

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS**



**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**

AFE a Tesis presentada a la Universidad de Chile para optar al grado de  
Magíster en Alimentos, mención Calidad e Inocuidad de Alimentos y  
Memoria para optar al título de Ingeniera en Alimentos por:

**Edda Daniella Ortiz Rivera**

Director de Tesis: Luis Puente Díaz

Codirector de Tesis: Ana Carolina López de Dicastillo

**Santiago-Chile**

**Marzo 2022**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS**

**INFORME DE APROBACIÓN DE TESIS DE MAGISTER**

Se informa a la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas que la Tesis de Magíster presentada por la candidata

**EDDA DANIELLA ORTIZ RIVERA**

Ha sido aprobada por la comisión Evaluadora de Tesis como requisito para optar al grado de Magister en Alimentos, Mención en Gestión, Calidad e Inocuidad de los alimentos, en el examen público rendido el día 25 de marzo del año 2022.

**Director de Tesis**

**Dr. Luis Puente Díaz**

Facultad de Cs. Químicas y Farmacéuticas  
Universidad de Chile

---

**Comisión Evaluadora de Tesis**

**Prof. Lilian Abugoch J.** (Preside)

Facultad de Cs. Químicas y Farmacéuticas  
Universidad de Chile

---

**Prof. Mehrdad Yazdani- Pedram Z.**

Facultad de Cs. Químicas y Farmacéuticas  
Universidad de Chile

---

**Prof. Loreto Valenzuela Roedgler**

Instituto de Ingeniería Biológica y Médica  
P. Universidad Católica de Chile

---

## **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**

### **Resumen**

Los envases son un elemento fundamental en la industria de alimentos, permitiendo el almacenar, proteger y contener el alimento sin alterar sus propiedades fisicoquímicas ni las propiedades organolépticas. Para garantizar la inocuidad de los envases al consumidor, se deben considerar las interacciones del sistema-envase-entorno con principal preocupación en la migración química de los componentes de estos envases, asegurando de esta manera que el material utilizado es inerte y no altera el alimento. Junto con ello, es importante tener en cuenta el impacto ambiental que los envases han provocado en las últimas décadas, razón por la cual se han debido desarrollar estrategias de gestión de residuos para combatir este problema.

Por lo anteriormente mencionado, este trabajo tiene como objetivo analizar la factibilidad del uso potencial de los polímeros polipropileno (PP) y poliestireno (PS) reciclados mecánicamente posconsumo en la industria de envases de alimentos

Para dar respuesta a lo planteado, el escrito consiste en una revisión bibliográfica, en la cual, para la búsqueda de información se incluyeron artículos de revisión e investigación entre los años 2011 y 2022 junto con documentos legislativos fundamentales para la revisión. Además, para tener una perspectiva más completa del tema se optó por la

incorporación de un acotado estudio descriptivo transversal, el cual se llevó a cabo en base a una encuesta cualitativa a empresas del rubro de alimentos y plásticos en Chile, con el fin de obtener información respecto de la no utilización de materiales reciclados posconsumo con foco en el polipropileno y poliestireno. Estos resultados fueron contrastados con una encuesta realizada por Polymer Comply Europe, aplicada en Europa para obtener información de las principales barreras que evitan el uso del material reciclado.

Los resultados indicaron que el material reciclado sería de una calidad inferior en comparación al material virgen debido al comportamiento térmico degradativo que presenta el polímero reciclado conforme al aumento del número de reprocesos en el reciclaje mecánico. Esto implica la disminución del peso molecular, lo cual altera propiedades mecánicas de los mismos, y conduce además a una mayor migración de componentes potencialmente tóxicos en comparativa al material virgen, influyendo directamente en la inocuidad de los polímeros.

Junto con ello, las encuestas realizadas en Chile y Europa indican que las principales barreras para la utilización de materiales reciclados, incluidos el polipropileno y poliestireno posconsumo, son la inestabilidad del suministro, problemas con la calidad e inocuidad del material en comparación al polímero virgen, el escaso apoyo recibido por parte de los clientes, las insuficiencias presentes en el marco legal regulatorio y la falta de investigación acerca de la potencial aplicación de estos materiales reciclados posconsumo en envases de alimentos.

Estas dificultades son confirmadas por diversos autores, quienes describen estos problemas como la posible causa de que, hasta la fecha, el uso de los polímeros PP y PS reciclados posconsumo no estén permitidos para ser utilizados como materiales en contacto con alimentos.

Por lo tanto, este trabajo pretende ser una aproximación para los investigadores y a la industria de envases de alimentos, entregando información sobre diversos estudios e investigaciones que se han realizado hasta la fecha, mostrando de esta manera la realidad actual de Chile y el mundo, con la finalidad de generar un marco teórico para futuros desarrollos y tecnologías de procesamiento de PP y PS reciclado posconsumo para su aplicación industrial en envases destinados a estar en contacto con alimentos.

**Palabras claves:** postconsumer recycled, plastics legislation, migration, polystyrene, polypropylene, food plastic.

# **Recyclability, current regulation of post-consumer recycled polypropylene and polystyrene polymers and chemical migration of their components, for their potential use in food packaging applications**

## **Abstract**

Food packaging are a fundamental element in the food industry, allowing food to be stored, protected, and contained without altering its physicochemical or organoleptic properties. To guarantee the safety of the containers to the consumer, the interactions of the system-container-environment must be considered with the main concern in the chemical migration of the components of these containers, thus ensuring that the material used is inert and does not alter the food. Along with this, it is important to consider the environmental impact that packaging has caused in recent decades, which is why waste management strategies have had to be developed to combat this problem.

Due to the, this work aims to analyze the feasibility of the potential use of post-consumer mechanically recycled polypropylene (PP) and polystyrene (PS) polymers in the food packaging industry.

To respond to what has been raised, the document consists of a bibliographic review, in which, to search for information, review and research articles were included between 2011 and 2022 along with fundamental legislative documents for the review. In addition, to have a more complete perspective of the subject, it was decided to incorporate a limited cross-sectional descriptive study, which was carried out based on a qualitative survey of companies in the food and plastics sector in Chile, to obtain information regarding the

non-use of post-consumer recycled materials with a focus on polypropylene and polystyrene. These results were contrasted with a survey carried out by Polymer Comply Europe, applied in Europe to obtain information on the main barriers that prevent the use of recycled material.

The results indicated that the recycled material would be of a lower quality compared to the virgin material due to the thermal degradation behavior that the recycled polymer presents according to the increase in the number of reprocesses in mechanical recycling. This implies a decrease in molecular weight, which alters their mechanical properties, and leads to a greater migration of potentially toxic components compared to virgin material, directly influencing the safety of the polymers.

Along with this, surveys conducted in Chile and Europe indicate that the main barriers to the use of recycled materials, including post-consumer polypropylene and polystyrene, are supply instability, problems with the quality and safety of the material compared to virgin polymer, the little support received from customers, the insufficiencies present in the regulatory legal framework and the lack of research on the potential application of these post-consumer recycled materials in food packaging.

These difficulties are confirmed by various authors, who describe these problems as the possible cause that, to date, the use of post-consumer recycled PP and PS polymers are not allowed to be used as materials in contact with food.

Therefore, this work aims to be an approximation for researchers and the food packaging industry, providing information on various studies and investigations that have been

carried out to date, thus showing the current reality of Chile and the world, with the purpose of generating a theoretical framework for future developments and processing technologies of post-consumer recycled PP and PS for its industrial application in packaging intended to be in contact with food.

**Keywords:** postconsumer recycled, plastics legislation, migration, polystyrene, polypropylene, food plastic.

## **Índice de contenidos**

<b>Resumen</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>Índice de Imágenes</b> .....	<b>10</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>11</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>12</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b> .....	<b>13</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>14</b>
<b>I.1 Antecedentes generales</b> .....	<b>16</b>
I.2 Reciclabilidad de plásticos .....	18
I.2.1 Reciclaje mecánico .....	18
I.3 Envases de alimentos .....	20
I.4 Migración química .....	23
I.4.1 Pruebas de migración .....	29
I.5 Legislación .....	31
I.6. Eficiencia del proceso del reciclaje y certificación de plásticos reciclados .....	35
<b>II. Aporte de conocimiento</b> .....	<b>44</b>
<b>III. Hipótesis:</b> .....	<b>45</b>
III.1. Objetivo general: .....	45

III.2. Objetivos específicos:.....	45
<b>IV. Metodología.....</b>	<b>46</b>
<b>V. Desarrollo.....</b>	<b>50</b>
V.1.1 Polipropileno.....	50
V.1.2 Poliestireno .....	54
V.2 Reciclabilidad del Polipropileno y Poliestireno .....	59
V.3 Migración de los componentes de Polipropileno y Poliestireno reciclado posconsumo .....	65
V.4 Situación actual del uso de material reciclado y perspectivas futuras.....	68
V.5 Tecnologías disponibles para el reciclaje de plásticos .....	75
<b>VI. Discusión.....</b>	<b>82</b>
<b>VII. Conclusiones .....</b>	<b>88</b>
<b>VIII. Bibliografía.....</b>	<b>92</b>
<b>IX. Anexos.....</b>	<b>102</b>

## Índice de Imágenes

<b>Imagen 1.</b>	<b>Envase tetrapack con rPET.....</b>	<b>41</b>
<b>Imagen 2.</b>	<b>Envase tarrina elaborada con rPET.....</b>	<b>41</b>
<b>Imagen 3.</b>	<b>Botella de jugo elaborada con rPET.....</b>	<b>42</b>
<b>Imagen 4.</b>	<b>Envase queso Philadelphia con rPET.....</b>	<b>42</b>
<b>Imagen 5.</b>	<b>Aplicaciones PP homopolímero .....</b>	<b>53</b>
<b>Imagen 6.</b>	<b>Aplicación PP random .....</b>	<b>53</b>
<b>Imagen 7.</b>	<b>Aplicación PP copolímero.....</b>	<b>54</b>
<b>Imagen 8.</b>	<b>Aplicaciones GPS .....</b>	<b>56</b>
<b>Imagen 9.</b>	<b>Aplicaciones de EPS.....</b>	<b>57</b>
<b>Imagen 10.</b>	<b>Aplicaciones de HIPS.....</b>	<b>59</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1. Factores que afectan la migración.....</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 2. Lista de simulantes alimentarios .....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 3. Recomendaciones de contaminantes .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 4. Certificaciones vigentes para plásticos reciclados. ....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas generales del monómero de estireno. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas generales del monómero de estireno. ....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 7. Resumen propiedades VPP y RPP .....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla 8. Propiedades térmicas del PP antes y después de reciclar. ....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 9. Residuo máximo permitido por polímero reciclado .....</b>	<b>69</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1. Procesos de transferencia de masa en el sistema envase-alimento-entorno</b> .....	<b>23</b>
<b>Figura 2. Cuestionario aplicado en estudio.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 3. Estereoquímica del polipropileno.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 4. Etapas del método de procesamiento por molienda e inyección .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 5. Concentración de Cr (mg/kg) en plásticos vírgenes, residuos y reciclados domésticos e industriales .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 6. Compañías recicladoras certificadas por EucertPlas que trabajan con PP y PS .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 7. Diagrama esquemático de la unidad de descontaminación y recuperación del extractor.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 8. Esquema de una posible planta para el procesado de 600 kg/h.....</b>	<b>80</b>

## **Índice de Ecuaciones**

<b>Ecuación 1. Segunda Ley de Fick .....</b>	<b>23</b>
<b>Ecuación 2. Ecuación de Freundlich .....</b>	<b>24</b>

## **Introducción**

Los envases a lo largo de su historia han alcanzado una gran importancia en la sociedad, especialmente a la industria de alimentos. Entre las funciones que destaca el envase se encuentra la de contener y proteger al producto, preservando así sus características organolépticas, además de informar al consumidor de su contenido, composición y cantidad, junto con ser un elemento diferenciador (Navia, Ayala y Villada, 2014). Entre los materiales utilizados para la elaboración de envases destacan los plásticos, por sus propiedades fisicoquímicas y el bajo costo asociado a la producción de envases a partir de ellos.

Las técnicas modernas de envasado han hecho innovaciones importantes entre las que se destaca la aplicación de tecnologías como envasado en atmósferas modificadas, envasado aséptico, envases que soportan condiciones extremas, envases activos o que incluyen nanopartículas. Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías mantiene el desafío principal, garantizar que el producto sea inocuo y no cause daños al consumidor.

La inocuidad involucra la interacción de los envases dentro del sistema envase-alimento-entorno, donde minimizar la migración química de los compuestos utilizados para la elaboración de los envases es clave para asegurar que los materiales en contacto con alimentos son aptos para la aplicación prevista. Asimismo, asegura que el plástico utilizado es inerte y no adultera el alimento (Campos, 2017; Navia et al., 2014; Vargas, 2021).

Entre los componentes que pueden migrar desde los envases a los alimentos se encuentran polímeros, monómeros y aditivos agregados de manera intencional y no intencional, por ello, es que estos componentes deben mantenerse dentro de los límites permitidos con el fin de minimizar los riesgos de contaminación del alimento, y debido a esto, la legislación alimentaria es cada día más exigente, provocando de esta manera que la industria de envases de alimentos asuma un compromiso y la gran responsabilidad de proporcionar alimentos inocuos a los consumidores (Campos, 2017; CENEM, 2021; Navia, et al., 2014).

Por otra parte, la utilización de envases plástico descartables o no retornables por parte de las empresas y la mala gestión de residuos, ha generado gran preocupación por el impacto ambiental causado, lo que ha llevado a que la investigación y legislación apunte hacia una economía sostenible y circular, innovando en los procesos de reciclaje y reutilización de materiales utilizados en la industria de envases de alimentos (Campos, 2017; Jubinville, Esmizadeh, Saikrishnan, Tzoganakis y Mekonnen, 2020).

Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo analizar los polímeros polipropileno (PP) y poliestireno (PS) reciclados posconsumo para su uso potencial en la industria de envases de alimentos, con la finalidad de generar un marco teórico para futuros desarrollos y tecnologías de procesamiento de PP y PS reciclado posconsumo para su aplicación industrial en envases destinados a estar en contacto con alimentos

## **I.1 Antecedentes generales**

El envasado juega un rol fundamental en la industria de alimentos a la hora de preservar, transportar y consumir los productos. Dentro de la gama de materiales que es posible encontrar hoy en día destinados al envasado de alimentos, se destacan los plásticos, los cuales han tomado un rol fundamental y popular representando un 40% de la demanda total de este material (Horodytska, Cabanes y Fullana., 2020).

Los plásticos en la industria de envases se alimentos se destacan por su ligereza, versatilidad, resistencia a la humedad y bajo precio en relación con otro tipo de materiales (Satya y Sreekanth, 2020). Además, sobresalen las propiedades barreras a distintos gases y vapores que estos polímeros poseen, las cuales permiten mantener el contenido aislado del medio, junto con incrementar la durabilidad y ser materiales inertes al contacto con alimentos. Asimismo, las propiedades mecánicas que poseen permiten proteger el contenido contra el impacto y otros esfuerzos fisicomecánico, la densidad baja de este polímero disminuye los costos de transporte. Además, la capacidad para ser opacos o claros permite manejar su aspecto físico según la necesidad de los consumidores y, por último, dada su alta procesabilidad es posible moldear envases con distintas formas a bajo costo (Akash y Vasudevan, 2021; Bracho, 2013).

En la industria de alimentos, los materiales utilizados para la elaboración de envases están formados principalmente a partir de polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), polietilentereftalato (PET) y poliestireno (PS) (Pilevar, Bahrmí, Beikzadeh, Hosseini y Mahdi, 2019).

La paradoja del uso del plástico es que sus características destacadas de durabilidad y no biodegradabilidad son a su vez sus mayores desventajas cuando se considera su contribución a la generación de residuos, ya que los residuos abarcan el 63% de desechos no ecológicos (Ariosti, 2021). Por lo tanto, estos polímeros, a pesar de poseer grandes ventajas, se consideran una fuente de desechos y contaminación (Stoica, Marian, Laura y Stoica., 2020).

Los desechos son un problema creciente, y se proyecta que la producción mundial de plástico en la próxima década se duplicará, generando un gran impacto ambiental por su resistencia a la degradación, junto con preocupaciones económicas y de salud humana. En las últimas décadas se han producido 8,3 mil millones de toneladas métricas de plástico, de las cuales 6,3 mil millones se han convertido en desechos que se acumulan diariamente en el medioambiente. De esta manera, si la tendencia continúa, en el 2050 habrá cerca de 12 mil millones de toneladas métricas de desechos en los vertederos, fenómeno que se puede atribuir al hecho que la mayoría de los envases plásticos se comercializan como artículos de un solo uso, con una vida útil corta (Stoica et al., 2020).

Debido a lo anteriormente planteado es que el manejo adecuado de los residuos poliméricos es el principal desafío actual para garantizar la sustentabilidad en el uso de los plásticos. Entre las estrategias que existen para manejar los residuos con el fin de disminuir la cantidad e impacto que generan en el medio ambiente, se encuentra la reducción, siendo el primer paso en la estrategia de manejo de residuos, la cual consiste en modificar los procesos, actividades y patrones de consumo con el fin de disminuir la

generación de residuos. Le sigue a ella la reutilización, el reciclaje, la valorización energética, el tratamiento y la disposición final en donde se desecha al material al no haberse podido aplicar ninguna estrategia anterior (Vázquez, Espinosa y Beltrán, 2014).

## **I.2 Reciclabilidad de plásticos**

El reciclaje es el procesamiento de residuos para fabricar nuevos artículos. Esta estrategia se puede clasificar en dos procesos distintos, por un lado, el reciclaje mecánico del que se desprenden dos tipos, reciclaje primario y secundario y, por otra parte, el reciclaje químico o terciario, el cual tiene como objetivo la regeneración de monómeros purificados a través del reprocesamiento químico, donde luego de su regeneración, estos monómeros se repolimerizan y el polímero regenerado se puede mezclar con materiales vírgenes para formar un nuevo envase. Sin embargo, el reciclaje terciario requiere un equipamiento específico de elevado costo y personal técnico calificado lo que provoca que su uso industrial se encuentre limitado (FDA, 2021).

### **I.2.1 Reciclaje mecánico**

El reciclaje mecánico aparece como la mejor opción cuando se han disminuido hasta donde es posible los residuos producidos, ya que, al reciclar un residuo, se minimiza la necesidad de extraer y procesar nuevas materias primas. Junto a esto, se evita el agotamiento de los recursos naturales, permitiendo ahorrar agua y energía requerida para obtenerlos, transportarlos y procesarlos (Vázquez et al., 2014).

Esta estrategia de gestión de residuos corresponde al reprocesamiento físico de los materiales, que implica triturar, fundir y reformar el material. Los polímeros pueden sufrir diferentes condiciones de reprocesamiento entre las que se encuentra la temperatura, el uso de decapado u otros procedimientos que podrían influir en los niveles de contaminantes.

La FDA (2021) divide al reciclaje mecánico en dos tipos según el origen del que se obtiene el polímero.

- **Reciclaje primario:** Corresponde al uso de recorte o scrap industrial preconsumo producido durante la fabricación de los artículos. El reciclaje y uso del *scrap* es aceptable, siempre que se sigan las buenas prácticas de fabricación (serie de directrices desarrolladas por el Codex Alimentarius con el objetivo de asegurar condiciones favorables para la producción de alimentos inocuos. Estas directrices incluyen aspectos de construcción, formación del personal, mantenimiento, uso correcto de productos químicos, trazabilidad, higiene de las instalaciones y control de plagas) (NQA, 2021). Sin embargo, si estos residuos se recolectan de varios fabricantes, se recomienda que el reciclador considere si el plástico reciclado cumple con las legislaciones existentes (FDA, 2021)
- **Reciclaje secundario:** Dentro de esta categoría se encuentran los desechos de origen industrial y los desechos posconsumo.

Sin embargo, en el caso de envases para alimentos, el proceso de reciclaje secundario presenta desafíos de inocuidad, y los recicladores deben poder demostrar que los niveles

de contaminantes en el plástico reprocesado son reducidos a niveles suficientemente bajos para garantizar que el producto resultante sea de una pureza adecuada para su uso previsto, pudiendo ser necesario la aplicación de tecnologías emergentes de procesamiento de plásticos reciclados para poder ser utilizados (FDA, 2021).

En el caso de los polímeros utilizados en la industria de alimentos, los efectos del reciclaje mecánico implican la escisión de las cadenas, modificación del peso molecular y viscosidad, modificación en el índice de fluidez y generación de efectos negativos sobre la procesabilidad y prestaciones del material. Por ello, el uso de plásticos reciclados y su reprocesado extensivo actualmente se encuentra limitado a nivel industrial. Además, la utilización de ellos implica que estos materiales podrían no cumplir con los requisitos de calidad, como color y olor, y requisitos de inocuidad que podrían generar la migración de sustancias desconocidas, sustancias orgánicas y la acumulación de metales (López de Dicastillo, Velásquez, Rojas, Guarda y Galotto, 2020).

### **I.3 Envases de alimentos**

Según la Directiva Europea 94/62 CE, envase se define como “Todo producto fabricado con cualquier material de cualquier naturaleza que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías desde materias primas hasta artículos acabados desde el fabricante hasta el usuario o consumidor final” (EuropeanComission, 2018). A lo largo de la historia han alcanzado un papel fundamental en la sociedad por los beneficios aportados, en particular a los alimentos, ya que sin envases sería imposible que

la mayoría de los productos comercializados fuesen distribuidos en un mercado que cada día es más amplio (CENEM, 2021).

El diseño de envases para alimentos debe considerar factores como la vida útil del producto, la conservación de las características del alimento que el consumidor percibe como color, aroma y sabor, junto con la higiene, no toxicidad, así como las necesidades de marketing (AIMPLAS, 2019; Labarca, 2012).

Los envases pueden clasificarse en tres categorías según la Directiva 94/62/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo (European Comission, 2018).

- a) Envase primario: Corresponde a todo producto fabricado con cualquier material que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías, desde materias primas hasta artículos acabados, y desde el fabricante al consumidor.
- b) Envase secundario: Corresponde a todo envase diseñado para agrupar un número determinado de envases primarios o unidades de venta, tanto si va a ser vendido al consumidor final o se utiliza como medio para almacenar. Puede separarse del producto sin afectar las características de este.
- c) Envase terciario: Corresponde al envase diseñado para facilitar la manipulación y el transporte de varios envases secundarios, con el objeto de evitar la manipulación física y los daños inherentes al transporte.

Los alimentos al ser un producto complejo desde el punto de vista químico están expuestos a factores físicos, químicos y microbiológicos, los cuales contribuyen a la alteración y

modificación del producto. Por lo tanto, el envasado es fundamental y debe considerarse como un sistema ternario entorno-envase-alimento, manteniendo controlados los factores previamente mencionados (López, 2008).

Las interacciones existentes entre entorno-envase-alimento corresponden a tres fenómenos, resumidas en la Figura 1 (López, 2008)

- **Permeación:** Corresponde a un fenómeno fisicoquímico que tiene lugar a la transferencia de materia a través del material que constituye el envase. Este fenómeno puede darse desde el alimento al entorno como desde el entorno al alimento, como muestra la Figura 1 con flechas negras.
- **Sorción:** Consiste en la transferencia de sustancias desde el entorno o el alimento al envase, donde quedan retenidas. Engloba dos fenómenos de diferentes naturalezas, por un lado, la adsorción, que tiene lugar en la superficie y absorción, que ocurre en el seno de la matriz del envase, como lo muestran las flechas verdes de la Figura 1 y por otro el fenómeno de sorción correspondiente a cuando se transfieren aromas, grasas o humedad desde el alimento al envase. Si bien, generalmente no altera la composición del alimento las propiedades del envase pueden modificarse gravemente.
- **Migración:** Corresponde a la transferencia de materia desde el envase al alimento. Esta incorporación de sustancias migrantes al producto puede incidir en su calidad e inocuidad, alterando sus propiedades organolépticas, y pudiendo convertirlo en un potencial tóxico, esto es posible observarlo

en la Figura 1, representado con una flecha unidireccional desde el envase al alimento representado de color azul.



**Figura 1.** Procesos de transferencia de masa en el sistema envase-alimento-entorno  
Fuente: López, 2008

#### I.4 Migración química

La migración de sustancias desde los envases a los alimentos es compleja e involucra dos vías, por un lado, se encuentra la difusión, principal vía de migración, la cual corresponde al movimiento macroscópico generado por estructuras moleculares de concentraciones más altas hacia más bajas, buscando alcanzar el equilibrio. Esta se expresa matemáticamente siguiendo la segunda ley de Fick, como muestra la ecuación 1 (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

$$\text{Ecuación 1. } \frac{\partial c_p}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c_p}{\partial x^2} \right)$$

Donde:

$C_p$  (mg/g): Concentración del migrante en el material polimérico

$D$  (cm<sup>2</sup>/s): Coeficiente de difusión

$t$  (s): Tiempo en que tiene lugar la difusión

$x$  (cm): Distancia entre el paquete y el alimento.

Por el otro lado, se encuentra la absorción, la cual es la transferencia controlada de masa debido al contacto con del alimento con el material, lo que da como resultado un aumento en la concentración de moléculas en la interfaz de los alimentos y el material de envasado. Este mecanismo sigue la ecuación de Freundlich, como muestra la ecuación 2 (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

$$\text{Ecuación 2. } \frac{x}{m} = K_p * \frac{1}{n}$$

Donde:

x: masa de aire absorbido en la superficie

m (g): cantidad de material absorbido bajo presión P

K y n: constantes

Dentro de la cantidad de migrantes, existen dos términos importantes que no deben ser confundidos, por una parte, se encuentra la migración general o overall migration [OM] y por otra, la migración específica o specific migration [SM]. La OM hace referencia a la suma de todas las sustancias móviles de envase liberadas por unidad de área de envase bajo condiciones específicas determinadas, las cuales frecuentemente son desconocidas. Por el otro lado, la SM está relacionada con una sustancia conocida o específica (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

Además, dependiendo de los sistemas alimentarios, la migración puede clasificarse en tres sistemas como son el sistema no migratorio, sistema volátil y sistema de lixiviación.

En el sistema no migratorio, hay una migración insignificante de polímeros de alto peso molecular y un pequeño número de sustancias inorgánicas o pigmentos. Por su parte, en el sistema volátil, la migración puede realizarse sin contacto entre el envase y el alimento. Esta migración se relaciona con alimentos sólidos secos y en estas condiciones, las sustancias volátiles migran sobre el producto (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

Por último, en el sistema de lixiviación, existe contacto directo entre el envase y el alimento. Este sistema es el más común en la migración de envases plásticos a alimentos líquidos o productos sólidos húmedos. (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

Los principales factores que afectan la migración y pueden tener influencia directa sobre su extensión y velocidad se muestran en la Tabla 1 (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

**Tabla 1.** Factores que afectan la migración

Factor	Descripción
Naturaleza del alimento	Las interacciones de los alimentos de envasado y su capacidad para disolver la sustancia a migrar dependen de cada alimento.
Tipo de contacto	El tipo de contacto puede ser directo o indirecto, donde la extensión de la migración aumenta significativamente cuando se aplica contacto directo.
Tiempo del contacto	La concentración del compuesto migrante es directamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de contacto.
Temperatura de contacto	El aumento de las temperaturas conduce a tasas de migración más altas y al rápido establecimiento del equilibrio.

Naturaleza del material de envase	El espesor afecta significativamente la tasa de migración; paquetes más delgados están relacionados con tasas de migración más altas, mientras que la cantidad de componentes reciclados no ha mostrado correlación con la migración.
Características del migrante	Los materiales altamente volátiles presentan una mayor tasa y extensión de migración. Además, componentes de alto peso molecular presentan menores niveles de migración en comparación con los materiales de bajo peso molecular.
Cantidad de migrante contenida en el material de envase	Las concentraciones más altas de un migrante en el material de envase conducirán a la detección de niveles más altos de la sustancia en los alimentos después de un periodo de tiempo.

Fuente: Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014

Algunos de los compuestos que pueden migrar desde los en envases plásticos definidos por Arvanitoyannis y Kotsanopoulos (2014) son los siguientes:

- **Plastificantes:** Sustancias que hacen que el material puede ser más flexible y facilitan el procesamiento. La mayoría pertenecen al grupo de ésteres de ácido ftálico (ftalatos) y ácido adípico. Los ftalatos en particular se caracterizan por su bajo peso molecular, lo que facilita la migración del envase al alimento.
- **Estabilizadores térmicos:** Estos compuestos se agregan a materiales plásticos como PVC, PVdC y PS, y corresponden a aceites de semillas y vegetales epoxidados, los cuales se aplican en una amplia variedad de polímeros. Sin embargo, el grado de pureza afecta su toxicidad, ya que el óxido de etileno residual es altamente tóxico.

- **Aditivos deslizantes:** Las amidas de ácidos grasos se aplican ampliamente como propiedades lubricantes, con el objetivo de evitar que las películas se peguen entre sí o presenten conglomerados y para reducir la carga estática.
- **Estabilizadores de luz:** Las aminas poliméricas impedidas se aplican ampliamente en poliolefinas como estabilizadores de luz. Se utilizan para mejorar las propiedades de intemperismo a largo plazo de polímeros plásticos.
- **Antioxidantes:** Los antioxidantes se usan para reducir la tasa de oxidación y mejorar la estabilización del material de interés. Entre las sustancias químicas antioxidantes más conocidas se encuentra Tinuvin P, Tinuvin 326, Tinuvin 776 DF, Tinuvin 234, Chimisorb 81, Irganox 1076, Irganox 1330, Irganox 1010, Irganox168 e Irganox P-EPQ. Dentro de los antioxidantes naturales se encuentran: tocoferoles y tocotrienoles (vitamina E) ascorbato (vitamina C), vitamina A y carotenoides ( $\beta$ -caroteno, licopeno, luteína, etc.), Se, fitoquímicos con actividad antioxidante, suplementos dietéticos y de otro tipo (CoQ10, glutatión, ácido lipoico, etc.) y antioxidantes alimentarios como el hidroxianisol butilado, butilado. hidroxitolueno, galato de propilo y butilhidroquinona terciaria.
- **Disolventes:** Las tintas para impresiones de envases plásticos se utilizan en forma de disoluciones o dispersiones en disolventes, los cuales son eliminados posteriormente. Sin embargo, es posible que quede una cantidad de disolvente residual. Los disolventes más utilizados son sustancias orgánicas de bajo peso molecular compuestas por hidrocarburos, alcoholes, éteres de glicol, cetonas y

ésteres, los cuales pueden presentar migración por contacto directo o por espacio libre en el interior del envase. La cantidad de solvente que ingresa a un alimento depende de la distribución del solvente entre los materiales del envase y el alimento.

- **Monómeros y oligómeros:** El estireno es uno de los monómeros más aplicados el cual puede degradarse a óxido de estireno, que se caracteriza por una acción mutagénica severa, mientras que si se metaboliza más puede conducir a la producción de ácido hipúrico. Los efectos tóxicos que se presentan con mayor frecuencia debido a la exposición al estireno son la irritación de la piel, los ojos, tracto respiratorio y la depresión del sistema nervioso central. Además, están los isocianatos, los cuales se utilizan para la producción de polímeros de poliuretano y sustancias adhesivas. Las consecuencias del uso de isocianatos en la salud humana se han examinado ampliamente debido a su toxicidad conocida. Junto con ello, se encuentran el monómero de cloruro de vinilo, el cual se aplica en envases PVC, pero es una sustancia altamente toxica, el terpolímero acrilonitrilo (AC), el cual consta de una combinación del monómero AC en combinación con estireno y butadieno, donde monómero AC es tóxico, el PET, material que contiene pequeños niveles de oligómeros de bajo peso molecular que van desde dímeros hasta pentámeros y posee una sustancia volátil, el acetaldehído, que es de gran importancia debido a sus efectos sobre la calidad del olor.

Además, se encuentran los nylon, grupo de materiales de envasado que se pueden usar durante el procesamiento térmico. Se observa que altas cantidades de nylon 6 y residuos de caprolactama (monómero de nylon) presentan migración al agua hirviendo. A pesar de que la caprolactama no tiene efectos tóxicos agudos, puede provocar un efecto menor en la termorregulación y un sabor amargo indeseable en los alimentos. También, las resinas epóxicas tipo bisfenol A, como los éteres diglicídicos de bisfenol A (BADGE) se aplican como materiales de partida para las resinas epoxi curadas en frío. Sus efectos tóxicos dependen básicamente de la concentración fraccionada de grupos epoxi sin reaccionar.

- Contaminantes: El benceno y el alquilbenceno podrían generarse a partir de varios tipos de plásticos en contacto con alimentos durante aplicaciones de alta temperatura. El benceno tiene un peso molecular bajo, por lo que puede penetrar a través del material de envasado hasta los alimentos desde envases de PET, PVC y PS contaminados y su complicación se debe a que es un compuesto potencialmente cancerígeno.

#### **I.4.1 Pruebas de migración**

La determinación de la migración es de tipo cuantitativa, exponiendo el material de envase en contacto con los alimentos durante un tiempo y temperatura específica y determinando el compuesto migrante. La determinación en condiciones reales es difícil

por lo que la determinación se realiza utilizando simulaciones de las condiciones de migración, con simulantes estándares (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

Los simulantes de alimentos corresponden a sustancias líquidas o sólidas que tienen una composición simple y conocida, facilitando la determinación e interpretación de la migración, estos se resumen en la Tabla 2 según la Regulación Europea de la directiva CEE 85/572

**Tabla 2.** Lista de simulantes alimentarios

Simulante Alimentario	Abreviatura	Utilización
Etanol 10% (v/v)	A	Alimentos de carácter hidrofílico
Ácido acético 3% (w/v)	B	Alimentos de carácter hidrofílico – pH < 4,5
Etanol 20% (v/v)	C	Alimentos con contenido de alcohol hasta 20%- alimentos con ingredientes orgánicos
Etanol 50% (v/v)	D1	Alimentos carácter lipofílico contenido de alcohol > 20% y aceite en emulsiones acuosas.
Aceite vegetal	D2	Alimentos con grasas libres en superficie
Poli (óxido di 2,6-difenil-p-fenilo)	E	Alimentos secos

Fuente: Extracto Directiva CEE 85/572, 2011

### **Pruebas de migración global y específica**

Para realizar la prueba de migración global, el método analítico más utilizado es la prueba gravimétrica, y para su realización luego de haber elegido simulante alimentario, una muestra del material se pone en contacto con el simulante en

condiciones de temperatura y tiempos específicas, las cuales se establecen en la legislación European Commission (1982). El simulante se evapora (en el caso de simulantes volátiles) o se elimina (aceites) y la sustancia residual, o el material de muestra después del contacto, se pondera para calcular por diferencia entre el peso de la muestra antes del contacto y después del contacto el porcentaje de migración de materiales sólidos (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

Por otra parte, la determinación de la migración específica se lleva a cabo midiendo la migración de un compuesto en específico del material de envasado al alimento mediante técnicas cromatográficas y análisis de plasmografía como espectroscopía (IR), cromatografía de gases (GC), cromatografía de gases-espectroscopía de masas (GC-MS), cromatografía líquida y cromatografía líquida-espectroscopía de masas (LC-MS) (Arvanitoyannis y Kotsanopoulos, 2014).

## **I.5 Legislación**

En términos de legislación actualmente existen reglamentos a nivel mundial regido por estamentos como MERCOSUR, UNIÓN EUROPEA, FDA y FAO.

El MERCOSUR en la resolución MERCOSUR/GMC/RES Nro. 56/92 (1992) Anexo: Disposiciones Generales para Envases y Equipamientos Plásticos en Contacto con Alimentos, menciona en el punto número 3 las sustancias positivas de componentes que podrán ser utilizadas para la fabricación de envases y los límites de migración total que deberán cumplir los envases en contacto con alimentos, los cuales son 50 mg/kg de simulante en el caso de envases con capacidad igual o superior a 250 ml en que no se

puede determinar el área de superficie de contacto y  $8\text{mg}/\text{dm}^2$  de área de superficie del envase en el caso de envases con capacidad inferior a 250 ml y en caso de material plástico genérico (MERCOSUR, 1992). La prueba de migración se realiza siguiendo los pasos detallados en la resolución MERCOSUR/GMC/RES. N° 32/10 en el caso de los envases, el ensayo de migración debe realizarse tres veces sobre una misma muestra, utilizando un simulante virgen en cada ocasión, y la conformidad se establecerá sobre la base del nivel que se determine en los tres ensayos (MERCOSUR, 2010)

De forma similar, en Unión Europea la prueba de migración global es un requisito fundamental según el artículo 3 de la Regulación mercado CE No 1935/2004. El Reglamento (UE) n° 10/2011, sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos, especifica el límite de migración global cuyo valor es de  $60\text{ mg}/\text{kg}$  de alimento. Igualmente, la migración en alimento o los simulantes no debe exceder los  $10\text{ mg}/\text{dm}^2$  expresados sobre la base del área de contacto. Este ensayo se realiza tres veces en una sola muestra, usando una proporción distinta de simulante alimentario en cada ocasión. La migración global en el segundo ensayo será inferior a la del primero y el tercer inferior al del segundo, siendo este último ensayo la base de verificación del nivel de migración global (Reglamento (CE) 1935/2004, 2004).

Por su parte, la FAO, en su Resolución 4143 (2012) menciona que, para los envases, equipamientos plásticos y elastoméricos que entren en contacto con los alimentos y bebidas no deben ceder más de 50 miligramos de componentes liberados por kilogramo de alimento o simulante ( $50\text{ mg}/\text{kg}$ ). En el caso de objetos que puedan llenarse con una

capacidad entre 500 ml y 10 L, láminas, películas y otros materiales u objetos que no puedan llenarse, para los que no sea posible calcular la relación entre el área de superficie y la cantidad de alimento en contacto con ella, el límite de migración total debe ser de 8 miligramos por decímetro cuadrado de área de superficie de material plástico (8 mg/dm<sup>2</sup>)

En el caso de los materiales, objetos, envases y equipamientos plásticos y elastoméricos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para lactantes, la FAO determina que los límites de migración total serán siempre de 50 miligramos por kilogramo (50 mg/k) u 8 miligramos por decímetro cuadrado de área de superficie de material (8 mg/dm<sup>2</sup>).

Por otra parte, en el caso de Estados Unidos, la FAO no especifica límites de migración globales, pero posee requisitos similares. Para poder obtener la aprobación de comercialización de un alimento, el fabricante de alimentos o su representante debe enviar un informe al menos 120 días antes de la comercialización del alimento, el cual incluya información toxicológica, química y ambiental sobre cada una de las sustancias en contacto con alimentos y sus impurezas a los que los consumidores pueden estar expuestos. Este informe debe abordar la potencial mutagenicidad y carcinogenicidad de las sustancias y sus impurezas (Sotomayor, Arvidson, Mayer, McDougal y Sheu, 2007; Intertek, 2021). El nivel de información necesaria en el informe depende de la ingesta diaria estimada de una sustancia y sus impurezas. En el caso de una sustancia o impureza con una exposición dietética igual o menor a 1,5 microgramos por persona diarios (1,5µg /p/d) no se solicitan estudios de toxicidad, pero debe proporcionarse cualquier información

disponible sobre el potencial mutagénico o carcinogénico. Para sustancias o impurezas con una exposición entre 1,5µg /p/d y 150 µg /p/d, la FDA recomienda una batería de pruebas de toxicidad, diseñadas para evaluar el potencial carcinogénico de la sustancia química. En el caso de sustancias o impurezas con exposición dietética entre 150 µg /p/d y 3.000µg /p/d, se recomiendan estudios adicionales, como la prueba de micronúcleos en roedores vivos. Para una ingesta dietética superior a 3.000 µg /p/d, se solicita discutir los detalles directamente con la FDA (Sotomayor et al., 2007).

Finalmente, en Chile, la regulación de inocuidad de los alimentos está dado por el Decreto Supremo 977 (Ministerio de Salud, 2019) en el cual su versión más reciente de 14-01-2019 abarca los envases y utensilios entre los artículos 122 y 129 del Párrafo III.

En el artículo 122, el Reglamento define envase como cualquier recipiente que contenga alimentos, que los cubra total o parcialmente. Además, el Artículo 123 menciona que los utensilios, recipientes, envases, embalajes, envoltorios y aparatos destinados a la elaboración, conservación, fraccionamiento y distribución de los alimentos, deberán ser contruidos o revestidos con materiales resistentes al producto y no cederán sustancias tóxicas, contaminantes o modificadoras de los caracteres organolépticos o nutricionales de dichos productos (Ministerio de Salud, 2019).

Además, el Artículo 126 menciona los límites residuales permitidos para los envases de material plástico que se hallen en contacto con alimentos y sus materias primas. En ese aspecto menciona que no deben contener como monómeros residuales más de 0,25% de estireno, 1ppm de cloruro de vinilo y 11 ppm de acrilonitrilo. Asimismo, los objetos de

materias plásticas no deben ceder a los alimentos más de 0,05 ppm de cloruro de vinilo o de acrilonitrilo y ninguna otra sustancia utilizada en la fabricación de materias plásticas que puedan ser nocivas para la salud (Ministerio de Salud, 2019). Junto con ello, los límites de migración global establecidos son 10 mg/dm<sup>2</sup> de muestra o 60 mg/Kg de simulante en el caso de envases en contacto con alimentos infantiles.

#### **I.6. Eficiencia del proceso del reciclaje y certificación de plásticos reciclados**

La eficiencia de un proceso de reciclaje debe probarse con la prueba llamada Challenge Test, protocolo destinado a evaluar la eficiencia de eliminación de contaminantes modelo en el reciclaje físico y químico. El test está reconocido por la FDA, la European Food Safety Authority (EFSA), la Dirección General de Sanidad y Protección de los Consumidores de la Comisión Europea y el MERCOSUR (MERCOSUR, 2007) en la cual un material es contaminando con varios compuestos sustitutos, los cuales representan las cuatro categorías de compuestos: volátiles y no polares, volátiles y polares, no volátiles y no polares y no volátiles y polares, y luego de ello se realiza en el proceso de reciclaje. Posteriormente, se determinan las concentraciones residuales de los sustitutos mediante la diferencia entre la concentración de salida y la de entrada, lo cual representa la eficiencia de limpieza en el proceso (Welle y Franz, 2006).

La elección sobre los compuestos que deben aplicarse para la realización del test depende del tipo de polímero y del proceso de reciclaje utilizado. Sin embargo, los sustitutos deben ser estables durante el proceso de reciclaje para poder ser analizado en

el material de salida y deben cumplir la condición que sean tóxicos. En el Anexo 1, se puede encontrar una tabla con algunos ejemplos de compuestos sustitutos (Welle y Franz, 2006).

En la práctica, un problema que se ha detectado es que la empresa de reciclaje normalmente no sabe cuánto material reciclado se aplicará al material de envase, junto con desconocer las dimensiones del mismo (volumen, superficie) provocando que no sea posible estimar la migración sobre la base de la eficiencia de limpieza e implica que todas las aplicaciones deben probarse experimentalmente, y para ello, la determinación de la migración debe ser determinada a partir de la fabricación de un artículo modelo en contacto con alimentos siguiendo las directrices de las pruebas mencionadas en la sección I.4 (Welle y Franz, 2006).

Al cuantificar la migración dentro de los parámetros se debe tener en cuenta las condiciones de uso del material, si éste estará en contacto directo o separado por una barrera funcional (Welle y Franz, 2006).

Finalmente, el criterio de evaluación para decidir si la prueba superó los requisitos, se define una tasa de migración máxima, la que se conduce a una concentración de 10 ppb en el simulante alimentario, donde la reducción de los valores iniciales a concentraciones tan bajas como es el límite demuestra la eficiencia del proceso (Welle y Franz, 2006).

De manera similar, la FDA (2021) menciona la prueba de contaminantes sustitutos para demostrar la capacidad del reciclaje secundario o terciario, en la eliminación de los contaminantes de los envases, en la cual recomienda simular el uso indebido por parte del

consumidor, exponiendo al polímero virgen a contaminantes sustitutos seleccionados y luego haciéndolo pasar por el proceso de reciclaje con el fin de demostrar la capacidad de ser reciclado. El análisis posterior del polímero procesado proporciona un medio para evaluar la eficiencia del proceso de reciclaje (FDA, 2021). Se recomienda que los recicladores utilicen materiales con variedad en propiedades químicas y físicas para simular el mal uso por parte del consumidor. Los contaminantes sustitutos deben representar materiales comunes accesibles al consumidor e incluyen una sustancia orgánica polar volátil, una sustancia orgánica no polar volátil, una sustancia orgánica polar no volátil, una sustancia orgánica no polar no volátil y una sal de metal pesado (FDA, 2021)

Para probar el proceso del reciclaje, la FDA (2021) recomienda llenar los recipientes hechos del plástico virgen de interés con los contaminantes sustitutos. Un enfoque alternativo para reducir la cantidad de residuos peligrosos es remojar varios kilogramos de plástico virgen en escamas del tipo que se usa realmente en el proceso de reciclaje en los contaminantes seleccionados. Se puede utilizar una mezcla de componentes siempre cuando no reaccionen entre sí. Las recomendaciones se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Recomendaciones de contaminantes

<b>Contaminantes</b>	<b>Concentración</b>
Cloroformo (polar volátil)	10% v/v <sup>a</sup>
Tolueno (volátil no polar)	10% v/v
Benzofenona (polar no volátil)	1% v/v
Tetracosano o Lindano (no volátil no polar)	1% p/p <sup>b</sup>

Cobre (II) 2-etilhexanoato (metal pesado)	1% p/p
---	--------

<sup>a</sup>v/v volumen de contaminante por unidad de volumen de mezcla completa.

<sup>b</sup>p/p masa de sustituto por unidad de masa de mezcla completa.

Fuente: FDA, 2021

Luego de demostrar la efectividad del proceso de reciclaje, existen certificaciones de plásticos reciclados, la cuales tienen por objetivo fomentar el proceso de reciclaje de plásticos de manera respetuosa con el medio ambiente, permitiendo a los recicladores cumplir con los requisitos del registro de sustancias y mezclas químicas y el cumplimiento grado alimenticio para la elaboración de envases. Estas certificaciones se encuentran disponibles en distintos países y se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Certificaciones vigentes para plásticos reciclados.

Certificación	Descripción	Fuente
 EuCertPlast	EuCertPlast en la certificación europea, en la cual el esquema se centra en la trazabilidad de los materiales plásticos, y en la calidad del contenido reciclado del producto final.	(EuCertPlast, 2021)
 RECYCLED CONTENT QA-CER	QA-CER es una certificación de contenido reciclado de origen Belga. Este sistema se aplica a empresas de clasificación y reciclaje de residuos posconsumo de plásticos, empresas de procesamiento de plásticos, aplicado a residuos posindustriales y posconsumo y a empresas que producen productos a partir de componentes plásticos reciclados	(QA-CER, 2021)

	<p>La certificación PVS Seconda vita food es certificación destinada para materiales y objetos destinados a entrar en contacto con alimentos. En ella incluye productos elaborados con materiales posconsumo, artefactos fabricados con desechos plásticos y productos en los que se utiliza plástico reciclado posconsumo detrás de una barrera funcional</p>	<p>(IPPR, 2021).</p>
	<p>Wertstoff PET es una certificación de origen alemana, la cual promueve el desarrollo de botellas de PET utilizando PET reciclado, para ello incluyen recicladores de PET para la producción de materiales reciclados en contacto con alimentos, fabricantes de preformas y productores de bebidas, aguas minerales y refrescos</p>	<p>(WERTSTOFF-PET, 2021)</p>
	<p>Swiss R-PET es una certificación suiza la cual muestra la proporción de R-PET en las botellas de PET para bebidas, y garantiza que el R-PET utilizado es un producto suizo y que todo el proceso de fabricación tiene lugar en Suiza</p>	<p>(PETRECYCLING, 2021)</p>
	<p>RSB es una certificación suiza la cual es aplicable a combustibles, biomasa y productos de materiales de carbono reciclado y de base biológica, incluidos los desechos fósiles.</p>	<p>(RSB, 2021)</p>

En el contexto de la utilización de plásticos reciclados para la elaboración de envases, el año 2021 destacó dentro de la industria de envases y embalajes con anuncios

importantes por parte de empresas en la incorporación de material reciclado en sus productos. La primera dio lugar en el año 2020, con el primer certificado AENOR del contenido de plástico reciclado en un envase. Este producto desarrollado por la empresa Plásticos Vanguardia, contiene al menos 30% del material reciclado posconsumo. Para llevar a cabo la verificación, AENOR estableció un esquema basado en la Norma UNE-EN 15343 de trazabilidad y evaluación de la conformidad del reciclado de plásticos y contenido reciclado (AENOR, 2020b).

En ese mismo año, AENOR certificó el contenido 100% de plástico reciclado PET en las botellas de Aguas Danone, siendo la primera compañía del sector de agua mineral natural en recibir la distinción por parte de AENOR. Por su parte, Aguas Danone prevé tener la certificación en todas sus botellas fabricadas con PET reciclado en 2025, y para ello realizaron el proyecto Renueva, disponiendo de la primera planta de selección de envases en Montcada y Reixac (Barcelona) (AENOR, 2020a).

Junto con ellos, Tetra Pak anunció la introducción de polímeros reciclados certificados, convirtiéndolo en la primera empresa de la industria del cartón en recibir esta certificación. La empresa incorporó dentro de sus envases de cartón polímeros reciclados, los cuales ya están disponible para los fabricantes de alimentos y bebidas como muestra la imagen 1. Además, se comprometieron a incluir un mínimo de 10% de contenido de plástico reciclado en los envases de cartón vendidos en Europa para el 2025 (TETRAPAK, 2021).

**Imagen 1.** Envase tetrapack con rPET

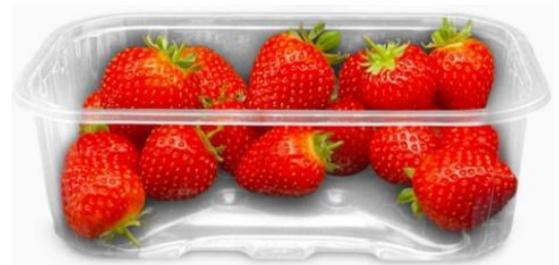
Fuente: Mundo PMMI, 2021



Por otro lado, Waddington Europe en alianza con Produce Packaging se encuentra fabricando envases mediante la tecnología denominada cojín monoair™, la cual consiste en un envase 100% monomaterial en base a punnets de PET 100% reciclados, eliminando la necesidad de burbujas separadas y conservando los recursos sin comprometer los estándares de calidad como muestra la imagen 2. Además, este envase es 100% reciclable después de su uso (WADDINGTON EUROPE, 2021; García, 2021a).

**Imagen 2.** Envase tarrina elaborada con rPET

Fuente: García, 2021



Sumado a las iniciativas anteriormente mencionadas se encuentra Via Nature, quien relanzó su línea de jugos en envases 100% PET reciclado como se observa en la imagen 3, reduciendo con ello un 47% la huella de carbono a través de la innovación (García, 2021c).



**Imagen 3.** Botella de jugo elaborada con rPET

Fuente: García, 2021

Finalmente, es necesario destacar a la empresa **Mondelez International**, la cual a partir de 2022 elaborará todo el packaging del queso Philadelphia, el que se aprecia en la imagen 4, fabricado en Europa con plástico reciclado (TECHPRESS, 2020).



**Imagen 4.** Envase queso Philadelphia con rPET

Fuente: García, 2021

García, (2021) menciona que actualmente existe una presión por parte de los consumidores en los aspectos relacionados con el impacto ambiental, ya que demandan soluciones sostenibles y reducción de plásticos para envasado. En ese contexto, PET reciclado (rPET) sería uno de los materiales más demandados ya que existen procesos de

súper limpieza autorizados por European Food Safety Agency (EFSA), y por ello, empresas como Nestlé, Danone, Borges, Chovi están incorporando porcentajes de rPET entre un 20 y 100% (García, 2021c).

En Chile la situación no es favorable, ya que se recicla menos del 10% del material PET que se consume, lo que obliga a importar material PET post consumo o reciclado. Todas las botellas que se fabrican son solo de material virgen, mientras que en mundo y en la mayoría de los países de Latinoamérica, utilizan mezclas de material virgen con material reciclado, por lo que Chile se encuentra al debe en esta materia (CENEM, 2019).

## **II. Aporte de conocimiento**

Dado que actualmente existen muchas investigaciones sobre PET en materia de reciclaje, se seleccionó el polipropileno (PP) y poliestireno (PS) posconsumo como objeto de estudio, dado que son las resinas más utilizadas en la industria del envase para la industria de alimentos seguido del PET.

Esta tesis fue elaborada en base a una revisión bibliográfica junto a un acotado estudio descriptivo de corte transversal, aportando así información procesada sobre la reciclabilidad mecánica, los efectos sobre las propiedades fisicoquímicas de los polímeros, la normativa vigente, migración química de los componentes de los plásticos posconsumo del PP y PS, la situación mundial en términos de legislación y la percepción actual de empresas nacionales e internacionales respecto a la utilización y barreras para el uso de materiales reciclados posconsumo.

Por lo tanto, este trabajo pretende ser una aproximación para los investigadores y a la industria de envases de alimentos, entregando información sobre diversos estudios e investigaciones que se han realizado hasta la fecha, mostrando de esta manera la realidad actual de Chile y el mundo, con la finalidad de generar un marco teórico para futuros desarrollos y tecnologías de procesamiento de PP y PS reciclado posconsumo para su aplicación industrial en envases destinados a estar en contacto con alimentos.

### **III. Hipótesis:**

Los residuos de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) reciclados mecánicamente posconsumo (rPP y rPS) son polímeros inocuos para la aplicación en envases en la industria de alimentos.

#### **III.1. Objetivo general:**

Analizar la factibilidad del uso potencial de los polímeros polipropileno (PP) y poliestireno (PS) reciclados mecánicamente posconsumo en la industria de envases de alimentos.

#### **III.2. Objetivos específicos:**

- Describir los efectos del reciclaje mecánico en las propiedades fisicoquímicas de los polímeros PP y PS reciclados posconsumo.
- Comparar la migración química de los componentes de los polímeros PP y PS reciclados posconsumo con los requisitos de las legislaciones nacionales e internacionales vigentes.
- Describir la situación actual de los polímeros PP y PS reciclados en la industria de envases de alimentos como materia prima para la elaboración de envases.

#### **IV. Metodología**

Como metodología de investigación, se decidió realizar una revisión bibliográfica, la cual se define según Coral (2016), como un análisis de documentos sobre un tema en particular. La selección del material bibliográfico ofrece líneas o tendencias de investigación, un panorama del tema y sus antecedentes, conceptos, aspectos relevantes del tema de estudio y dificultades o limitaciones que presenta la investigación (Coral, 2016). La revisión actual se llevó a cabo durante los meses de enero 2021 hasta diciembre 2021. El proceso de revisión se realizó mediante búsquedas electrónicas a través de las fuentes ISI Web of Science, Scopus, y ScienceDirect, junto con la plataforma de las Bibliotecas Digitales de la Universidad de Chile utilizando palabras claves como post-consumer recycled, plastics legislation, migration, polystyrene, polypropylene, food plastics. Para la búsqueda se consideraron como criterios de inclusión el año de publicación, seleccionando las publicaciones entre los años 2011 y 2022 y el tipo de artículo, incluyendo solamente los artículos de revisión y de investigación. Posteriormente, la selección de los artículos se realizó a través de la lectura de títulos, revisión de resumen, objetivos del estudio y resultados obtenidos, excluyendo los artículos que no se relacionaban con la industria de envase de alimentos, aquellos que utilizaban un tipo de gestión de residuos distinto al reciclaje mecánico y los que abarcaban materiales diferentes al PP y PS.

De manera complementaria, se utilizó la búsqueda manual en aspectos normativos y legislación y tecnología vigentes a través del buscador especializado Google Académico

junto con libros o publicaciones científicas que se consideren fundamentales para esta investigación, en idioma inglés y español.

Los documentos seleccionados se descargaron y se traspasaron a la plataforma MENDELEY, para eliminar referencias duplicadas.

Junto con ello, la revisión bibliográfica se complementó con un acotado estudio descriptivo de corte transversal, mediante la aplicación de un cuestionario. Se seleccionó este tipo de estudio puesto que los datos fueron obtenidos en un único momento, es decir, cuando se entrevistó a los profesionales y cuando contestaron el cuestionario, y no en instantes diferentes para comparar. El fin de la aplicación del estudio descriptivo fue conocer la percepción actual de las empresas que fabrican o utilizan plásticos PP o PS, en materia de reciclabilidad, normativa vigente y procesabilidad junto a la existencia de barreras actuales que pudiesen impedir el uso de estos materiales reciclados posconsumo. Para ello se contactaron empresas del rubro de alimentos y de plásticos en Chile y como criterio de selección se consideraron aquellas empresas que utilizan plástico como material de envase, específicamente PP y/o PS y aquellas que elaboran el material de grado alimenticio. El cuestionario consistió en 6 preguntas de carácter cualitativo las cuales se encuentran descritas en la figura 2.

Las preguntas se elaboraron con el fin de obtener información de desafíos o limitaciones existentes durante el proceso de reciclaje mecánico de plásticos posconsumo, tecnologías existentes de descontaminación de plásticos posconsumo, regulación a nivel nacional para aplicación de PP y PS reciclado posconsumo en envases destinados a estar en contacto

con alimentos, certificaciones existentes para envases elaborados con material reciclado y los vacíos legales y de investigación existentes que impiden fomentar o implementar el uso de PP y PS reciclado posconsumo actualmente.

Para la obtención de respuestas, se contactó a los encargados del área de packaging de las empresas de alimentos, o encargados de desarrollo en el caso de las empresas de plásticos vía videoconferencia, y las respuestas fueron complementadas con lo respondido por ellos en el cuestionario previamente enviado vía mail.

Los resultados del cuestionario se contrastaron con un informe elaborado por Polymer comply Europe sobre una encuesta realizada por la misma entidad en la industria europea, la que contó con la participación de 376 empresas de 21 países y fue diseñada para obtener información sobre las barreras que evitan que las empresas utilicen materiales plásticos reciclados

La información fue procesada, sintetizada y analizada obteniendo gráficos y Figuras los cuales exponen la información y resultados del trabajo de investigación.

## CUESTIONARIO TESIS

### **Estimado,**

Junto con saludar, lo invito a responder el presente cuestionario, el cual tiene por objeto recopilar información sobre el uso actual de plásticos reciclados posconsumo, especialmente de polipropileno (PP) y poliestireno (PS). Esto con el fin de desarrollar una tesis de Magister en Alimentos, Mención Calidad de Inocuidad, denominada “Reciclabilidad, normativa vigente y migración química de polipropileno y poliestireno posconsumo para su uso potencial en aplicaciones de envasado de alimentos”

Agradezco desde ya su tiempo y colaboración.

**Nombre:**

**Empresa:**

**Fecha:**

1. ¿Cuál es su experiencia en la industria de alimentos?, ¿hace cuánto tiempo se desempeña en el rubro de envases destinados a alimentos?
2. ¿Cuáles son los plásticos mayoritariamente utilizados en envases para la industria de alimentos?
3. ¿Qué desafíos y/o limitaciones presenta el proceso de reciclaje mecánico para plásticos posconsumo?
4. ¿Qué tecnologías se utilizan para la descontaminación del plástico post reciclaje mecánico?
5. ¿Es suficiente la regulación existente a nivel nacional e internacional sobre el uso y elaboración de envases con plásticos posconsumo?, ¿está regulado para el PS y PP?
6. ¿Existen actualmente certificaciones de envases elaborado a partir de plásticos reciclados posconsumo?
7. ¿Qué vacíos en materia de investigación o legislación nacional o internacional encuentra que existen actualmente para implementar el uso de plástico posconsumo en la industria del envase?

**Figura 2.** Cuestionario aplicado en estudio.

## **V. Desarrollo**

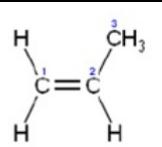
### **V.1.1 Polipropileno**

El polipropileno (PP) es actualmente una de las poliolefinas más comercializadas mundialmente, con una demanda global que alcanza alrededor de 55 millones de toneladas por año. Este termoplástico ha evolucionado enormemente, permitiendo obtener PP con características específicas, haciendo que este material forme no tan solo parte de los commodities, sino también de los polímeros de alta eficiencia (Caicedo, Crespo, Cruz y Álvarez, 2017; Gonzalez, 2015).

Las propiedades del PP dependen de sus características estructurales, conformacionales y moleculares. El peso molecular es una de las características relevante, el cual determina las propiedades del material como el comportamiento mecánico. Además, el grado de empaquetamiento de las cadenas genera una determinada cristalinidad, lo cual influye directamente en las propiedades térmicas como la temperatura de fusión ( $T_m$ ), temperatura de cristalización ( $T_c$ ), y temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) (Gonzalez, 2015).

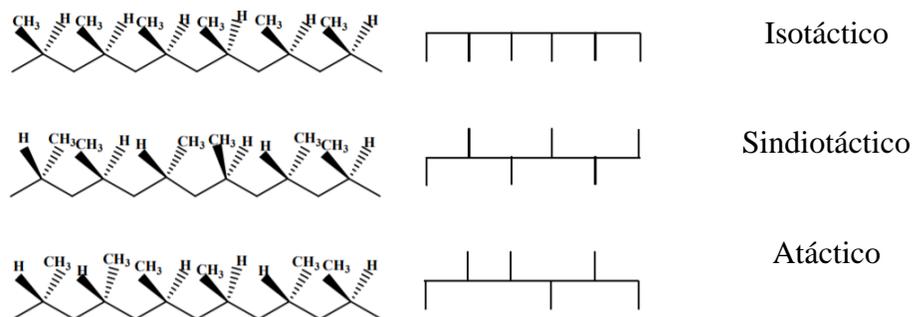
El PP se obtiene por polimerización a partir de propileno, el cual se encuentra como un gas incoloro, con masa molecular de 42,1 g/mol, punto de fusión  $-185,3^{\circ}\text{C}$ ,  $-48^{\circ}\text{C}$  como punto de ebullición y densidad de  $1.81 \text{ g/cm}^3$  a  $20^{\circ}\text{C}$  como lo muestra la Tabla 5.

**Tabla 5.** Propiedades fisicoquímicas generales del monómero de propeno.

Sinónimos	Propeno
Fórmula química	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Estructura química	
Estado físico	Gas incoloro
Masa molecular	42,1 g/mol
Punto de fusión /punto de congelación	-185,3 °C
Punto de ebullición	-48 °C
Densidad (a 20 °C)	1,81 kg/m <sup>3</sup> , 1,81 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: Bolívar, 2021

Estructuralmente, el PP en su cadena principal está formada exclusivamente por átomos de carbono, donde en uno de ellos posee un grupo metilo, el cual, según su orientación dará paso a PP estereorregulares definidos como PP Isotáctico (grupos metilos orientados siempre la mismo lado del plano), Sindiotáctico (grupos metilos que se alternan continuamente, a diferentes lados del plano de simetría), finalmente, si no existe regularidad en la orientación se conoce como PP Atáctico, como se observa en la Figura 3 (Galvis, 2014; Gonzalez, 2015).



**Figura 3.** Estereoquímica del polipropileno

Fuente: Gonzalez, 2015

De acuerdo con lo descrito por Galvis (2014) el polipropileno se clasifica en tres grupos.

- Homopolímero de polipropileno: Corresponde al polipropileno obtenido por la polimerización de propileno puro. Posee alta proporción de fase cristalina y su temperatura de transición vítrea de 0°C hacen que sus aplicaciones se dirijan a procesos de extrusión. Este material en el área de alimentos es recomendado para la fabricación de envases termoformados (tarrinas), envases para yogur, envases y platos desechables de alta rigidez y bajo peso, para envasado en caliente como muestra la imagen 5.



**Imagen 5.** Aplicaciones PP homopolímero

Fuente: Hitares, 2021

- Copolímero al azar, aleatorio o random: Corresponde al polipropileno con adición de un comonomero insertadas de forma aleatoria, buscando la ruptura de la estructura cristalina. Su ventaja es la transparencia y descenso de la  $T_m$ , esto hace que su aplicación este destinada para la fabricación de film como muestra la imagen 6.



**Imagen 6.** Aplicación PP random

Fuente: Mariano, 2011

- Copolímero de bloque: Corresponde al polipropileno formado por una matriz o fase homopolimérica y una segunda fase (entre 5 y 20% en peso) de naturaleza elastomérica, con un excelente balance impacto-rigidez como muestra la imagen 7. Su aplicación destaca en la industria automotriz, en la ortopedia.



**Imagen 7.** Aplicación PP copolímero

Fuente: Okmsl, 2021

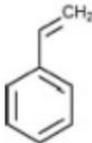
En el año 2018 el PP tuvo la mayor participación de mercado a nivel mundial entre las poliolefinas, lo que representa un aumento del 24% desde 2010 destacando entre los usos el envasado de alimentos (Jubinvillle et al., 2020).

### **V.1.2 Poliestireno**

El PS es uno de los polímeros termoplásticos que se usa ampliamente en diversas industrias. Características como el bajo costo, durabilidad, buena resistencia durante el procesamiento y moldeo, baja absorción de humedad y transparencia, lo convierten en un material atractivo para ser utilizado en la industria de envases (Pilevar et al., 2019).

Este polímero se polimeriza a partir de estireno, el cual posee un peso molecular de 104,15, un punto de congelación de  $-30,6^{\circ}\text{C}$ ,  $145,2^{\circ}\text{C}$  para el punto de ebullición y una densidad de  $0,9059\text{ g/cm}^3$  como lo muestra la Tabla 6, y ocupa el cuarto lugar entre los materiales plásticos, en la lista de polímeros a granel que se utilizan en la industria alimentaria (Pilevar et al., 2019).

**Tabla 6.** Propiedades fisicoquímicas generales del monómero de estireno.

Sinónimos	Cinnamene, etenilbenceno, feniletileno, estírol, vinilbenceno
Fórmula química	$\text{C}_8\text{H}_8$
Estructura química	
Estado físico	Líquido aceitoso
Masa molecular	104,15 g/mol
Punto de fusión /punto de congelación	$-30,6^{\circ}\text{C}$
Punto de ebullición	$145,2^{\circ}\text{C}$
Densidad (a $20^{\circ}\text{C}$ )	$0,9059\text{ g/cm}^3$

Fuente: Pilevar et al., 2019

Debido a que su estructura posee anillos aromáticos en la cadena polimérica, el PS es un material relativamente frágil y rígido, por lo tanto, para mejorar su flexibilidad se emplean copolímeros de PS que conducen a grados opacos endurecidos (Pilevar et al., 2019).

En la industria de envasado de alimentos, el PS se produce principalmente en forma de poliestireno de uso general (GPPS), poliestireno expandido (EPS) y poliestireno de alto impacto (HIPS).

El GPPS o poliestireno cristal procede de la polimerización del PS puro, dando lugar a un polímero completamente amorfo. Se caracteriza por ser liviano, rígido y frágil. Sin embargo, tiene poca resistencia a altas temperaturas, hasta los 95°C es vítreo y por encima de esa temperatura altera su forma (IRPEN, 2019).

Entre las principales características que define al GPPS se encuentra la fácil manipulación y conformado, donde las placas de GPPS permiten ser sometidas a un amplio abanico de técnicas de transformación como son el termoformado y conformado, inyección y extrusión, siendo considerado uno de los materiales más fáciles de procesar, pudiendo adoptar múltiples formas con mínimas contracciones de moldeo. Además, este material resalta por su elevada transparencia, brillo en superficie y absorción de agua (IRPEN, 2019). Entre sus aplicaciones se encuentran cucharas desechables como muestra la imagen 8.



**Imagen 8.** Aplicaciones GPS

Fuente: QuimiNet, 2007

Por su parte, el EPS está compuesto por monómeros de estireno que se procesan en rangos de temperatura entre 150-300°C, a una temperatura de procesamiento superior ocurre la despolimerización, pudiendo liberar estireno. Este polímero puede ser producido mediante copolimerización con otros monómeros como son los acrilonitrilo, butadieno, metilestireno, viniltolueno, divinilbenceno, acrilonitrilo, óxido de etileno, butadieno, éster de ácido acrílico, ácido metacrílico, ácido maleico, anhídrido, vinilétercrilamidametiloléter, metilacrilamidametilol y vinilisobutil éter (Pilevar et al., 2019) y durante el proceso de expansión, se genera un material de muy baja densidad, con una microestructura formada por cavidades. La aplicación del EPS gracias a sus propiedades aislantes corresponde a contenedores de comidas frías y calientes como muestra la imagen 9.



**Imagen 9.** Aplicaciones de EPS

Fuente: CENEM, 2016

Su composición es alrededor del 90% de aire y un solo 10% de plástico, lo que lo convierte en el material rígido de envase más liviano, por ende, el que utiliza menor cantidad de plástico por kilo de alimento envasado (CENEM, 2016)

Finalmente, el Poliestireno de alto impacto o HIPS se caracteriza por tener propiedades mecánicas mejoradas. Se trata de un polímero modificado por adición de polibutadieno con el fin de mejorar su resistencia al impacto, lo que provoca que su aspecto sea opaco; esta modificación da lugar a un material con excelente estabilidad dimensional. Entre las principales características se encuentra la fácil manipulación, pudiendo ser sometidas a procesos de transformación como corte, pulido, taladrado, técnicas de conformado e impresión. Además, posee una elevada resistencia al impacto y un peso muy liviano, su superficie es suave brillante y uniforme (Pilevar et al., 2019).

Cabe destacar que a escala microscópica el HIPS presenta una microestructura más compleja que el GPPS, esto se debe a que está constituido por un copolímero, que forma enlaces entre oligómeros de estireno y polibutadieno, lo que disminuye la tensión interfacial facilitando la compatibilidad y estabilidad de la mezcla. La microestructura superficial del HIPS posee menor cantidad de cavidades debido a que las micro fases elásticas del polibutadieno juegan el papel de amortiguadores del impacto, eliminando la fragilidad del PS homopolímero (Tutusaus, 2009). Entre sus aplicaciones se encuentran los envases de yogurt, bandejas como muestra la imagen 10.



**Imagen 10.** Aplicaciones de HIPS

Fuente: ADAPT, 2020.

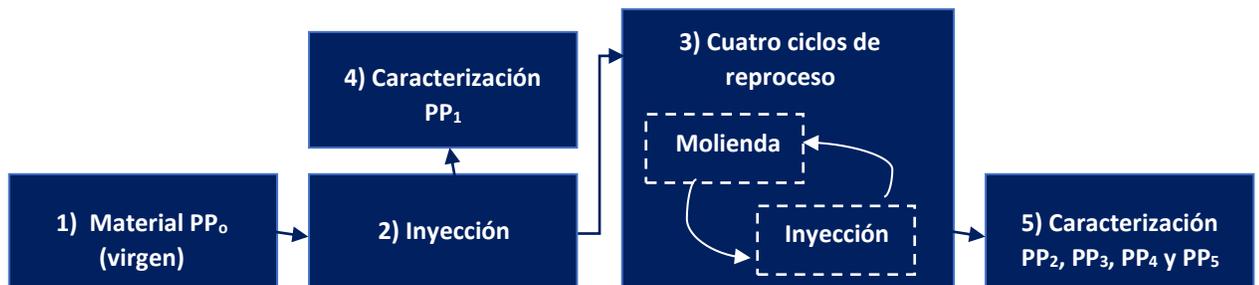
Entre los ejemplos de envases elaborados a partir de PS, se encuentran recipientes para productos como la miel, productos lácteos como leche fluida, crema, yogur, leche en polvo, helados y quesos, fruta confitada, jugos y bebidas, postres ensaladas, mermeladas, cajas de productos frescos, productos de comida rápida, carnes frescas y cocidas, margarinas, galletas y chocolates (Pilevar et al., 2019).

## **V.2 Reciclabilidad del Polipropileno y Poliestireno**

Diversos autores han estudiado la reciclabilidad de los plásticos. Entre ellos, se destaca estudio denominado “*Moving from linear to circular household plastic packaging in Belgium: Prospective life cycle assessment of mechanical and thermochemical recycling*” realizado en el 2021, el cual evaluó el ciclo de vida del reciclaje mecánico (RM) para cuatro fracciones de residuos plásticos (polipropileno (PP), poliestireno rígido (PS), poliolefinas mixtas rígidas (MPO), polietileno (PE)) recolectadas y clasificadas en Bélgica (Civancik-Uslu, et al., 2021)

En el estudio compararon el impacto ambiental del reciclaje mecánico respecto al proceso de incineración y los resultados mostraron que la disminución del impacto ambiental proviene principalmente de la sustitución de materiales vírgenes por productos reciclados mecánicamente en proporción 1:1, lo que significa que la producción de granulados vírgenes de PP y PS causan cargas ambientales más altas, determinando que el impacto de producir 1 tonelada métrica de granulado de PS virgen es 1,4 veces más alta que la producción de estireno virgen, mientras que la producción de 1 tonelada métrica de PP virgen muestra impactos 6,8 veces más que la producción el monómero (Civancik-Uslu et al., 2021).

Por otra parte, para conocer los efectos causados por del reproceso, se destaca el estudio realizado por Caicedo et al., (2017), en el cual se moldeó cinco veces por inyección PP en gránulos, con presión de inyección constante, temperatura de moldeo constante así también la velocidad de inyección, siguiendo la metodología descrita en Figura 4, donde el PP<sub>0</sub> corresponde al material virgen, mientras que PP<sub>1</sub> corresponde a la muestra en la primera inyección y 4 reprocesos PP<sub>2</sub>, PP<sub>3</sub>, PP<sub>4</sub>, PP<sub>5</sub> (Caicedo et al., 2017).



**Figura 4.** Etapas del método de procesamiento por molienda e inyección

Fuente: Caiceo et al., 2017

Para observar los efectos, el material virgen PP<sub>0</sub> fue sometido por Caicedo et al. (2017) a varios ciclos de calentamiento en un horno convencional a temperatura máxima de proceso por el tiempo de residencia calculado de manera teórica en base a variables como el peso del material inyectado, tiempo de ciclo, peso del material en barril con el fin de comparar los valores correspondientes a temperatura de degradación y temperatura de fusión ( $T_m$ ). Finalmente, determinaron valores de viscosidad, fluidez, densidad junto a la resistencia a la tracción y flexión.

El estudio mostró que todas las generaciones presentaron una buena estabilidad térmica con valores similares de temperatura de degradación al 5% de pérdida en peso en las muestras reprocesadas (variación entre 380°C y 330°C). Además, observaron un comportamiento térmico degradativo a medida que aumenta el número de reprocesos, con una pérdida del 13,6% para la quinta generación respecto al material virgen PP<sub>0</sub>, por esta razón, la  $T_m$  de las diferentes generaciones mostraron una disminución total de 2.6°C para PP<sub>5</sub> respecto a PP<sub>0</sub>, junto con ello, observaron menor presencia de dominios cristalinos, lo que indica que el reproceso favorece a la obtención de estructuras amorfas. Por otra parte, el índice de fluidez mostró un 155,4% de incremento en la quinta generación respecto al material virgen, representando la degradación en el material asociado con la disminución del peso molecular. Finalmente, el ensayo físico de densidad mostro una pérdida de 4,1% para PP<sub>5</sub> comparado con el material PP<sub>0</sub>, lo cual no es significativo (Caiceo et al., 2017).

En los resultados de las propiedades mecánicas, la muestra con mayor número de reprocesos (PP<sub>5</sub>) presentó un índice de pérdida de flexión de 6,0%, lo cual indica que los reprocesos no afectaron considerablemente la propiedad, mientras que el índice de Young para la misma muestra reveló un índice de pérdida de 9,0% comparado con el material inyectado una sola vez (PP<sub>1</sub>). Por otro lado, la resistencia a la tensión y elongación presentó un índice de pérdida de 8,4% para el último reproceso (PP<sub>5</sub>) (Caicedo et al., 2017).

El estudio anterior se condice con lo investigado por Galvis (2014), donde se caracterizó el material reciclado posconsumo (RPP) y se comparó con el material virgen (VPP). Para ello seleccionaron cerca de 8 kg de tapas negras del PP de productos alimenticios y de cosmética, luego se trituraron dando como resultado escamas del material, las cuales se lavaron con soda caustica al 2% y se secaron en horno. Los resultados de la comparación se resumen en la Tabla 7, y se observa la disminución del módulo de elasticidad en un 15,57%, disminución de la resistencia a la tracción en un 19,77% y la disminución de la densidad pasando de un 0,97 g/cm<sup>3</sup> a un 0,93 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 7.** Resumen propiedades VPP y RPP

Polímero	Propiedades mecánicas			Propiedades térmicas	Otras propiedades
	Módulo de elasticidad	Resistencia a la tracción	Alargamiento a rotura	Estabilidad al calor	Densidad
PP virgen	1746 MPa	38 MPa	7%	73°C	0,97 g/cm <sup>3</sup>
PP reciclado	1474 MPa	30,485	8%	70°C	0,93 g/cm <sup>3</sup>

Fuente: Galvis, 2014

Los resultados anteriores se refuerzan con lo expuesto por Jubinville (2020), ya que el autor señala que la comparación de los espectros IR obtenidos después de reciclar las poliolefinas, entre las que se encuentra PP, mostró una coincidencia en la mayoría de los espectros cuando son reciclados de forma mecánica, proponiendo que el reciclaje mecánico no produce ningún cambio significativo en la estructura química de los polímeros y afirma que la escisión de cadenas es la degradación dominante durante el proceso de extrusión, mientras que la oxidación solo fue detectada en cantidades menores (Jubinville, et al., 2020).

En las propiedades mecánicas, la estructura cristalina y las características de reticulación cambian durante el proceso de reciclaje. Jubinville (2020) relata que observaron una caída en el rendimiento mecánico, incluido el módulo de flexión, donde informa que el módulo de flexión y la dureza del PP aumentó producto del reciclaje mecánico, lo que puede atribuirse al efecto de la disminución del peso molecular y la reticulación. Investigaciones anteriores mostraron que para el PP las propiedades de flexión aumentan cuando el peso molecular disminuye, lo cual puede atribuirse a la reticulación de las cadenas por escisión de cadenas. Esto puede causar un aumento en la dureza superficial del PP con el aumento de ciclos de reextrusión a pesar de la reducción del peso molecular (Najafi, Mostazafadeh, Charharmahali y Tajvidi, 2009 citado en Jubinville et al., 2020).

Las propiedades térmicas se resumen en la Tabla 8, en donde la temperatura de fusión mostró una disminución de un 1,2% respecto al material virgen, a excepción de Najafi et al. (2009), quien informó un pequeño aumento al primer reproceso, pero en el segundo, la

temperatura disminuyó (Achilias, Antonakou, Roupakias, Megalokonomos y Lappas, 2008). La temperatura de cristalización mostró un aumento posiblemente por efectos de nucleación dado que los envases reciclados mostraron partículas dispersas en ellos (Bonelli et al., 2001; Pedroso y Rosa, 2005). Por otra parte, el porcentaje de cristalinidad también disminuyó pasando de un 42% a un 39% luego del reproceso (Achilias et al., 2008; Bonelli, Martins, Mano y Beatty, 2001; Najafi et al., 2009; Pedroso y Rosa, 2005)

**Tabla 8.** Propiedades térmicas del PP antes y después de reciclar.

Polímero	Propiedades térmicas		Autor
	Antes de reciclar	Después de reciclar	
	Temperatura de fusión °C		
PP virgen	165	163	(Achilias et al., 2008)
	168,6	171,8 (1) 171,4 (2)	(Najafi et al., 2009)
Residuos de PP	163	163	(Achilias et al., 2008)
PP posconsumo	166	163	(Bonelli et al., 2001)
	114	112,125	(Pedroso y Rosa, 2005)
	Temperatura de cristalización °C		
	117	128	(Bonelli et al., 2001)
	92	108,95	(Pedroso y Rosa, 2005)
	% de cristalinidad		
	42	39	(Pedroso y Rosa, 2005)
	Temperatura de degradación °C		
440	443	(Bonelli et al., 2001)	

Fuente: Jubinville, et al., 2020

### **V.3 Migración de los componentes de Polipropileno y Poliestireno reciclado posconsumo**

La migración de compuestos potencialmente tóxicos desde materiales plásticos a alimentos son de gran importancia ya que afecta a la idoneidad de los polímeros que se utilizaron para el envasado de alimentos. El estudio realizado por Jubinville et al. (2020) señala que los productos de degradación y los aditivos que pueden migrar a los alimentos durante el reciclaje mecánico influyen en la inocuidad de las poliolefinas, mostrando un aumento significativo con el aumento de los pasos del reciclaje para el PP. Para reafirmar lo señalado anteriormente, el estudio realizado por Su, Vera, Nerín, Lin y Zhong (2021) evaluó el uso potencial de poliolefinas recicladas para uso en contacto con alimentos, con foco en la inocuidad de ellos. Para ello tomaron muestras de cuatro empresas, una española y tres empresas chinas y evaluaron la migración de los materiales recolectados siguiendo el Reglamento de la UE (N° 10/2011) sobre materiales y artículos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos.

Su et al. (2021) realizaron el supuesto convencional de 6 dm<sup>2</sup> de superficie de contacto con 1 kg de alimento y utilizaron simulantes alimentarios como etanol al 95% para simular alimentos grasos y ácido acético al 3% para simular alimentos ácidos. Las pruebas las realizaron durante 10 días a 60°C como prueba estándar acelerada para almacenamiento prolongado a temperatura ambiente.

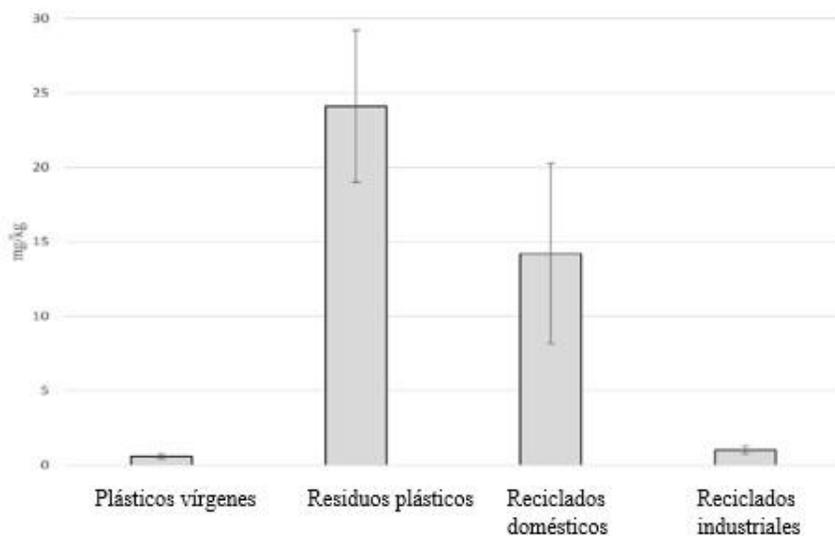
Los resultados identificaron tentativamente 475 migrantes provenientes de 15 poliolefinas recicladas entre la que se encontraban PP y PS donde el 39,2% de los

migrantes estaban relacionados con los alimentos y de la totalidad de migrantes, 53 de ellos se consideraron de alta preocupación. Si bien en la clasificación de toxicidad están considerados de baja toxicidad, la mayoría de estos componentes que se utilizan como aromatizantes en alimentos mostraron un promedio en sus concentraciones entre 0,03 y 0,36 mg/kg, lejos del límite (1.8 mg/kg), por lo que, si bien no presentan un riesgo para la salud, la alta migración puede alterar las propiedades organolépticas del alimento (Su et al., 2021).

Entre los compuestos que excedieron el límite de migración específica, detectaron octocrileno en el 60% de las muestras con concentraciones promedio del 0,17 mg/kg, valor 3 veces mayor que el límite (0,05 mg/kg) comparado con el reglamento UE 10/2011 el que es utilizado como foto estabilizador. Además, detectaron 1-tetradeceno y 1-dodeceno en niveles de migración entre 3 y 5 veces superior al límite de migración (0.05 mg/kg), lo cual fue reafirmado con estudios anteriores, los cuales mostraron que de cada 5 muestras de PP, 2 de ellas tenían una migración 3 veces mayor que el límite permitido (European Commission, 2011). Adicionalmente, en el estudio de Su et al. (2021) detectaron acrilato de dodecilo en el 40% de las muestras, el cual duplicó el límite de migración, 2,4-di-terc-butilfenol y éster dietílico del ácido tereftálico (1,4-acidobencenodicarboxílico), los cuales fueron de gran preocupación en la migración al simulante de 95% de etanol (alimentos grasos), mientras que para el simulante de ácido acético al 3% (alimento ácido), la bencenamina, el 2,4-dicloro y el ftalato de dietilo merecen más atención (Su et al., 2021).

Por último, en los aditivos agregados de manera no intencional, se informó que el isoborneol, utilizado como aromatizante, tenía un nivel de migración alto solamente en las muestras procedentes de China, lo que deja ver que existen contaminantes relacionados con la región (Su et al., 2021).

Adicionalmente, Pivenko (2016) estudió la migración de Cromo (Cr) como ejemplo en muestras de plásticos reciclados y vírgenes para mostrar las variaciones en la composición como herramienta de apoyo con el fin de optimizar el ciclo de reciclaje de plásticos (Pivnenko, Eriksen, Martín, Eriksson y Astrup., 2016). Para ello se recolectó muestras del PP, PS y EPS virgen, de residuos plásticos, reciclados domésticos e industriales y los resultados se resumen en la figura 5.



**Figura 5.** Concentración de Cr (mg/kg) en plásticos vírgenes, residuos y reciclados domésticos e industriales

Fuente: Pivnenko et al., 2016.

La Figura 5 muestra que la menor migración de Cr (cerca de 1 mg/kg) se obtiene para los plásticos vírgenes y los reciclados industriales. Los residuos y reciclados domésticos muestran concentraciones de Cr en promedio 24 y 14 mg/kg respectivamente. Este aumento podría estar relacionado con el uso o la migración en la recolección (Pivnenko et al., 2016).

#### **V.4 Situación actual del uso de material reciclado y perspectivas futuras**

En términos de legislación, en la actualidad no existe legislación para plásticos rPP y rPS posconsumo para la elaboración de envases destinados a estar en contacto con alimentos a nivel mundial. Sin embargo, debido a la preocupación mundial por el uso de plástico, se han desarrollado iniciativas para gestionarlos.

The UK plastics pact o pacto del plástico es una iniciativa pionera y colaborativa que busca promover la economía circular. Este pacto reúne a empresas de toda la cadena de valor del plástico con el Gobierno del Reino Unido y ONGs para abordar la problemática de los residuos plásticos. Entre las metas, se encuentra lograr para el 2025, el 100% de los envases sea reutilizable, reciclable o compostable (WRAP, 2021). Por otra parte, la FDA ha creado una guía de recomendaciones del uso de plásticos reciclados, la cual sirve como una primera aproximación para la aplicación de estos materiales.

En la guía de recomendaciones, la FDA (2021) señala que la exposición del consumidor a los contaminantes químicos de envases de alimentos producidos a partir de plástico procesado por reciclaje secundario o terciario debería ser extremadamente bajo, debido a

la dilución que sufren durante el proceso de reciclaje. Sin embargo, menciona la posibilidad que rastros de contaminantes tóxicos se transporten en el proceso de reciclaje secundario o terciario y se conviertan en parte del envase y, por ende, migren a los alimentos siendo un peligro para el consumidor.

Por lo anterior, la FDA (2021) desarrolló recomendaciones para los niveles máximos aceptables de contaminantes residuales en el material reciclado, considerando que la ingesta diaria estimada (IDE) artículos reciclados en contacto con alimentos del orden de 1,5 microgramos / persona / día (0,5 ppb) o menos son de riesgo insignificante. Considerando que el polímero estará en contacto con todo tipo de alimentos y que el envase terminado estará elaborado en base a polímero 100% reciclado, se establece como límite máximo residual para PS, 300  $\mu\text{g}/\text{kg}$  y 320  $\mu\text{g}/\text{kg}$  para PP como lo muestra la Tabla 9.

**Tabla 9.** Residuo máximo permitido por polímero reciclado

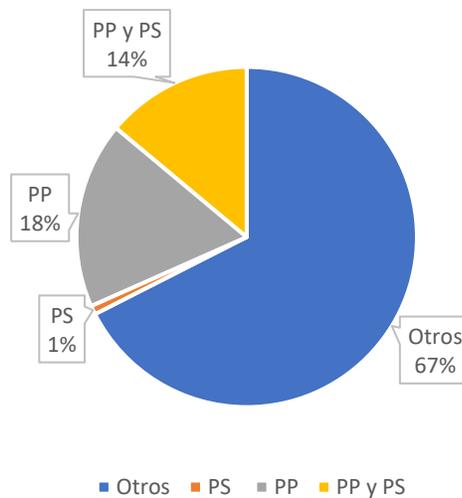
<b>Polímero reciclado</b>	<b>Densidad <math>\text{g}/\text{cm}^3</math></b>	<b>Residuo máximo permitido</b>
<b>PET</b>	1,4	220 $\mu\text{g}/\text{kg}$
<b>PS</b>	1,05	300 $\mu\text{g}/\text{kg}$
<b>PVC</b>	1,58	200 $\mu\text{g}/\text{kg}$
<b>Poliiolefinas (PP)</b>	0,965	320 $\mu\text{g}/\text{kg}$

Fuente: FDA, 2021

En Chile no existen normas al respecto, ni instancias técnicas reconocidas a nivel nacional e internacional, que puedan apoyar al sector público y privado en estas materias. Además, la mayoría de las empresas del sector son pequeñas o medianas, con dificultades para

abordar temas de I&D por si solas (Galotto, 1997) Sin embargo, es importante destacar a la Industria de Envases Typack S.A, la cual trabaja con rPET para fabricar envases para fruta de exportación, siendo una primera aproximación al reciclaje a nivel nacional.

Adicionalmente, para tener una idea sobre el panorama actual en materia del uso de material reciclado, se realizó un listado EucertPlas, la certificación de plásticos reciclados, la cual posee 237 compañías recicladoras certificadas, dentro de las cuales 77 compañías trabajan con los polímeros PS y PS. En un listado actualizado al 04/10/2021, resumidas en el Anexo 2 se puede observar que el 33% de la totalidad de compañías recicla PP y/o PS, un porcentaje minoritario. De ellas, el 18% recicla PP, seguido de un 14% que recicla ambos polímeros y solamente el 1% trabaja con PS como muestra la Figura 6.



**Figura 6.** Compañías recicladoras certificadas por EucertPlas que trabajan con PP y PS.

Por otro lado, entre enero y septiembre del 2018 se llevó a cabo una encuesta sobre el uso de materiales plásticos reciclados (rPM) por parte de empresas transformadoras de plásticos. Esta encuesta incluyó la participación de 376 empresas de 21 países diseñada para obtener información sobre las barreras que evitan que las empresas utilicen materiales plásticos reciclados. Para ello se diseñaron 13 preguntas en línea con la finalidad de asegurar la alta participación y alcance de la encuesta. Los participantes forman una muestra adecuada en la industria Europea de plástico, donde el sector del envase constituye la mayor parte, con el 55% de los participantes en el campo (Polymer Comply Europe [PCE], 2019).

Los tipos de polímeros utilizados por las empresas encuestadas reflejan el estado de la industria. El polietileno y el polipropileno son los polímeros más utilizados, seguidos de polietilentereftalato y poliestireno (PCE, 2017).

En una primera etapa, en la encuesta realizada por PCE (2017) identificó que el 59% de los encuestados afirmó que es difícil o muy difícil conseguir plásticos reciclados que cumplan con las especificaciones de los clientes, contrario al 16% que afirmó que es fácil o muy fácil para ellos.

Al consultar sobre la obtención de rPM, los participantes mencionaron que encuentran dificultades para encontrar un suministro constante en cantidad suficiente, donde más del 58% afirmó que era difícil o muy difícil, contrario al 15% que afirmó ser fácil para ellos (PCE, 2017).

Además, se preguntó a los encuestados por el apoyo técnico proporcionado por los proveedores que incluye el asesoramiento general hasta el cumplimiento y seguimiento. En este punto, el desacuerdo supera al acuerdo, donde más del 46% declara no recibir los conocimientos técnicos necesarios (PCE, 2017).

En una segunda etapa, al consultar sobre las principales barreras sobre el uso de rPM el resultado de la encuesta mostró que el 74% de los participantes afirmó que la principal razón que impide utilizar materiales plásticos reciclados era la mala calidad. El 39% afirmó que el principal motivo para no utilizarlos es la inestabilidad del suministro. En ese contexto, cuando consultaron por las medidas adecuadas para aumentar la calidad de las rPM, el 76% de los encuestados afirmó que mejorar la recopilación y clasificación de desperdicios sería la mejor alternativa. Seguido de esto, otras medidas incluyen la inversión en tecnología de reciclaje con el 53% y la implementación de un mejor diseño para el reciclaje con un 29% (PCE, 2019).

Sin embargo, los convertidores de plásticos están tomando medidas para mejorar la calidad de los materiales reciclados. El 57% de los encuestados trabajan junto con los recicladores, el 42% diseña sus productos pensando en el reciclaje y en total, el 80% de todos los encuestados están tomando una o ambas medidas (PCE, 2019).

Una segunda encuesta realizada en el mismo contexto, pero dos años después, mostró que, sin una fuerte demanda de polímeros reciclados por empresas de conversión, el mercado de plásticos reciclados no puede crecer. De los encuestados, el 53% está comprando

materias primas que incluyan un porcentaje de materiales plásticos reciclados, mientras que el 47% afirmó no comprar ninguno (PCE, 2019).

Por otra parte, las empresas que incluyen rPM mencionaron que la reproducibilidad insuficiente de las propiedades de un lote a otro es una dificultad actualmente, además de las propiedades mecánicas insuficientes (36%) y funcionalidades limitadas, los problemas estéticos y visualmente juegan el rol más importante en la decisión de uno utilizar rPM. El 39% de los encuestados afirma que el color de rPM es un problema que les impide utilizarlas en mayor cantidad, mientras que el 31% afirma que el problema es el olor que proporcionan las rPM en el producto terminado (PCE, 2019).

Las preguntas referentes al marco regulatorio mostraron que el 41% de los encuestados está de acuerdo con la afirmación que incluir estándares de calidad a nivel europeo o nacional en materia de plásticos reciclados, estimularían un mayor uso de rPM por parte de la empresa, y un 57% mencionó que la normativa actual no se adapta a la realidad de producción y no apoyan el uso de una cantidad mayor de rPM en el futuro (PCE, 2019).

En el caso del cuestionario realizado a empresas chilenas, este mostró una situación similar a la presentada por la encuestas PCE (2017) y PCE, (2019) donde al consultar por las limitaciones o barreras para incluir plástico reciclado dentro de los envases utilizados, el 100% de los participantes mencionaron que la principal dificultad corresponde a las características que posee el material reciclado y a su proceso de recolección, ya que actualmente la cadena de reciclaje está poco desarrollada en el país y además,

mencionaron que la calidad del plástico reciclado era inferior al material virgen debido a la escisión de cadenas por el proceso de reciclaje al que son sometidos.

Otra barrera importante que mencionaron los participantes fue el suministro del polímero reciclado, ya que, al no tener un único proveedor del plástico, se espera obtener material que lleve ocluido polvo, trazas de alimentos, sea no transparente, brillante, coloreado o con otras características, en resumen, material de diferentes calidades. Junto con ello, aparece la multimaterialidad como otro desafío, donde las mezclas de polímeros utilizados en los envases multicapa dificulta el reciclaje de los envases, es por ello, que las empresas están empezando a mirar envases monolaminados, con el fin de facilitar el reciclaje y apuntar a la incorporación de ellos de manera futura. Además, mencionaron que la situación actual del plástico chileno es poco favorable para los productores del material virgen, ya que los polímeros son comprados e importados desde Estados Unidos y debido a la situación de pandemia por COVID-19, ha bajado el consumo de propileno y por ende PP, ya que hubo un aumento en la demanda de bencina, gas propileno y gas licuado, y, dada esta situación el precio de la resina virgen aumenta.

Por otra parte, al consultar por tecnologías existentes para la descontaminación de plásticos, los encuestados mencionaron que Chile no disponían actualmente de ninguna tecnología eficiente ni certificada para ello, y por esta razón, todo el plástico reciclado va destinado a uno no alimentario. Junto con ello, indicaron que el procesamiento del material reciclado posconsumo implicaría el cambio de maquinaria utilizado actualmente para envasar, y que, si esto se hiciera con la maquinaria actual, debido a que el material

es más flexible, el envasado sería más lento y bajaría la producción, traduciendo todo esto a costo monetario.

La pregunta de regulación existente a nivel nacional sobre el uso y regulación de plásticos posconsumo mostró que no existe regulación en Chile, en más, que el Reglamento Sanitario de los Alimentos prohíbe el uso de estos plásticos reciclados. De forma similar, al consultar por certificaciones de envases elaborados a partir de plásticos reciclados posconsumo en Chile, indicaron que no poseen organismos certificadores de este tipo de envase.

Finalmente, al consultar por los vacíos en materia de investigación o legislación para la implementación del uso de plásticos posconsumo en la industria de envases de alimentos, los encuestados mencionaron que el vacío es la nula regulación respecto a estos temas, y mostraron recelo en la incorporación de materiales reciclado en los envases, ya que consideran que añadir plástico reciclado al envase afecta la confianza del consumidor.

### **V.5 Tecnologías disponibles para el reciclaje de plásticos**

La tecnología es un aspecto clave para poder reciclar los materiales, con ella se maximiza la calidad del polímero y se reduce significativamente los costos operativos y de mantenimiento, siendo una vía para la transformación de recursos y acelera la transición hacia la economía circular (García, 2021b). Mientras que los desechos plásticos industriales pueden tratarse mediante reciclaje mecánico obteniendo un material de alta

calidad reutilizable como materia prima, los residuos posconsumo y domésticos tienen un alto contenido de contaminantes que se absorbe en la matriz polimérica (OTRI, 2021b).

Los contaminantes que se pueden eliminar con el método mecánico convencional son mayoritariamente impurezas físicas como son tierra, polvo, restos orgánicos superficiales. Sin embargo, en el caso de las impurezas químicas dentro de la matriz de plástico y contaminantes adheridos a la superficie de este como es el uso de adhesivos (etiquetas de papel) la tecnología no está desarrollada lo suficiente (OTRI, 2021b).

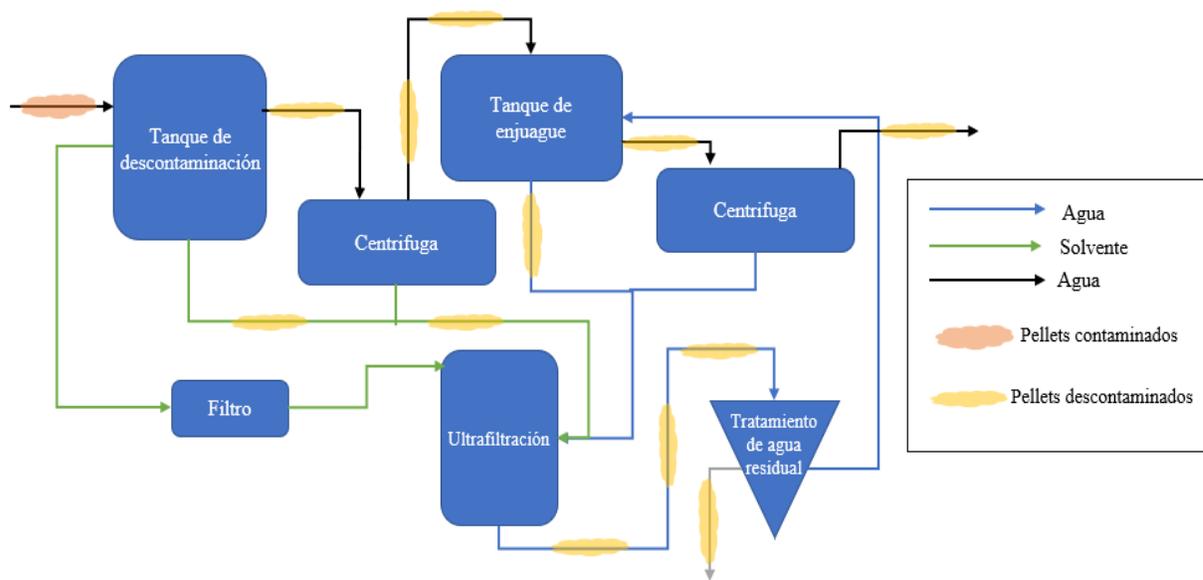
De las tecnologías patentadas hasta la fecha, prácticamente todas tienen limitaciones y ninguna de ellas cubre la necesidad de disponer un procedimiento para eliminación de contaminantes orgánicos NIAS (sustancias añadidas no intencionalmente) (OTRI, 2021b). Es por ello por lo que, con el objetivo de mejorar el proceso del reciclaje, se están investigando nuevas tecnologías las que incluyen extrusión reactiva para la mejora de propiedades, deslaminación de envases multicapa, extrusión con fluidos supercrítico, descontaminación para la eliminación de contaminantes y su posible uso en packaging alimentario (García, 2021b). En este último punto destaca una tecnología patentada por la Universidad de Alicante con el grupo de investigación de Ingeniería para la Economía Circular (I4EC), quienes desarrollaron un procedimiento para la eliminación de contaminantes orgánicos NIAS en materiales plásticos reciclados, el cual trabaja a presión atmosférica utilizando un agente extractor no volátil y soluble en agua. Este procedimiento comprende las etapas de selección, trituración, lavado, enjuague, secado y descontaminación.

El procedimiento de descontaminación de plástico reciclado consiste en las siguientes etapas como muestra la Figura 7.

1. Separación y trituración del plástico: La separación se puede llevar a cabo mediante técnicas de identificación como NIR, MIR, termografía de infrarrojos, LIBS o fluorescencia de rayos X. Mientras que la trituración se lleva a cabo mediante un triturador de cuchillas, con un molino o triturados criogénico, con el objeto de disminuir el tamaño del material hasta escama o polvo.
2. Lavado: Esta puede realizarse con o sin surfactantes, además, se pueden utilizar agentes oxidantes para eliminar las impurezas superficiales.
3. Enjuague y secado: Se realizan de forma mecánica
4. Descontaminación: Se realiza en el módulo de descontaminación, donde se eliminan los contaminantes y aditivos presentes en el plástico reciclado.
5. Sistemas de recuperación de agua y recuperación del agente extractor: La recuperación del agua puede llevarse a cabo mediante ultrafiltración y floculación-decantación o mediante cristalización y flocuación-decantación. La recuperación del disolvente se realiza mediante membrana de ultrafiltración y posterior filtrado, esto con el fin de poder recircular y reutilizar, haciendo el procedimiento sostenible.

La etapa novedosa de este proceso es la descontaminación, la cual se realiza de manera independiente al proceso de reciclado convencional, de forma que su input o entrada puede

ser plástico ya reciclado proveniente de otros recicladores, por lo tanto, es un sistema de mejora de la calidad del producto reciclado (upgrading).



**Figura 7.** Diagrama esquemático de la unidad de descontaminación y recuperación del extractor

Fuente: OTRI, 2021b

Esta tecnología permite eliminar sustancias contaminantes presentes en los plásticos reciclados y así mejorar la calidad de estos para usos industriales.

Junto con ello, se encuentra a la vanguardia otro procedimiento para la eliminación de tinta impresa de filmes de plástico. (OTRI, 2021a), el cual tiene como objetivo valorizar las mermas generadas durante el proceso de fabricación debido al ajuste de los parámetros de la máquina de impresión, como es el ajuste de los colores utilizados, para conseguir la

calidad requerida. (OTRI, 2021a). Actualmente, este tipo de material se valoriza para su reciclado mediante procesos en los que no se elimina la tinta impresa. De esta manera se obtiene un film coloreado de baja calidad y con escaso valor, donde los procesos industriales no ofrecen soluciones al problema (OTRI, 2021a).

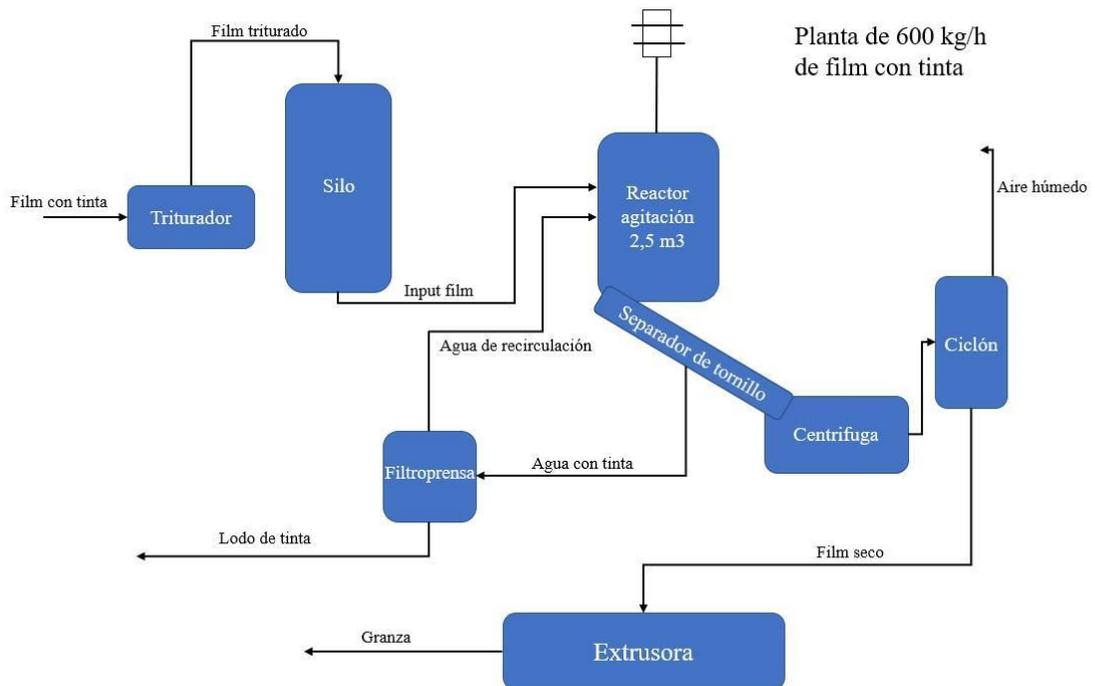
Para resolver la problemática mencionada, el grupo de Residuos, Pirolisis y Combustión aporta una solución global, logrando eliminar la tinta contenida en el film plástico mediante la utilización de tratamientos fisicoquímicos. De este proceso se obtiene un producto libre de tinta apto para ser reciclado en cualquier aplicación, debido a su gran calidad y pureza como se observa en la Figura 8 (OTRI, 2021a)

En una primera etapa del proceso se lleva a cabo un acondicionamiento del material, posteriormente una segunda etapa en la cual el material es triturado a un tamaño adecuado para su posterior limpieza. En una tercera etapa, se lleva a cabo la eliminación de tinta del film impreso en un sistema de limpieza formado por tanques de limpieza y de lavado (OTRI, 2021a).

El material triturado pasa al tanque de limpieza al cual se le añade agua y agentes de limpieza. Durante el proceso de limpieza se extrae en continuo la tinta que se retira del film a partir de una corriente de agua que contiene la solución de limpieza la tinta. Luego, se llevan en paralelo distintas etapas. Por un lado, el lavado y secado del film y por otro la recuperación de la solución de la limpieza y del pigmento (OTRI, 2021a).

La cuarta etapa consiste en pasar el film triturado y tratado con la solución de limpieza a un tanque de lavado con el fin de retirar completamente los residuos de tinta y de solución

de limpieza. En la quinta etapa, a partir de la solución de limpieza generada en el tercer paso, se separa la tinta y la solución de en dos corrientes. La solución puede reutilizarse en el proceso y la tinta puede ser tratada para la recuperación del pigmento (OTRI, 2021a). La sexta etapa consiste en la recuperación del pigmento. Por último, después del lavado del film de la cuarta etapa se eliminan los restos de agua del film plástico mediante secado, obteniendo un film seco de alta calidad apto para su reutilización como materia prima.



**Figura 8.** Esquema de una posible planta para el procesamiento de 600 kg/h.

Fuente: OTRI, 2021a

Adicionalmente, sumando a las tecnologías expuestas anteriormente, el Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística [Itene] aplicará nuevos tratamientos de descontaminación y procesos de identificación de polímeros, utilizando marcadores no detectables a simple vista, los que se activan bajo la luz ultravioleta (UV) y son compatibles con la tecnología infrarroja (NIR). Estos marcadores permiten identificar y facilitar el reciclaje de envases plásticos mediante la clasificación en función de su origen y naturaleza. (García, 2020). Los compuestos se aplican como recubrimientos o directamente en la matriz polimérica tanto virgen como reciclada, y abarcan materiales convencionales, compostables y en distintos formatos (film y bandejas) (García, 2020).

Este desarrollo tecnológico permite adaptar el uso de marcadores según las necesidades específicas del material de envase, aplicación y entorno real, y permitirá conseguir corrientes de residuos más limpias, eliminando materiales indeseados. Además, generará circuitos de reciclaje los cuales asegurarán la trazabilidad y disponibilidad de materia prima de alta calidad (García, 2020).

Todas las tecnologías mencionadas permitirán optimizar el proceso de reciclado y potenciar el reciclaje de otros materiales que resultan más difíciles de descontaminar debido a una mayor migración como es el caso del PP y PS (García, 2020).

## **VI. Discusión**

### **Reciclabilidad del PP y PS**

Los estudios exponen los beneficios de la sustitución de materiales vírgenes por materiales reciclados mecánicamente, lo que es confirmado por los autores como (Civancik-Uslu et al., 2021) confirmando que el reciclaje mecánico es una alternativa viable para combatir el desperdicio no ecológico Sin embargo, se observó que el reciclaje involucra un comportamiento térmico degradativo a medida que aumenta el número de reprocesos, por la exposición a temperaturas altas durante el reproceso a la que está sometido el polímero. Traducido a cifras, los autores cuantificaron la degradación térmica como una pérdida del 13,6% para la quinta generación respecto al material virgen PP<sub>0</sub> y la disminución en la temperatura de degradación al 5% en las muestras reprocesadas. Además, observaron un comportamiento térmico degradativo de las propiedades fisicoquímicas del PP y PS posconsumo, conforme al aumento del número de reprocesos. Esto implica que el peso molecular de los polímeros reciclados PP y PS disminuye en comparación al material virgen, debido a la escisión de cadenas que sufre el polímero durante el tratamiento termo mecánico (Caiceo et al., 2017; Jubinville, et al., 2020).

Junto a ello, los resultados muestran una pérdida del módulo de flexión de 6,0%, una pérdida en el índice de Young, en un 9,0% y la disminución de la resistencia a la tensión y elongación en un 8,4% para el último reproceso, lo que indica que el aumento de reprocesos no afecta considerablemente estas propiedades de los materiales poliméricos

estudiados. Los estudios de los autores Achilias et al. (2008) Bonelli et al. (2001) y Pedrozo y Rosa (2005) mostraron una disminución de la temperatura de fusión para el PP virgen, los residuos de éste y para el PP posconsumo. Además, los autores coinciden en el aumento del índice de fluidez como la mayoría de los estudios y literatura, lo significa que la reextrusión provoca cambios significativos en la estructura del material y se obtiene como resultado de la degradación de las cadenas del polímero por el ciclo térmico y del estrés cíclico, la disminución en el peso molecular y la tendencia que presentan las cadenas poliméricas cortas a fluir progresivamente en el material reprocesado.

El comportamiento de los polímeros frente al procesamiento termo mecánico nos llevaría a presumir que el reciclaje favorece a estructuras amorfas o semicristalinas. Sin embargo, dado que los polímeros se obtienen de diversas fuentes, han estado expuestas a diversas condiciones de almacenamiento y reprocesamiento, pueden exhibir diferentes comportamientos y desempeños por el historial térmico mecánico que poseen, por lo que estandarizar el proceso de reciclaje sería uno de los primeros pasos para promover el reciclaje (Jubinvill, et al., 2020).

### **Migración del PP y PS reciclado posconsumo**

En términos de migración el estudio realizado por Pivenko et al. (2016) muestra que la migración de ambos polímeros reciclado domésticamente (PP y PS) aumentó en comparación al plástico virgen, lo cual puede ser atribuido al uso o a la contaminación durante la recolección. Además, los resultados del estudio realizado por Su et al. (2021) mostró que el 39,2% de los migrantes estaba relacionado con alimentos (ya sea como

aditivos o como componentes alimentarios) y de ellos la gran mayoría de los migrantes no presenta un riesgo para el consumidor según el estudio, pero podrían influir en las propiedades organolépticas de los alimentos en contacto. Este resultado se correlacionó con lo expuesto por la FDA (2021) ya que la dilución de los compuestos químicos al momento de ser reciclados logra disminuir la concentración del migrante en el envase final. Además, 107 migrantes (22,6%) fueron relacionados con envases plásticos y un porcentaje mínimo de migrantes se consideraron de alta preocupación entre ellos ftalatos y clorobenceaminas, los cuales pueden ser tóxicos. Esto muestra que la principal fuente de contaminación serían los aditivos y componentes alimentarios por sobre el envase, pero que, al existir un porcentaje mínimo de migrantes tóxicos, es necesario realizar pretratamientos a los materiales posconsumo para poder reciclarlos y ser potencialmente utilizados para estar en contacto con alimentos.

Es necesario destacar que la resolución del 2 de septiembre del año 2020 del Reglamento de la Unión Europea 2020/1245 (Reglamento UE 2020/1245, 2020), adoptó un dictamen científico favorable sobre el uso de complejos de sales isoestructurales de ácido tereftálico con lantánidos lantano (La), europio (Eu), gadolinio (Gd) y terbio (Tb), utilizados por separados o combinados en diferentes proporciones, como aditivos en plásticos de grado alimenticio. La Autoridad concluyó que estas sales no presentarían problemas de inocuidad siempre cuando se utilice como aditivos en polímeros polietileno, polipropileno o polibuteno de grado alimenticio, con todos los tipos de alimentos con condiciones de contacto de hasta 4 horas a 100°C o a temperatura ambiente en condiciones de larga duración (no perecibles), ya que si se

produjera migración a partir del material plástico, los lantánidos deberían estar presentes en el alimento o el simulante en forma de iones disociados y la suma de la migración de los cuatro iones lantánidos (La, Eu, Gd, Tb), usados de manera combinada o separada, no debería superar los 0,05 mg/kg del alimento, valor considerado como inocuo para el consumidor, por lo que podrían ser utilizados de manera segura en los polímeros mencionados.

Por otra parte, Su et al. (2021) encontró migración de isoborneol solamente en muestras de procedencia China, lo que indica que existen contaminantes relacionados con la región de origen, lo que podría ser una complicación a la hora de importar material reciclado, por la variación de contaminantes que tendrían las muestras. Esto se relaciona con el potencial de contaminación en los flujos de residuos, el cual hace que el proceso de clasificación y separación de materiales plásticos sea la principal limitación del reciclaje mecánico.

En el estudio realizado por Pivnenko (2016) es necesario resaltar que en el caso de los residuos posconsumo (reciclados domésticos) y los reciclados industriales se obtuvieron directamente de productores, en cambio, los residuos plásticos, se recolectaron desde un municipio, el su recolección contiene fracciones segregadas en origen y de manera manual, lo que indica que la fuente de recolección es un factor primordial por la contaminación cruzada que sufren los materiales. Además, se puede deducir que reciclar de mala manera es peor que no reciclar, ya que la diferencia en concentraciones de residuos plásticos y reciclados domésticos también puede estar influenciada por la no estandarización del proceso y el desconocimiento de los consumidores.

## **Situación actual del uso de material reciclado y perspectivas futuras**

En términos de legislación, no existe normativa vigente a nivel mundial para implementar y/o potenciar el uso del PP o PS reciclado posconsumo, razón por la cual no se encontraron envases destinados a estar en contacto con los alimentos elaborados con los polímeros reciclados. Esto se condice con el panorama de compañías recicladoras de PS o PP con grado alimenticio, ya que en el caso de EucertPlas (2021), el 33% de las compañías trabaja con PP y/o PS, pero ninguna de ellas posee aplicaciones para estar en contacto con alimentos. Esto da un primer acercamiento, visualizando la escasa cantidad de compañías potenciales para suministro de materiales reciclados. Es por ello, por lo que la ausencia de una legislación armonizada obstaculiza innecesariamente el mercado, generando confusión, incertidumbre y desconfianza por parte de la industria y de los consumidores.

Además, la comparación de la encuesta realizada por PCE (2017), PCE (2019) y el cuestionario a las empresas chilenas, mostró altos puntos de convergencia entre sí. Los encuestados estaban de acuerdo en la premisa de la dificultad actual que poseen para obtener plásticos reciclados con la calidad necesaria para elaborar los envases actuales y con un suministro constante, esto se debe a que los sistemas de recolección y clasificación no se encuentran estandarizados, y estas fluctuaciones impiden a los recicladores la capacidad de proporcionar al mercado el suministro constante y homogéneo. A su vez, la industria del reciclaje carece de niveles de transparencia y trazabilidad, por lo tanto, todas estas variables en el suministro ocasionan que las industrias duden en depender de materias primas recicladas posconsumo (PCE, 2017, 2019).

No obstante, un punto de discrepancia corresponde a las medidas para mejorar la calidad de materiales reciclados, donde las encuestas PCE (2017) y PCE (2019) mostró que la mayoría de los encuestados está trabajando con recicladores o diseña sus productos pensando en el reciclaje de materiales posconsumo, mientras que en Chile, al no existir leyes vigente en temas de incorporación de plásticos posconsumo en los envases de alimentos y sumado a la percepción de inseguridad y/o rechazo de los consumidores y los productores, quienes creen que el plástico reciclado es inferior al obtenido a partir de materiales vírgenes, hacen que la industria alimentaria chilena no lo vea como un desafío a corto plazo. Es por ello por lo que la introducción de normas y esquemas de certificación podría resolver el problema de las diferentes calidades y cantidades obtenidas de suministro y a la vez fortalecería el mercado secundario de materias primas (PCE, 2017, 2019).

Finalmente, los encuestados hacen referencia a la situación económica nacional e internacional, donde la pandemia de COVID-19 en la que nos encontramos inmersos ha encarecido las fuentes de obtención de las materias primas. Particularmente, para Chile, ya que la importación de los materiales implica un costo mayor a causa del alza de la bencina, gas propileno y gas licuado. Este panorama hace que Chile deba buscar alternativas para hacer frente a la problemática, donde una posible solución podría ser la diversificación de fuentes de material, promoviendo las empresas de reciclaje junto con la incorporación de material reciclado a los productos o la migración hacia envases monomaterial, para facilitar la calidad del suministro. Sin embargo, cada una de las

alternativas planteadas requieren ser estudiadas a detalle, determinando la viabilidad de ser aplicadas en relación con los costos y escalabilidad industrial.

### **Tecnologías de descontaminación de plásticos**

Se constata que existen desafíos en áreas claves para lograr la rPP y rPS con grado alimenticio. Por esta razón, los investigadores están al tanto de los problemas de reciclabilidad de los plásticos y se observa el desarrollo de tecnologías disponibles para potenciar el uso de polímeros reciclados, como lo es el procedimiento de descontaminación de plásticos reciclado (OTRI, 2021b), la tecnología para la eliminación de tinta impresa de film de plástico (OTRI, 2021a) y los marcadores no detectables a simple vista para facilitar el proceso de identificación y reciclaje en función de origen y naturaleza (García, 2020). Estas tecnologías podrían resolver una gran problemática de ambos materiales plásticos como lo es la calidad e inocuidad del material reciclado, ya que podrían descontaminarse pudiendo disminuir la carga migratoria de los contaminantes obtenidos durante la recolección o durante el reproceso, y, por otra parte, problemas de calidad, como lo es el color del material reciclado, siendo una solución para la industria y así potenciar el uso del PP y PS reciclado posconsumo.

### **VII. Conclusiones**

Los polímeros PP y PS son materiales con propiedades atractivas a nivel fisicoquímico, y por ello destacan en la industria de envases de alimentos.

En términos de reciclabilidad, se concluye que el reciclaje es una vía de disminución de impacto ambiental viable para los polímeros PP y PS debido al acortamiento del ciclo de vida para la obtención de un nuevo material como materia prima. Sin embargo, el reciclaje altera las propiedades físicas, mecánicas y reológicas del material reciclado, influyendo directamente en la calidad del polímero debido al comportamiento térmico degradativo que sufre el material conforme al aumento del número de reprocesos, por la exposición a altas temperaturas que implica el proceso de reciclaje, lo que se debe principalmente a la variabilidad de las fuentes de obtención de polímeros reciclados, el sometimiento a diferentes condiciones de almacenamiento y tratamiento termomecánico, mostrando desempeños distintos.

En relación con el fenómeno de migración química, todos los autores mostraron un aumento en la concentración de migrantes en los materiales del PP y PS posconsumo reciclados, concluyendo que el reciclaje mecánico influye directamente en inocuidad del material reciclado. Junto con ello, es necesario mencionar que la gran mayoría de los migrantes corresponden a compuestos potencialmente no tóxicos para el consumidor, ya que no superaron los límites de migración permitidos actuales para materiales en contacto con alimentos vírgenes, pero que pueden alterar las propiedades organolépticas del producto envasado. Sin embargo, se evidencia un porcentaje minoritario de migrantes potencialmente tóxicos, por lo que el uso potencial de PP y PS para envases de alimentos requeriría pretratamientos de descontaminación.

En términos de legislación existe un gran vacío a nivel mundial, ya que hasta la fecha no se encuentra regulado el uso del PP y/o PS reciclado posconsumo dirigido a estar en contacto con alimentos, y por ello, la incorporación de normas y/o reglamentos que regulen el PP y PS reciclado posconsumo sería el siguiente paso para armonizar la situación y promover la expansión del reciclaje y apuntar hacia una economía circular.

A partir de las encuestas y el cuestionario realizado, se observa que el uso de polímeros reciclados posconsumo en envases de alimentos aún es un gran desafío, y se destaca que las principales barreras para la utilización de PP y PS reciclados posconsumo se debe a factores como la calidad insuficiente del material, inestabilidad del suministro, escaso apoyo de los clientes, problemas con el procesamiento del material y las insuficiencias en el marco legal ya que hasta la fecha, el uso de los polímeros diferentes al PET reciclados no están permitidos para ser utilizados como materiales en contacto con alimentos a nivel mundial.

Por lo tanto, a pesar de que existen estudios para promover el uso de estos polímeros con grado alimenticio, todo lo anteriormente mencionado lleva a rechazar parcialmente la hipótesis formulada, ya que los efectos causados por las condiciones actuales de procesamiento mediante reciclaje mecánico implican que los polímeros PP y PS de fuentes posconsumo deban pasar por pretratamientos para poder ser utilizados. Además, de la existencia de factores como la recolección no estandarizada durante el proceso de reciclaje que hacen que la calidad y la cantidad de suministro del material reciclado sea muy variable, asimismo, la cantidad de contaminantes que estos pudiesen traer, dependiendo

incluso de las zonas geográficas donde son procesados, y, sumado a la normativa vigente insuficiente en materia de reciclaje posconsumo de estos polímeros, junto con la percepción actual de las empresas, la incorporación potencial de PP y PS reciclado posconsumo en envases de alimentos no sería viable a corto plazo al menos en Chile.

Sin embargo, se observa que los estudios están apuntando a optimizar el proceso de reciclaje y promover la incorporación de rPP y rPS con grado alimenticio, con tecnologías disponibles para potenciar el uso de polímeros reciclados, como es el procedimiento de descontaminación de plásticos reciclados el cual elimina contaminantes orgánicos NIAS en materiales plásticos reciclados a presión atmosférica, la tecnología para la eliminación de tinta impresa de film de plástico la cual permite obtener un film plástico libre de tinta y la utilización de marcadores no detectables a simple vista para facilitar el reciclaje mediante la clasificación de los envases plásticos en función de su origen y naturaleza, y por ende, se esperaría que el uso de PP y PS reciclado posconsumo pueda ser aplicado como un porcentaje en la formulación junto con material virgen, o como una capa en envases multicapa, para minimizar los efectos degradativos que sufren en el reproceso y la disminuir la migración química de los componentes.

## VIII. Bibliografía.

- Achilias, D., Antonakou, E., Roupakias, C., Megalokonomos, P., & Lappas, A. (2008). Recycling techniques of polyolefins from plastic wastes. *Global Nest Journal*, 10(1), 114–122. <https://doi.org/10.30955/gnj.000468>
- ADAPT. (2020) HIPS, GPPS, EPS- Entendiendo el poliestireno <http://adapt.mx/es/hips-gpps-eps-entendiendo-el-poliestireno/>
- AENOR. (2020a). *AENOR certifica el contenido 100% de plástico reciclado rPET en las botellas de Aguas Danone*. <https://www.aenor.com/salainformaciondocumentos/NP-Aguas-Danone-cert-AENOR-ene-21.pdf>
- AENOR. (2020b). *AENOR entrega el primer certificado de porcentaje de uso de plástico reciclado posconsumo a Plásticos Vanguardia*. <https://www.aenor.com/conocenos/sala-de-informacion-aenor/notas-de-prensa/aenor-entrega-el-primer-certificado-de-plastico-reciclado-posconsumo-a-plasticos-vanguardia>
- AIMPLAS. (2019). *Tipos de envases para alimentos*. <https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-envases-para-alimentacion/>
- Akash, M. & Vasudevan, A. (2021). Experimental analysis of recycled thermoplastic material. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6198–6203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.516>
- Ariosti, A. (2021). *Envases de PET y otros plásticos reciclados para alimentos*.

- Arvanitoyannis, I., & Kotsanopoulos, K. (2014). *Migration Phenomenon in Food Packaging. Food – Package Interactions, Mechanisms, Types of Migrants, Testing and Relative Legislation — A Review Alcoholic grade.* 21–36.  
<https://doi.org/10.1007/s11947-013-1106-8>
- Bolívar, G. (2021). Propileno (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>). Lifeder. <https://www.lifeder.com/propileno/>
- Bonelli, C., Martins, A., Mano, E., & Beatty, C. (2001). Effect of recycled polypropylene on polypropylene/high-density polyethylene blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(8), 1305–1311. <https://doi.org/10.1002/app.1217>
- Bracho, D. (2013). *Estudio del Efecto del Tamaño y Funcionalidad Superficial de Nanopartículas de Sio<sub>2</sub> sobre las Propiedades de Nanocompósitos de Polipropileno.* I(4), 91.
- Caicedo, C., Crespo-Delgado, L., Cruz-Rodriguez, H., & Alvarez-Jaramillo, N. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18, 245–252.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432017000300245&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300245&nrm=iso)
- Campos, C. (2017). Estudio de Migración de Distintos Componentes de Materiales Plásticos a los Alimentos. Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto.
- CENEM. (2016). *Tips de Packaging: Poliestireno Expandido (EPS).*  
<https://www.cenem.cl/detalle-tip.php?id=28>

- CENEM. (2019). *Los datos que no sabías sobre el reciclaje de las botellas plásticas en nuestro país*. <http://cenem.cl/newsletter/mayo2019/detalle-23.php>
- CENEM. (2021). *Clasificación de envases: primario, secundario y terciario ¿en qué se diferencian?* <https://www.cenem.cl/detalle-tip.php?id=32>
- Civancik-Uslu, D., Nhu, T., Van Gorp, B., Kresovic, U., Larrain, M., Billen, P., Ragaert, K., De Meester, S., Dewulf, J., & Huysveld, S. (2021). Moving from linear to circular household plastic packaging in Belgium: Prospective life cycle assessment of mechanical and thermochemical recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 171(Enero), 105633. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105633>
- Coral, D. (2016). *Hacer una revisión bibliográfica*.
- EuCertPlast. (2021). *European Certification of Plastics*. <https://www.eucertplast.eu/>
- European Comission. (1982). Establece las normas de base necesarias para la verificación de la migración de los constituyentes de los materiales y objetos de materia plástica destinados a entrar en contacto con productos alimenticios. *Diario Oficial de La Unión Europea*.
- European Comission. (2011). Reglamento (UE) No 10/2011 sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 1–89.
- European Comission. (2018). Directiva 94/62/CE Del Parlamento Europeo y Del Consejo de 20 de diciembre de 1994 relativa a los envases y residuos de envases. *Diario*

*Oficial de La Unión Europea*, 1–32.

European Comission. (2022). Reglamento (UE) No 2022/1245 De la Comisión de 2 de septiembre de 2020 por el que se modifica y corrige el Reglamento (UE) n.o 10/2011, sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 1-17.

Extracto Directiva CEE 85/572. (2011). Simulantes que deben utilizarse para evaluar la migración de los componentes de los materiales y objetos.141–146.

FDA. (2021). *Guidance for Industry: Use of Recycled Plastics in Food Packaging (Chemistry Considerations)*. December 1992, 1–13.  
<http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/GuidanceDocumentsRegulatoryInformation/IngredientsAdditivesGRASPackaging/ucm120762.htm>

Galotto, M. (1997). *Proyecto D97F1039*. [https://www.conicyt.cl/wp-content/themes/fondef/encuentra\\_proyectos/PROYECTO/97/F/D97F1039.html](https://www.conicyt.cl/wp-content/themes/fondef/encuentra_proyectos/PROYECTO/97/F/D97F1039.html)

Galvis, N. (2014). *Caracterización del polipropileno reciclado disponible a partir de tapas, para reincorporarlo en procesos productivos, mezclado con polipropileno virgen*. 28. <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/8278>

García, G. (2020). Optimizan reciclaje de envases con marcadores de identificación. <https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/optimizan-reciclaje-de-envases-con-marcadores-de-identificacion/>

García, G. (2021a). *Envases con material 100% reciclado para frutos rojos*.

<https://thefoodtech.com/diseño-e-innovación-para-empaque/envases-con-material-100-reciclado-para-frutos-rojos/>

García, G. (2021b). *Vía Nature relanza su gama de zumos en envases rPET.*

<https://thefoodtech.com/diseño-e-innovación-para-empaque/via-nature-relanza-su-gama-de-zumos-en-envases-rpet/>

García, G. (2020). Optimizan reciclaje de envases con marcadores de identificación.

<https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/optimizan-reciclaje-de-envases-con-marcadores-de-identificación/>

Gonzalez, D. (2015). *Nanocompósitos basados en homo- y copolímeros de polipropileno con grafeno y sílice, obtenidos por polimerización in situ, mezcla en estado fundido o uso de catalizadores soportados.*

Hitares (2021). Envases uso alimentario de polipropileno.

<http://www.hitares.eu/pt/produto/1358/envases-uso-alimentario-de-polipropileno/>

Horodytska, O., Cabanes, A., & Fullana, A. (2020). Non-intentionally added substances

(NIAS) in recycled plastics. *Chemosphere*, 251, 126373.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126373>

Intertek. (2021). *Migration Testing for Food Contact Materials (FCMs).*

<https://www.intertek.com/packaging/testing/migration-for-food-contact-materials/>

IPPR. (2021). *Le tipologie di marchio Plastica Seconda Vita.*

<https://www.ippr.it/psv/tipologie-marchio-psv>

- IRPEN. (2019). *Poliestireno: Estándar (GPPS) y Alto impacto (HIPS)*.  
<https://irpen.wordpress.com/2019/02/27/poliestireno-estandar-gpps-y-alto-impacto-hips/>
- Jubinville, D., Esmizadeh, E., Saikrishnan, S., Tzoganakis, C., & Mekonnen, T. (2020). A comprehensive review of global production and recycling methods of polyolefin (PO) based products and their post-recycling applications. *Sustainable Materials and Technologies*, 25, e00188. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00188>
- Labarca, M. (2012). *Estudio De Las Condiciones Para Producir Industrialmente Envases Plásticos a Partir De Materiales Compostables*. Universidad de Chile.
- Ley 21368. (2021). Regula La Entrega De Plásticos De Un Solo Uso y Las Botellas Plásticas, y Modifica Los Cuerpos Legales Que Indica <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>
- López de Dicastillo, C., Velásquez, E., Rojas, A., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2020). The use of nanoadditives within recycled polymers for food packaging: Properties, recyclability, and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1760–1776. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12575>
- López, P. (2008). *Interacciones especiales envase-alimento: alta temperatura y envase activo antimicrobiano* (Primera).
- Mariano. (2011). Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polipropileno.html>

- MERCOSUR. (1992). MERCOSUR/GMC/RES. No 56/92 Disposiciones Generales para Envases y Equipamientos Plásticos en Contacto con Alimentos.
- MERCOSUR. (2007). Reglamento técnico MARCOSUR sobre envases de polietilentereftalato (PET) postconsumo reciclado grado alimentario (PET-PCR grado alimentario) destinados a estar en contacto con alimentos.
- MERCOSUR. (2010). Reglamento Técnico MERCOSUR Sobre Migración En Materiales, Envases y Equipamientos Plásticos Destinados a Estar En Contacto Con Alimentos. *MERCOSURIGMC/RES. N° 32/10, 17.*  
<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/mrc96437.pdf>
- Ministerio de Salud, D. E., & Jurídica, D. (2019). *Reglamento Sanitario De Los Alimentos.*
- Mundo PMMI (2021). *Tetra Pak lanza polímeros reciclados certificados.*  
<https://www.mundopmmi.com/empaque/sustentabilidad/article/21295203/tetra-pak-lanza-polmeros-reciclados-certificados>
- Najafi, S., Mostafazadeh, M., Chaharmahali, M., & Tajvidi, M. (2009). Effect of thermomechanical degradation of polypropylene on mechanical properties of wood-polypropylene composites. *Journal of Composite Materials*, 43(22), 2543–2554.  
<https://doi.org/10.1177/0021998309345349>
- Navia, D., Ayala, A., & Villada, H. (2014). *Interacciones empaque-alimento: migración.* 13(100).
- NQA. (2021). *¿Qué es la GMP?* <https://www.nqa.com/es-es/certification/standards/gmp>

- Okmsl. (2021). Polipropileno Copolímero <https://okmsl.com/producto/polipropileno-copolimero/>
- OTRI. (2021a). *Nuevo procedimiento para la eliminación de tinta impresa en films de plástico*. 1–8.
- OTRI. (2021b). *Proceso para la descontaminación de plástico reciclado*.
- PCE. (2017). *The Usage of Recycled Plastics Materials by Plastics Converters in Europe*. October.
- PCE. (2019). *The Usage of Recycled Plastics Materials by Plastics Converters in Europe*. January.
- Pedroso, A., & Rosa, D. (2005). Mechanical, thermal, and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends. *Carbohydrate Polymers*, 59(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.018>
- PETRECYCLING. (2021). *SQS SWISS R-PET-LABEL*. <https://www.petrecycling.ch/de/wissen/recycling-pet/prozess-zertifizierung/zertifizierte-firmen>
- Pilevar, Z., Bahrami, A., Beikzadeh, S., Hosseini, H., & Mahdi, S. (2019). Trends in Food Science & Technology Migration of styrene monomer from polystyrene packaging materials into foods: Characterization and safety evaluation. *Trends in Food Science & Technology*, 91(April), 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.020>
- Pivnenko, K., Eriksen, M., Martín, J., Eriksson, E., & Astrup, T. (2016). Recycling of

- plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, 54, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.014>
- QA-CER. (2021). *QA-CER recycled content*. <https://www.qa-cer.be/>
- QuimiNet (2021). Usos y aplicaciones del poliestireno cristal. <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-poliestireno-cristal-23465.htm>
- RSB. (2021). *THE RSB STANDARD*. <https://rsb.org/the-rsb-standard/about-the-rsb-standard/>
- Satya, S. & Sreekanth, P. (2020). An experimental study on recycled polypropylene and high-density polyethylene and evaluation of their mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 27, 920–924. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.259>
- Sotomayor, R., Arvidson, K., Mayer, J., McDougal, A., & Sheu, C. (2007). *Regulatory Report: Assessing the Safety of Food Contact Substances*.
- Stoica, M., Marian, V., Laura, M., & Stoica, D. (2020). The financial impact of replacing plastic packaging by biodegradable biopolymers - A smart solution for the food industry. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124013>
- Su, Q., Vera, P., Nerín, C., Lin, Q., & Zhong, H. (2021). Safety concerns of recycling postconsumer polyolefins for food contact uses: Regarding (semi-)volatile migrants untargetedly screened. *Resources, Conservation and Recycling*, 167(January),

105365. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105365>

TECHPRESS. (2020). *El envase de Philadelphia se elaborará con plástico reciclado.*

<https://techpress.es/el-envase-de-philadelphia-se-elaborara-con-plastico-reciclado/>

TETRAPAK. (2021). *Tetra Pak introduce plástico reciclado certificado en sus envases.*

[https://www.tetrapak.com/es-es/about-tetra-pak/news-and-](https://www.tetrapak.com/es-es/about-tetra-pak/news-and-events/newsarchive/tetra-pak-introduce-plastico-reciclado-certificado-en-sus-envase)

[events/newsarchive/tetra-pak-introduce-plastico-reciclado-certificado-en-sus-](https://www.tetrapak.com/es-es/about-tetra-pak/news-and-events/newsarchive/tetra-pak-introduce-plastico-reciclado-certificado-en-sus-envase)

[envase](https://www.tetrapak.com/es-es/about-tetra-pak/news-and-events/newsarchive/tetra-pak-introduce-plastico-reciclado-certificado-en-sus-envase)

Vargas, A. (2021). *Migración general de sustancias de empaques plásticos.*

[https://www.tecnosolucionescr.net/blog/289-migracion-general-de-sustancias-de-](https://www.tecnosolucionescr.net/blog/289-migracion-general-de-sustancias-de-empaques-plasticos)

[empaques-plasticos](https://www.tecnosolucionescr.net/blog/289-migracion-general-de-sustancias-de-empaques-plasticos)

Vázquez, A., Espinosa, R. & Beltrán, M. (2014). *El reciclaje de los plásticos.*

[http://biblioteca.anipac.mx/wp-](http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf)

[content/uploads/2016/10/0047\\_El\\_Reciclaje\\_de\\_los\\_Plasticos.pdf](http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf)

WADDINGTON EUROPE. (2021). *Soft-fruit containers that no longer need extra bubble*

*padding.* <https://www.waddingtoneurope.com/monoair>

Welle, F., & Franz, R. (2006). Recycled plastics and chemical migration into food. In

*Chemical Migration and Food Contact Materials.* Woodhead Publishing Limited.

<https://doi.org/10.1533/9781845692094.3.205>

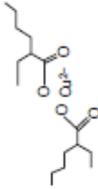
WERTSTOFF-PET. (2021). *Quality association PET.* [https://www.wertstoff-](https://www.wertstoff-pet.de/en/about-us/)

[pet.de/en/about-us/](https://www.wertstoff-pet.de/en/about-us/)

## IX. Anexos

### Anexo 1. Ejemplos de compuestos sustitutos

Table 9.1 Examples of chemicals to be used as surrogates in a challenge test

Surrogate	Formula (MW in g mol <sup>-1</sup> )	Functional group	Properties	Comments
Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> (92.1)	Aromatic hydrocarbon	Volatile, non-polar, liquid	
Chlorobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl (112.6)	Halogenated aromatic hydrocarbon	Volatile, medium-polar, liquid, aggressive to PET	
Chloroform	CHCl <sub>3</sub> (119.4)	Halogenated hydrocarbon	Volatile, medium-polar, liquid, aggressive to PET	
1,1,1-Trichloroethane	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> (133.4)	Halogenated hydrocarbon	Volatile, medium-polar, liquid, aggressive to PET	Environmentally hazardous compound, restricted use in Europe, should be substituted
Methyl salicylate		Ester	Non-volatile, polar, liquid	
Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub> (338.7)	Hydrocarbon	Non-volatile, non-polar, solid	
Phenyl cyclohexane	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> (160.3)	Aromatic hydrocarbon	Non-volatile, non-polar, liquid	Surrogate for limonene
Benzophenone	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> O (182.2)	Aromatic ketone	Non-volatile, polar, solid	
Methyl stearate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub> (298.5)	Aliphatic ester	Non-volatile, polar, solid	
Lindane	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>6</sub> (290.8)	Halogenated hydrocarbon	Non-volatile, medium-polar, solid	Hazardous compound, should be substituted
Copper-II-ethylhexanoate		Metal organic compound	Non-volatile, solid	Not stable during recycling

**Anexo 2.** Compañías recicladoras certificadas por EucertPlas

<b>Compañía</b>	<b>País</b>	<b>Periodo de validez</b>	<b>Material</b>
Hahn Kunststoffe GmbH	Alemania	11/10/2021	PE / PP; plásticos mixtos PP; PS;
WEWATEC GmbH	Alemania	30/10/2021	Película de PP y plásticos mixtos
MultiPort GmbH	Alemania	08/04/2022	PP
Alba Recycling GmbH	Alemania	17/02/2022	PP rígido, PP, PS flexible
Hubert Eing Kunststoffverwertung GmbH	Alemania	31/01/2022	PP y plásticos mixtos rígidos y flexibles
MGG Polymers GmbH	Austria	24/10/2021	(PP rígido, PS rígido)
Omaplast d.o.o.	Eslovenia	22/02/2022	PP rígido/flexible
DA FON Environmental Technology Co., Ltd	Taiwan	16/10/2021	PP rígido.
PreZero Kunststoffrecycling GmbH & Co. KG, Herford	Alemania	04/12/2021	PP, PS
RSH Polymere GmbH	Alemania	29/08/2022	PP flexibles
PreZero Polymers Austria GmbH	Austria	30/06/2022	PP; PS
MONTELLO Spa	Italia	11/07/2022	PE/PP
PreZero Polymers Italy S.p.A.	Italia	18/06/2022	PP
Vogt-plastic GmbH - Rickenbach-Hottingen	Alemania	22/07/2022	Mezcla de PE / PP / PS triturado
ATMOS	Francia	13/02/2021	PP y PS
Systec Plastics GmbH - Hörstel	Alemania	18/08/2022	PP
Systec Plastics Eisfeld GmbH	Alemania	02/09/2022	PP

AFA Nord GmbH	Alemania	22/10/2021	PP rígido y flexible
Veolia Polymers NL B.V.	Países Bajos	29/10/2021	PP
Acteco – Productos Y Servicios SL	España	24/01/2022	PS, PP
Forever Plast S.P.A.	Italia	27/11/2021	PP ,PS
Relux Kunststofftechnik GmbH + Co. KG	Alemania	13/02/2022	PP
Kruschitz GmbH - Werk II	Austria	21/09/2022	PP, PS, PS/PP rígido.
Grannex Recycling - Technik GmbH & Co. KG	Alemania	09/08/2022	PP, PE/PP
QCP B.V.	Países Bajos	31/07/2022	PP
Rodepa Plastics B.V.	Países Bajos	31/08/2022	PP
Kunststof Recycling Nederland	Países Bajos	31/01/2022	PP, ABS/PS
PreZero Kunststoffrecycling GmbH & Co. KG - Börde- Hakel	Alemania	25/11/2021	PP
bage plastics GmbH - Wolfers/Marien	Austria	06/10/2021	PP, PS
RETVET S.p.A.	Italia	17/05/2022	PP
RE Plano GmbH	Alemania	19/09/2021	PP, PS
Veolia Huafei Polymer Technology (Zhejiang) Co., Ltd	R.P. China	19/09/2022	PP
STIPHOUT PLASTICS B.V.	Países Bajos	27/06/2022	PP
Breplast S.p.A.	Italia	27/06/2022	PP
PMB Industries Ltd.	Bulgaria	05/07/2022	PP
Brightgreen Plastics Limited	Reino Unido	31/12/2021	PP
Iber Resinas SL	España	22/03/2022	PP
GCR Group - Gestora Catalana de Residuos S.L.U.	España	04/06/2022	PP
Paprec Plastiques 27	Francia	08/07/2022	PP, PS
bage plastics GmbH - Großschirma	Alemania	04/09/2021	PP, PS

Luxus Limited	Reino Unido	30/09/2021	PP
SIRPLASTE - Sociedade Industrial de Recyperados de Plásticos, S.A.	Portugal	25/01/2022	PP
Cordoplas, S.A. - Córdoba	España	03/02/2022	PP
SEG Umwelt-Service GmbH	Alemania	21/04/2021	PS
British Polythene Limited, trading as Berry BPI Recycled Products	Reino Unido	31/12/2021	PP film
K. Kanellakis S.A.	Grecia	20/01/2022	PP
Raff Plastics	Bélgica	06/05/2021	Plásticos mixtos PP; PS
Hubei Recycling Plastic Resources Co. Ltd.	R.P China	23/08/2021	PP
Morssinkhof Plastics Heerenveen B.V.	Paises Bajos	10/11/2021	PP
WIS Kunststoffe GmbH	Alemania	25/02/2022	PP, PS
Pokas Arcadian Recycle LTD	Grecia	09/01/2021	PP
Kaskada Ltd.	Bulgaria	06/07/2022	PP, PS
Plastic Recycling Amsterdam b.v.	Paises Bajos	13/07/2022	PP
CVB Recycling	Paises Bajos	26/02/2022	PP
Plastic Recycling	Francia	02/07/2021	PP
REALPLAST - Reciclaje y Almacenaje de Materias Plasticas, S.L.	España	20/08/2021	PS, PP
Reborn Plastics	Bélgica	02/07/2021	PS
Interecycling - Sociedade de Reciclagem, S.A.	Portugal	07/10/2021	PP, PS
ML sp. z o.o.	Polonia	28/10/2021	PP
Levantina Industrial de Plásticos S.A.	España	05/11/2021	PP

Best Plastic Management GmbH	Alemania	21/07/2021	PP, PS
P.M.G.	Francia	22/10/2021	PP, PS
MyReplast Industries S.r.l.	Italia	18/10/2021	PP
Greentech Plastics Ltd - Limerick	Irlanda	11/11/2021	PP, PS
Greentech Plastics Ltd – Eastleigh	Reino Unido	11/11/2021	PP
Berner	España	24/11/2021	PP
Morein GmbH	Alemania	26/05/2022	PP, PS
GreenPolymers GmbH	Alemania	27/01/2022	PP
Hüntelmann Kunststoffe GmbH	Alemania	02/09/2021	PP
SKYTECH	Francia	16/06/2022	Mezcla de plásticos: ABS-PS y ABS-PS-PP
Ecosac S.R.L.	Italia	25/02/2022	PP
ReMatch A/S	Dinamarca	23/03/2022	PP
AKPOL Adam Kuś – 225	Polonia	23/06/2022	PP
SEDEM	Francia	24/05/2022	PP, PS
Seri Plast S.p.A.	Italia	29/07/2022	PP