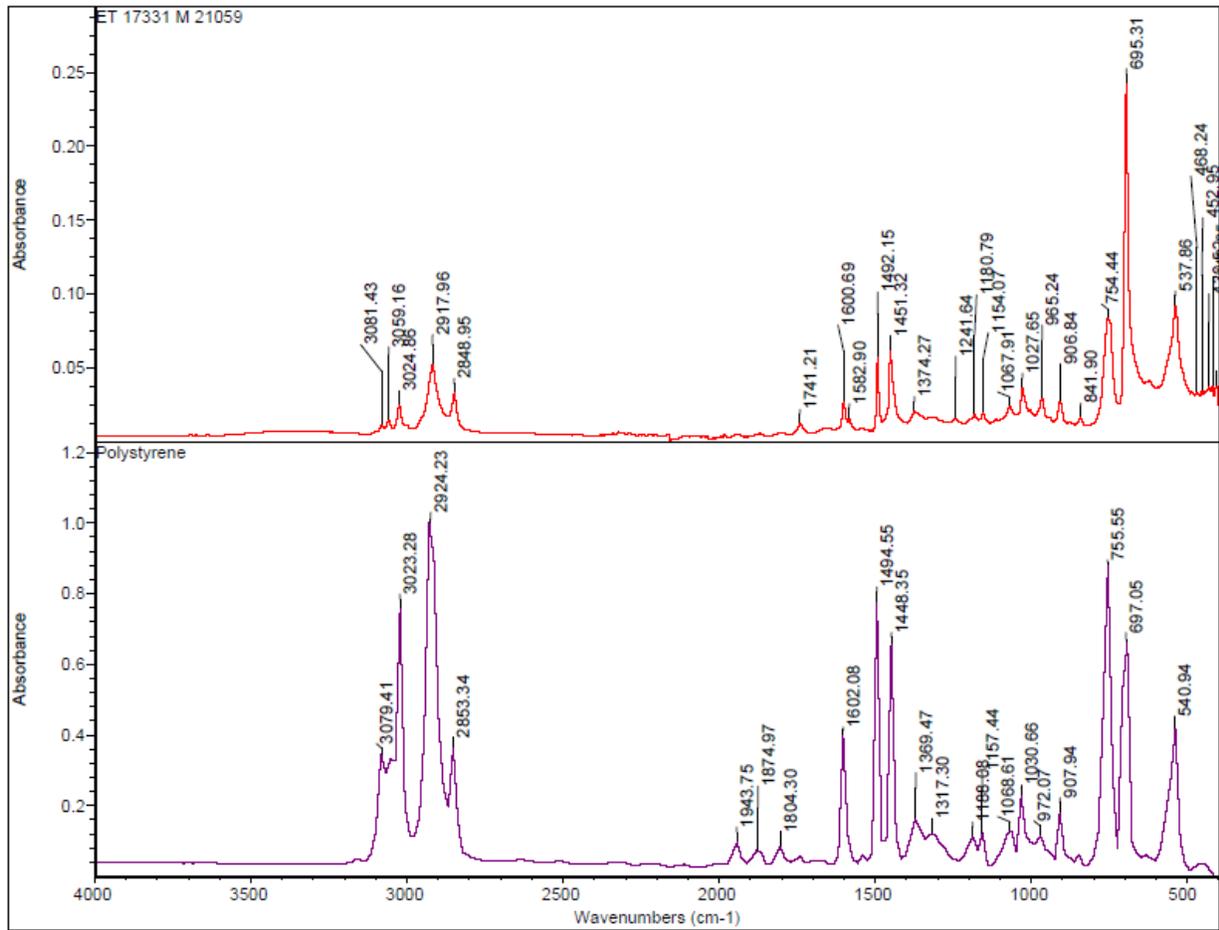
Los espectros FTIR de las escamas de la muestra controlada y no controlada se muestran en la **Figura 17** y **Figura 18** respectivamente, en donde revelan un perfil espectral coincidente entre ambas muestras, evidenciando la presencia uniforme de las bandas características del poliestireno. En ambos espectros, se identifican las siguientes bandas críticas: las bandas en  $3080\text{ cm}^{-1}$  y  $3025\text{ cm}^{-1}$  se asocian con el estiramiento del enlace C-H en el anillo aromático del poliestireno, evidenciando la estructura básica del polímero. Las bandas en  $2917\text{ cm}^{-1}$  y  $2848\text{ cm}^{-1}$  corresponden a los estiramientos simétricos y asimétricos de los grupos C-H<sub>2</sub>, característicos del esqueleto del poliestireno.

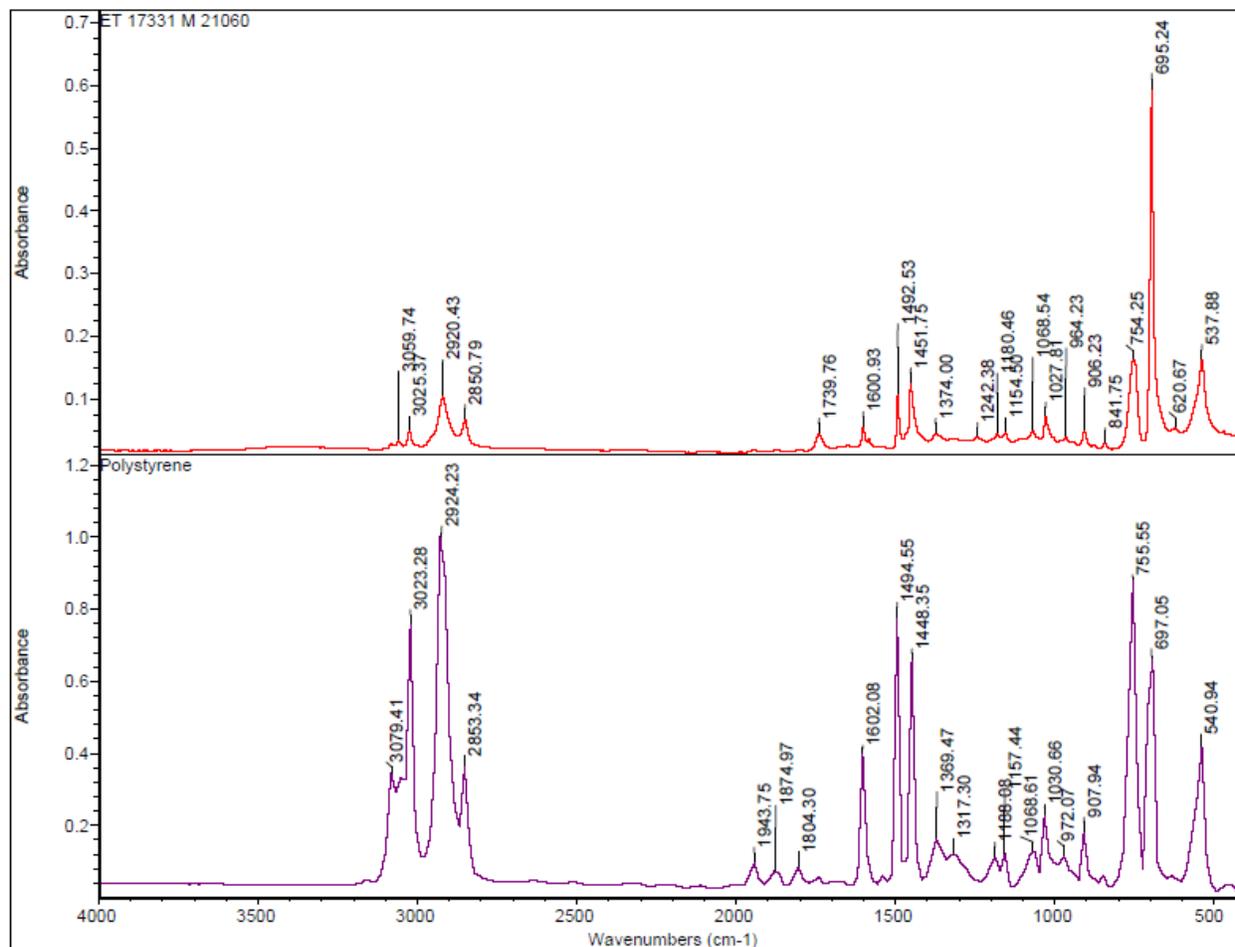
---

Además, la presencia de bandas en  $1741\text{ cm}^{-1}$ , junto con  $754\text{ cm}^{-1}$  y  $695\text{ cm}^{-1}$ , indican el estiramiento del anillo aromático monosustituido, siendo la banda en  $695\text{ cm}^{-1}$  especialmente significativa por ser considerada un indicador representativo del poliestireno, debido a la flexión fuera del plano de los grupos C-H del anillo aromático. Este perfil es clave para identificar la presencia pura de poliestireno en las muestras.

Finalmente, las bandas en  $1600\text{ cm}^{-1}$  y  $1493\text{ cm}^{-1}$  se asocian al estiramiento de los enlaces C-H<sub>2</sub> y C=C del anillo aromático, mientras que las bandas en  $1451\text{ cm}^{-1}$  y  $1374\text{ cm}^{-1}$  corresponden a estiramientos simétricos y asimétricos de grupos metilo. Las vibraciones de estiramiento de los principales enlaces C-C se observan en  $1070\text{ cm}^{-1}$ ,  $1067\text{ cm}^{-1}$ , y  $1027\text{ cm}^{-1}$ , reforzando la identificación del poliestireno en las muestras analizadas [24], [25], [26].

La comparación directa de los espectros FTIR entre las muestras de fuentes controladas y no controladas muestra similitudes estructurales claras, lo que sugiere que, a nivel molecular, el poliestireno mantiene sus características fundamentales independientemente de la fuente de recolección. Sin embargo, la uniformidad y pureza del material proveniente de fuentes controladas facilitan su procesamiento y reutilización, contrastando con las muestras de fuentes no controladas que, pese a compartir un perfil espectral similar, pueden presentar desafíos adicionales en términos de procesabilidad y calidad debido a la posible presencia de contaminantes no identificados por FTIR.



**Figura 17.** Espectro FTIR de la muestra controlada.**Figura 18.** Espectro FTIR de la muestra no controlada.

### 7.3.1.3. Caracterización reológica

#### 7.3.1.3.1. Índice de fluidez (MFI)

Los resultados de los ensayos de índice de fluidez para las dos muestras de poliestireno reciclado se encuentran en la **Tabla 2**, permitiendo visualizar cómo la procedencia del material reciclado afecta sus propiedades de procesamiento y su calidad. El índice de fluidez (MFI) y la densidad de fundido son dos parámetros críticos en este contexto, ya que juntos ofrecen una vista comprensiva de la capacidad de procesamiento del material y de sus características estructurales a nivel molecular.

---

La muestra proveniente de la fuente controlada muestra un MFI de 4,51 g/10 min bajo condiciones de 200°C y 5 Kg, acompañado de una densidad de fundido de 0,95 g/cm<sup>3</sup>. Este perfil sugiere que el poliestireno reciclado tiene una viscosidad relativamente alta y, por lo tanto, requiere de más energía para fluir, lo cual puede indicar un mayor peso molecular o una menor degradación del polímero. La densidad de fundido elevada apunta a una buena compactación molecular, reflejando posiblemente la pureza y homogeneidad del material, atributos deseables que podrían traducirse en mejores propiedades mecánicas y de durabilidad en aplicaciones finales. Sin embargo, el procesamiento de este material podría presentar desafíos, requiriendo condiciones más exigentes para su moldeo o extrusión.

Por otro lado, la muestra de la fuente no controlada, con un MFI considerablemente más alto de 7,53 g/10 min y una densidad de fundido menor de 0,89 g/cm<sup>3</sup>, demuestra una mayor facilidad de flujo en su estado fundido. El incremento en la fluidez se puede asociar a una disminución en el peso molecular del material o a una degradación más pronunciada del mismo. El rompimiento de cadenas poliméricas a unidades más cortas reduce el entrelazamiento molecular, facilitando el movimiento de las cadenas entre sí bajo condiciones térmicas, lo cual se refleja en un MFI más alto. Esta condición puede ser resultado de la exposición previa a procesos térmicos, mecánicos o a la luz solar, comunes en materiales recogidos de fuentes no controladas, donde la exposición a estos factores puede ser más heterogénea y menos predecible. Sin embargo, la menor densidad de fundido podría indicar una mayor porosidad del material o la incorporación de componentes volátiles, que no contribuyen significativamente a la masa pero sí ocupan espacio, resultando en una menor densidad de fundido. Esta condición podría ser consecuencia de una degradación química que introduce grupos funcionales o gases dentro de la matriz polimérica, afectando no solo la densidad sino también la integridad estructural del poliestireno. afectando la homogeneidad y posiblemente las propiedades físicas del poliestireno reciclado, lo cual podría limitar su aplicación a productos finales donde estas no comprometan la funcionalidad o la estética.

Además es importante resaltar, que la muestra de la fuente controlada, según estudio cualitativo, presentaba una mayor cantidad de vasos blancos rígidos, los cuales son más densos que los vasos transparentes flexibles, este tipo de información es relevante ya que es posible que la respuesta en el comportamiento reológico del material sea debido a la variabilidad de los tipos de poliestirenos que tiene cada vaso, pues estos tienen procesos diferentes de fabricación, variación estructural, además de diferentes pesos moleculares. en contraste la muestra de la fuente no controlada, tenía mayor variedad de contenedores de poliestireno, de distintas marcas, variable flexibilidad y mayor contenido de transparentes quede vasos blancos, este tipo de variantes en ambas muestras puede justificar el resultado del MFI, ya que al variar los procesos de fabricación de los mismo se puede influir que tienen entre ellos distintos historiales térmicos, que el estado de las cadenas poliméricas dentro de el material sea distinto y por lo tanto sus pesos moleculares también lo sean, dando así como respuesta una densidad de fundido menor y un mayor índice de fluidez.

Así bien, el proceso de reciclaje influye significativamente en las propiedades físicas y de procesamiento del poliestireno reciclado. Mientras que el material de fuente controlada ofrece indicios de mejor calidad y homogeneidad, ideal para aplicaciones que requieren un rendimiento mecánico superior, el material de fuente no controlada destaca por su facilidad de procesamiento, lo cual puede ser ventajoso para aplicaciones menos exigentes; mostrando así la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de poliestireno reciclado para diferentes aplicaciones, considerando un balance entre la facilidad de procesamiento y las propiedades mecánicas deseadas, dependiendo de las exigencias del producto final.

**Tabla 2.** Índice de fluidez de las muestras evaluadas

| Nombre muestras | Código de muestras | Condiciones de ensayo (°C/Kg) | Índice de fluidez (g/10 min) | Densidad de fundido (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|--|
| PS-EAFIT        | Muestra 1: 21059   | 200/5                         | 4,51±0,07                    | 0,95 ± 0,02                              |
| PS-AROFUTURO    | Muestra 2: 21060   |                               | 7,53±0,04                    | 0,89 ± 0,02                              |

---

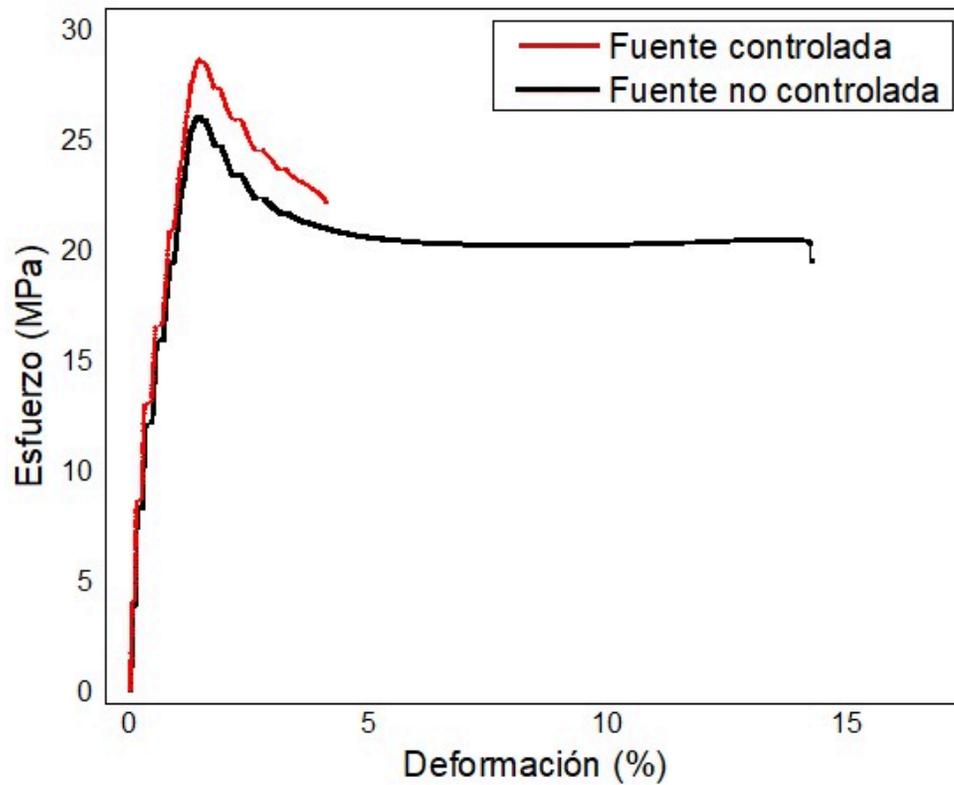
### 7.3.1.4. Caracterización mecánica

#### 7.3.1.4.1. Resistencia a la tensión

Los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la tensión, elongación a la rotura, y módulo de elasticidad se encuentran graficados y tabulados en la **Figura 19** y **Tabla 3**, respectivamente. Donde se puede observar que la muestra proveniente del proceso de reciclaje controlado, mostró una resistencia a la tensión superior comparada con la muestra de fuente no controlada. Esto sugiere que el reciclaje controlado preserva mejor la integridad de las cadenas poliméricas, manteniendo fuertes las interacciones intermoleculares y minimizando los defectos estructurales que podrían debilitar el material. Por otro lado, la muestra derivada de un proceso de reciclaje no controlado, presentó una resistencia a la tensión ligeramente menor, lo cual podría indicar una mayor incidencia de rupturas en las cadenas poliméricas o una distribución más heterogénea del peso molecular, lo cual es coherente con el hecho de que la muestra no controlada posee más variedad en los tipos de poliestireno, lo que permite tener una mayor polidispersidad de pesos moleculares; factores que comprometen la resistencia mecánica del material.

En términos de elongación a la rotura, la muestra no controlada demostró ser más dúctil que la muestra controlada. Esta mayor ductilidad podría ser el resultado de una mayor plasticidad debido a la presencia de aditivos o contaminantes que actúan como plastificantes, incrementando la movilidad de las cadenas poliméricas, además de la heterogeneidad en la composición del poliestireno reciclado de fuentes no controladas, lo cual contribuye a esta mayor flexibilidad.

Por otro lado, el módulo de elasticidad, en ambas muestras presentaron valores comparables, lo que indica que las diferencias en el origen y el tratamiento de reciclaje no tienen un impacto significativo en la rigidez general del material. Sin embargo, la ligera disminución observada en el módulo de elasticidad de la muestra no controlada, puede reflejar una estructura molecular ligeramente más desordenada o flexible.



**Figura 19.** Curva esfuerzo - deformación para las muestras de fuentes controlada y no controlada.

**Tabla 3.** Resultados de resistencia a la tensión

| Nombre muestras | Resistencia a la tensión (MPa) | Elongación a la rotura (%) | Módulo de elasticidad (MPa) |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| PS-EAFIT        | $28,61 \pm 0,37$               | $4,47 \pm 1,74$            | $2254,99 \pm 33,12$         |
| PS-AROFUTURO    | $26,44 \pm 0,71$               | $7,11 \pm 4,32$            | $2220,99 \pm 60,14$         |

### 7.3.1.4.2. Resistencia al impacto

La evaluación de la resistencia al impacto se encuentra tabulada en la **Tabla 4**, revelando diferencias notables en cómo ambas muestras responden a cargas de impacto. Estas diferencias permiten entender la influencia de la estructura molecular y la integridad de las cadenas poliméricas en las propiedades mecánicas del poliestireno reciclado. La muestra de fuente controlada, exhibe una mayor resistencia al impacto, en comparación con la muestra de fuente no controlada, indicando una mejor capacidad para absorber y disipar energía sin fallar.

La superior resistencia al impacto de la muestra controlada puede atribuirse a varios factores relacionados con el proceso de reciclaje controlado y la calidad del material resultante. Primero, la preservación de la longitud de las cadenas poliméricas y una estructura molecular más ordenada son cruciales para una eficiente absorción de impactos, lo que se traduce en una mayor resistencia al impacto. Por otro lado, la muestra no controlada, podría contener cadenas más cortas y una estructura más amorfa debido a la heterogeneidad del material, pues la mezcla de diferentes tipos de poliestirenos, puede introducir puntos débiles en el material, facilitando la falla bajo cargas de impacto. Además la presencia de aditivos o contaminantes puede jugar un papel significativo en las propiedades mecánicas del poliestireno reciclado. Mientras que ciertos aditivos pueden mejorar la flexibilidad del material, también pueden reducir su resistencia al impacto. Es probable que la muestra de fuente no controlada contenga una mayor diversidad de estos compuestos, lo que podría explicar su menor resistencia al impacto en comparación con la muestra proveniente de fuente controlada.

**Tabla 4.** Resultados de resistencia al impacto

| Nombre muestras | Código de muestras | Resistencia al impacto (J/m) | Resistencia al impacto (KJ/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|--------------------|------------------------------|---|
| PS-EAFIT        | Muestra 1: 21059   | 90,6 ± 1,1                   | 11,10 ± 0,14                                |
| PS-AROFUTURO    | Muestra 2: 21060   | 84,7 ± 0,4                   | 10,38 ± 0,06                                |

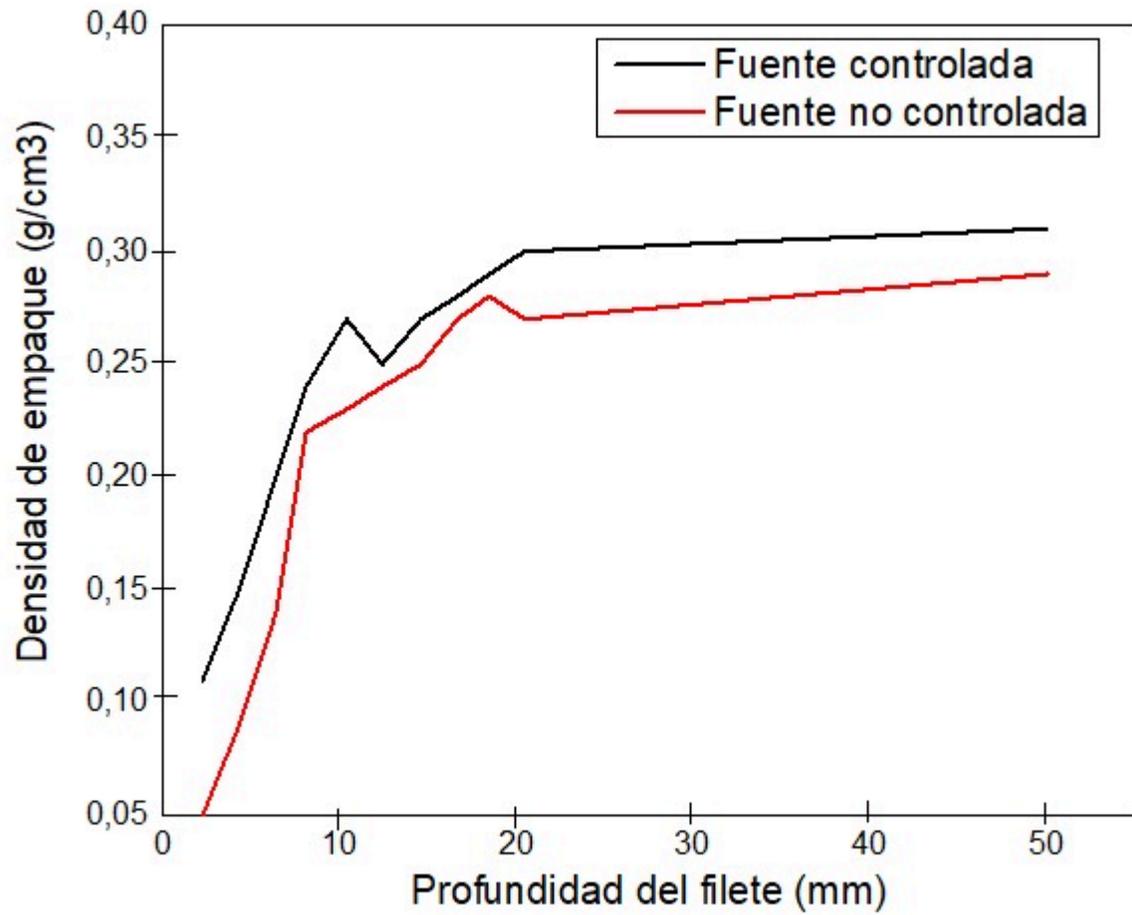
### **7.3.1.5. Caracterización física**

#### **7.3.1.5.1. Densidad de empaque**

La densidad de empaque de las muestras de poliestireno reciclado para ambas fuentes se encuentra presentado en la **Figura 20**, permitiendo comprender cómo las propiedades físicas de las muestras, en particular el tamaño y la homogeneidad de las partículas, afectan su procesabilidad en aplicaciones de extrusión. Este parámetro es crítico, ya que refleja la capacidad de las escamas de poliestireno para acomodarse y compactarse en un espacio dado, lo cual está intrínsecamente ligado a la eficacia con la que pueden ser trituradas y posteriormente alimentadas en la extrusora.

En el contexto del proceso de extrusión, la homogeneidad en el tamaño de partícula y la densidad de empaque son esenciales para garantizar una alimentación constante y uniforme del material a la máquina. La muestra proveniente de la fuente controlada, demostró una mayor densidad de empaque. Este resultado sugiere que las escamas de esta muestra poseen un tamaño más uniforme y están mejor compactadas, lo cual es un indicativo de una trituración eficaz y un material óptimo para procesos de extrusión. Una partícula homogénea permite una alimentación más uniforme y reduce las posibilidades de fluctuaciones en la extrusora, facilitando un proceso más controlado y predecible.

Por otro lado, la muestra derivada de una fuente no controlada, mostró una densidad de empaque ligeramente menor. Esto puede interpretarse como una indicación de una mayor variabilidad en el tamaño de las partículas, lo que podría ser resultado de una trituración menos uniforme o de la presencia de una gama más amplia de tipos de poliestireno y contaminantes. Las partículas de tamaño inconsistente pueden llevar a desafíos en la alimentación de la extrusora, como atascos o una distribución desigual del calor, que a su vez podrían afectar la calidad del producto extruido.



**Figura 20.** Curvas de densidad de empaque para fuente controlada y no controlada.

---

## 8. Conclusiones

El proyecto ha demostrado la viabilidad y la importancia de aplicar principios de economía circular al poliestireno, especialmente en lo que respecta a residuos de vasos de yogurt posconsumo. La reutilización de estos materiales no solo contribuye a la reducción de residuos y la preservación de recursos naturales, sino que también abre camino para prácticas más sostenibles en la industria del plástico.

Se logró establecer eficazmente una fuente controlada de residuos de poliestireno (PS) posconsumo. Sin embargo, se demostró la inviabilidad de recolectar y procesar estos materiales de manera que satisfagan los estándares de calidad exigidos para su reincorporación en la fabricación de nuevos envases alimenticios dentro de los marcos temporales requeridos por la producción industrial. Esta limitación se atribuye principalmente a la necesidad de acumular altos volúmenes de material reciclado para satisfacer las demandas de los distintos procesos de producción, lo cual resulta ser un desafío considerable.

La cooperación entre diferentes actores de la cadena de valor del PS, incluidos recolectores, transformadores, y fabricantes de envases, es crucial para el éxito de cualquier iniciativa de reciclaje. El proyecto resaltó la importancia de establecer alianzas estratégicas y coordinar esfuerzos para optimizar el proceso de reciclaje.

Uno de los principales desafíos identificados fue la necesidad de asegurar la pureza del material reciclado. La contaminación de los residuos de PS posconsumo, ya sea por restos de alimentos o por la mezcla con otros materiales, puede comprometer la calidad del producto reciclado y limitar su aplicabilidad.

La uniformidad en la densidad de empaque y en las propiedades mecánicas es un indicador clave de la calidad del material reciclado. Las muestras provenientes de fuentes controladas demostraron una mayor uniformidad, lo que facilita su procesamiento en la extrusora y predice un comportamiento más consistente en la producción. En contraste, las fuentes no

---

controladas, aunque presentan un potencial de reciclaje, pueden requerir pasos adicionales de clasificación y limpieza para alcanzar una calidad comparable.

La variabilidad inherente al material reciclado de fuentes no controladas puede afectar significativamente la eficiencia de los procesos de producción. Las fluctuaciones en las propiedades del material pueden llevar a ajustes frecuentes en las condiciones de operación, incrementando el tiempo de producción y los costos asociados. Esto plantea un desafío en términos de la viabilidad económica de su uso a gran escala.

Las propiedades evaluadas a partir de el PS reciclado de fuente controlada y fuente no controlada, mostraron resultados comparables, lo que permite inferir que la procedencia y trato del material podría no afectar de manera significativa las propiedades de la materia prima a emplear. Sin embargo es importante considerar que la cantidad de contaminantes en la muestra no controlada sugieren un desafío adicional para el procesamiento de la materia prima, pues si bien, las propiedades no se ven tan afectadas, es probable que la inocuidad requerida para el producto final se lo haga.

Para futuros trabajos es esencial realizar pruebas de migración global y específica en el producto final fabricado a partir de poliestireno reciclado destinado a contacto con alimentos. Esto se debe a que la degradación del material y la disminución del peso molecular pueden aumentar la probabilidad de que sustancias potencialmente dañinas migren a los alimentos. Además, cambios en la estructura del poliestireno, como la porosidad o la inclusión de grupos funcionales, pueden afectar estas propiedades. Realizar estas pruebas permitirá evaluar de forma exhaustiva la seguridad del poliestireno reciclado, asegurando su conformidad con las normativas sanitarias y su viabilidad para aplicaciones en envases alimentarios, en línea con los objetivos de sostenibilidad y economía circular.



## 9. Referencias

- [1] J. M. Fernandez Alcala, «Los principios de la economía circular en la ingeniería de producto», 2015.
- [2] E. Cerdá y A. Khalilova, «Economía circular», *Econ. Ind.*, vol. 401, n.º 3, pp. 11-20, 2016.
- [3] «PEC 2022». Accedido: 4 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acoplasticos.org/DirectorioColombiano/2022/PEC-2022/118/>
- [4] T. E. Montilla Lagos y H. Rodriguez Mamian, «Icopor, asesino silencioso de la vida humana», 2021.
- [5] C. H. Quintero Peña, «Reciclaje termo-mecánico del poliestireno expandido (Icopor), como una estrategia de mitigación de su impacto ambiental en rellenos sanitarios», 2013.
- [6] J. D. Chea, K. M. Yenkie, J. F. Stanzione III, y G. J. Ruiz-Mercado, «A generic scenario analysis of end-of-life plastic management: Chemical additives», *J. Hazard. Mater.*, vol. 441, p. 129902, 2023.
- [7] Z. Kara Ali, J.-M. Pin, y C. Pellerin, «Quantification of p-Cymene and Heptane in a Solvent-Based Green Process of Polystyrene Recycling», *Appl. Spectrosc. Pract.*, vol. 1, n.º 1, p. 27551857231179982, sep. 2023, doi: 10.1177/27551857231179982.
- [8] C. Marquez, C. Martin, N. Linares, y D. D. Vos, «Catalytic routes towards polystyrene recycling», *Mater. Horiz.*, vol. 10, n.º 5, pp. 1625-1640, may 2023, doi: 10.1039/D2MH01215D.
- [9] N. Niessner *et al.*, «Chemical Recycling of Polystyrene: From Post-Consumer Polystyrene Waste to High-Quality Polystyrene Products (Case Study)», en *Industrial Arene Chemistry*, John Wiley & Sons, Ltd, 2023, pp. 2163-2183. doi: 10.1002/9783527827992.ch69.
- [10] F. Welle, «Recycling of Post-Consumer Polystyrene Packaging Waste into New Food Packaging Applications—Part 1: Direct Food Contact», *Recycling*, vol. 8, n.º 1, p. 26, feb. 2023, doi: 10.3390/recycling8010026.
- [11] «Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions—Closing the loop—An EU Action Plan for the Circular Economy.» Accedido: 3 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=DE> (
- [12] «Regulation No 282/2008 of 27 March 2008 on Recycled Plastic Materials and Articles Intended to Come into Contact with Foods and Amending Regulation (EC) No 2023/2006. Official Journal of the European Union L 86/9». Accedido: 3 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:086:0009:0018:EN:PDF> (accessed on 24 September 2021).
- [13] M. Klotz, M. Haupt, y S. Hellweg, «Potentials and limits of mechanical plastic recycling», *J. Ind. Ecol.*, vol. 27, n.º 4, Art. n.º 4, 2023.
- [14] B. Goshayeshi, M. S. Abbas-Abadi, M. Kusenbergh, A. Lemonidou, y K. M. Van Geem, «Prospects of physical, mechanical, and advanced recycling of end-of-life polystyrenes: towards full recyclability», *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, p. 100821, 2023.
- [15] N. Netsch *et al.*, «Recycling of polystyrene-based external thermal insulation composite

- systems—Application of combined mechanical and chemical recycling», *Waste Manag.*, vol. 150, pp. 141-150, 2022.
- [16] M. Larrain *et al.*, «Techno-economic assessment of mechanical recycling of challenging post-consumer plastic packaging waste», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 170, p. 105607, 2021.
- [17] Plastico, «Plástico reciclado de poliestireno en envases de alimentos», Plastico. Accedido: 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/plastico-reciclado-de-poliestireno-en-envases-de-alimentos>
- [18] S. C. Ugwu, C. M. Obele, S. C. Ugwu, y C. M. Obele, «A mini-review on expanded polystyrene waste recycling and its applications», *World J. Adv. Eng. Technol. Sci.*, vol. 8, n.º 1, Art. n.º 1, 2023, doi: 10.30574/wjaets.2023.8.1.0057.
- [19] E. D. Ortiz Rivera, «Reciclabilidad, normativa vigente de los polímeros polipropileno y poliestireno reciclados posconsumo y migración química de sus componentes, para su uso potencial en aplicaciones de envasado de alimentos», 2022, Accedido: 15 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185444>
- [20] R. A. Mendoza, E. E. Niebles, C. D. Barreto, J. Fabregas, y E. M. Buelvas, «Análisis de la cadena de valor del reciclaje de plástico. Un caso de estudio en el departamento del Atlántico (Colombia)».
- [21] «Home - arcarecicladores.com». Accedido: 26 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://arcarecicladores.com/>
- [22] «RES 1407 DE 2018.pdf». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.andi.com.co/Uploads/RES%201407%20DE%202018.pdf>
- [23] «Sistema de Reciclaje OMNI para el procesamiento de residuos industriales y postconsumo para todo tipo de polímeros», Gneuss. Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gneuss.com/es/soluciones-turnkey/sistemas-de-reciclaje-omni/omni/>
- [24] F. Shaap, «Study of Recycling of Waste High Impact Polystyrene (PS-HI) and Polystyrene with Flame Retardant Additives (PS-FR) Co-Polymers», *J. Text. Sci. Fash. Technol.*, vol. 7, n.º 4, pp. 1-11, ene. 2021, doi: 10.33552/JTSFT.2020.03.000572.
- [25] J. Fang, Y. Xuan, y Q. Li, «Preparation of polystyrene spheres in different particle sizes and assembly of the PS colloidal crystals», *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 53, n.º 11, pp. 3088-3093, nov. 2010, doi: 10.1007/s11431-010-4110-5.
- [26] «Coates: Interpretation of infrared spectra, a practical... - Google Académico». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Interpretation%20of%20Infrared%20Spectra%2C%20a%20practical%20approach&publication\\_year=2006&author=J.%20Coates](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Interpretation%20of%20Infrared%20Spectra%2C%20a%20practical%20approach&publication_year=2006&author=J.%20Coates)
- [27] F. Wang, L. Chang, Y. Hu, G. Wu, y H. Liu, «Synthesis and Properties of In-Situ Bulk High Impact Polystyrene Toughened by High cis-1,4 Polybutadiene», *Polymers*, vol. 11, n.º 5, Art. n.º 5, may 2019, doi: 10.3390/polym11050791.