

PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA AMBIENTAL

**RECICLAJE DEL PVC, PVC MOLECULARMENTE ORIENTADO,
CPVC, PVC CON PLASTIFICANTES, PVC MEZCLADO CON
OTROS PLÁSTICOS: RECICLAJE FÍSICO VS RECICLAJE
QUÍMICO Y POSIBLES USOS EN INGENIERÍA**

PRESENTADO POR:
LAURA DANIELA GÁMEZ HERNÁNDEZ

ASESOR: JUAN SALDARRIAGA VALDERRAMA
*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Departamento de
Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2023

AGRADECIMIENTOS

A mis papás y hermanos por su sacrificio y apoyo incondicional en el cumplimiento de todos mis objetivos tanto personales como académicos, a mi asesor Juan Saldarriaga por su guía a lo largo de todo este proceso y por su disposición sin la cual no hubiese podido llegar a esta instancia, y a mis compañeros, los cuales se han convertido en mis amigos y cómplices, por aportar día a día a mi crecimiento como persona y como ingeniera,

Gracias

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	6
1.1 Introducción	6
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo General.....	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
2. ANTECEDENTES	9
3. METODOLOGÍA	10
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	42
4.1. Reciclaje del PVC	42
4.1.1 Recuperación de energía.....	43
4.1.2. Reciclaje químico	43
4.1.3. Reciclaje mecánico	44
4.1.4. Aditivos y estabilizantes	44
4.2. Reciclaje del CPVC	48
4.2.1. Introducción.....	48
4.2.2. Características y propiedades	48
4.3. Reciclaje del PVC-O	50
4.3.1. Introducción.....	50
4.3.2. Características y propiedades	52
4.4. Reciclaje del PVC mezclado con otros plásticos	55
4.4.1. Introducción.....	55
4.4.2. Compatibilizadores.....	57
4.4.3. Métodos de separación	59
5. CONCLUSIONES	64
6. RECOMENDACIONES	66
7. REFERENCIAS	67



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicaciones de PVC en Estado Unidos. Tomado de Miliute-Plepiene et al. (2021)	7
Figura 2. Mapa bibliográfico: Palabras clave.....	12
Figura 3. Mapa bibliográfico: Autores principales.....	14
Figura 4. Mapa bibliográfico: Relevancia interna.....	42
Figura 5. Deshidrocloración del PVC a 180°C bajo nitrógeno. PVC con 10 phr de filler (-). PVC sin filler (- -). Tomado de Braun (2002).....	45
Figura 6. Resultados medición propiedades mecánicas del PVC con y sin filler. Tomado de Braun (2002).....	45
Figura 7. Temperatura de transición vítrea del PVC con diferentes cantidades de plastificantes. Tomado de Wypych (2015).	46
Figura 8. Ilustración orientación molecular polímer. Tomado de Molecor (2016).....	51
Figura 9. Curva Esfuerzo-Deformación. Tomado de Molecor (2016).	52
Figura 10. Curva regresión de resistencia hidráulica. Tomado de Molecor (2016)...	53
Figura 11. Comparación capacidad hidráulica. Tomado de Molecor (2016).....	53
Figura 12. Ciclo de vida de tuberías PVC-O. Tomado de Molecor (2016)).....	55
Figura 13. Composición por tipo de polímero de los residuos plásticos. Tomado de Ragaert et al. (2017)	56
Figura 14. Rango de temperaturas de procesamiento por tipo de polímero. Tomado de Ragaert et al. (2017)	57
Figura 15. Propiedades mecánicas mezclas PVC-HDPE y (PVC-HDPE)-g-MAH. Tomado de Maou et al. (2022).....	58
Figura 16. Agregados partícula-burbuja en (a) flotación de minerales y (b) flotación de plásticos. Tomado de Wang et al. (2015).....	60
Figura 17. Separación por flotación de mezclas de plásticos por reactivos de flotación. Tomado de Wang et al. (2015).....	61
Figura 18. Rango de densidades de algunos tipos de plásticos. Tomado de Ragaert et el. (2017)	64



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados búsqueda bibliográfica	15
Tabla 2. Test impacto a tensión. Tomado de Chauffoureaux (1981)	54
Tabla 3. Propiedades de tracción de PVC orientado y no orientado. Tomado de Hitt y Gilbert (2000).....	54



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La llegada del plástico ha significado un cambio sustancial a la cotidianidad debido a que puede ser modificado convenientemente de una forma u otra basado en su función deseada. Este material se ha convertido en un producto básico a nivel mundial y se han desarrollado un gran número de aplicaciones en productos comerciales e industriales gracias a sus únicas características físicas y químicas (Niyitanga et al., 2021). Se conoce que la producción global de plásticos ha incrementado de 1.5 millones de toneladas en el 2018 a 380.7 en el año 2021 de las cuales el 51% fueron producidas en Asia (Statista, 2022). Sin embargo, su exponencial uso en diferentes sectores ha contribuido a la aparición de una nueva problemática relacionada con la generación de desperdicios. El problema con los desperdicios de plástico es que estos no se descomponen fácilmente y que deben ser tratados y dispuestos de acuerdo a su clasificación y propiedades respectivas. La principal distinción entre los materiales plásticos es si estos pueden ser fundidos o endurecidos reversiblemente mediante calentamiento, propiedad de los termoplásticos, o si este proceso es irreversible, clasificado como termoestable (API, s.f.).

Debido a que existen muchos tipos de plásticos, existe un reto en términos del reciclaje de sus desperdicios. Geyer et al. (2020) definen el desperdicio de materiales como la salida involuntaria de material tanto de una producción como de una actividad de consumo. Al primero de los casos, se les conoce como desperdicio preconsumo y afirman que este suele ser más fácil de reciclar ya que se encuentra menos contaminado. Por otro lado, aquel que proviene de actividades de consumo se le conoce como desperdicio posconsumo y, a pesar de su dificultad de reciclado, este posee la ventaja de ser más fácil de recolectar (pp. 20-23). La dificultad del reciclaje del último de estos se debe a que estos residuos en su mayoría consisten en la mezcla de varios plásticos con composición desconocida y, frecuentemente, contienen diferentes tipos de contaminantes orgánicos o inorgánicos (Zhao et al., 2022). Geyer et al. (2020) también afirman que la mayoría del reciclaje del plástico es vía reciclaje mecánico de termoplásticos. El reciclaje químico, el cual despolimeriza el plástico llevándolo de nuevo a su estructura de monómero, es actualmente limitado.

Uno de los polímeros termoplásticos más ampliamente usados en la actualidad es el policloruro de vinilo (PVC) por su excelente durabilidad, asequibilidad y adaptabilidad (Nakamura et al., 2009). Es un polímero vinilo compuesto de repetidos grupos vinilo y en el cual se tiene un átomo de hidrógeno reemplazado por uno de cloro por unidad de



carbono alterno repetida (Akovali,2012). El PVC es un material flexible o rígido normalmente mezclado con otros aditivos como modificadores de impacto o estabilizadores. Estos aditivos generan la producción de cientos de materiales a base de PVC con una gran variedad de propiedades de ingeniería (McKeen, 2012). La elevada importancia económica de este polímero no es solo por su bajo costo, esta es determinada por sus excelentes propiedades entre las cuales se encuentra la alta resistencia química, su resistencia al agua, a las condiciones climáticas, a la formación de biofilm, al alto impacto y su alta capacidad de flexibilidad (Lewandowski et al, 2022). Debido a sus particulares propiedades, su bajo costo y la amplia gama de productos que se pueden obtener de este material mediante diferentes condiciones y técnicas, el PVC se ha convertido en un polímero universal. De hecho, actualmente es procesado para producir productos de corta vida como empaques de comida, materiales de limpieza o textiles, y productos de larga vida como lo son las tuberías, marcos de ventanas o láminas para tejado (Sadat-Shojai et al., 2011). Teniendo en cuenta que Estados Unidos es el segundo país con mayor demanda de este termoplástico, la Figura 1 presenta los diferentes usos que se le atribuyen al material con sus respectivos porcentajes siendo los perfiles y las tuberías y accesorios su aplicación más significativa.

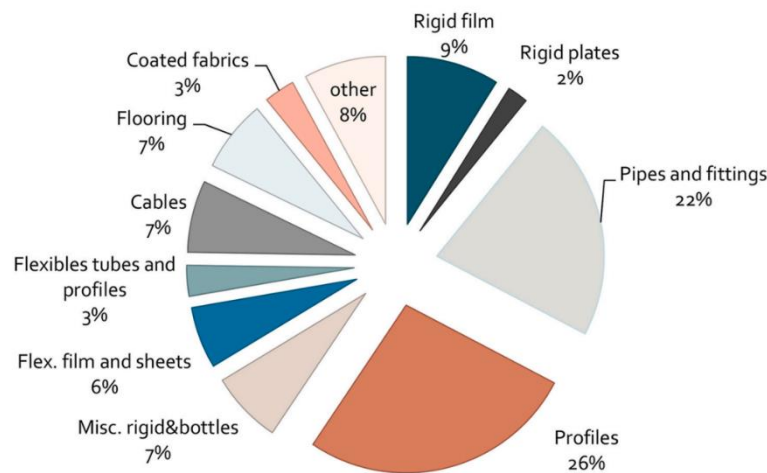


Figura 1. Aplicaciones de PVC en Estado Unidos. Tomado de Miliute-Plepiene et al. (2021)

A pesar de la larga vida que posee este tipo de materiales, en algún momento llega a convertirse en un residuo por lo que siempre existe la necesidad de disponerlos correctamente. El manejo de los desperdicios de PVC incluye una disposición en vertederos, la obtención de energía a partir de los mismos y el reciclaje ya sea químico o mecánico (Zhao et al., 2022). Sin embargo, los vertederos de la mayoría de los países están limitados y su deposición es solo considerado como la última de las opciones (García et al, 2006). Debido a esto, se han venido desarrollando un gran número de investigaciones acerca del reciclaje de este material en el cual la ocurrencia de cloro y



aditivos, como plastificantes, estabilizadores, retardantes de llama y rellenos, exigen una gestión adecuada de los productos de PVC en la fase final de su vida útil (Nakamura et al., 2009). También se conoce que su reciclaje está condicionado con el uso de los llamados compatibilizadores los cuales permiten las interacciones termodinámicas adaptadas con plásticos inmiscibles en caso de una mezcla (Zhao et al., 2022). Por esta razón, en la presente revisión bibliográfica se abarca el correcto reciclaje del PVC y las variables más importantes que miden su viabilidad y las diferencias en las propiedades del material con el material resultante del proceso de reciclado.

De igual forma, se abarcan las diferentes variaciones del PVC con el fin de establecer su correcto reciclaje y las diferencias en las propiedades y aplicaciones que estas presentan frente al PVC. Una de las variaciones que se presentan es el CPVC el cual es producido por la poscloración del PVC con el fin de potencializar algunas de las propiedades mecánicas del mismo. Este es tradicionalmente aplicado en las tuberías de distribución de agua a altas temperaturas o en transporte de sustancias químicas líquidas (Merah et al., 2003). Se conoce que la adición del cloro en su molécula genera un aumento de su peso y rigidez. Debido a esto, es necesario conocer las variaciones tanto en las propiedades del material como en las consideraciones a tener en cuenta al momento de realizar un reciclaje mecánico del mismo. Por otro lado, el PVC molecularmente orientado fue desarrollado con el fin de mejorar el convencional PVC no plastificado por medio de una deformación mecánica de estiramiento que produce una alineación de las moléculas en dirección a la tensión ejercida. Con esto, se logra duplicar la resistencia a la tracción y reducir la cantidad de material usado para una misma tubería (Chauffoureaux, 1981; Ferrante et al., 2015). En este caso, en el sector de tuberías, actualmente la mayoría de su disposición o reciclaje se realiza a partir de residuos preconsumo en el cual se realiza una extrusión de la tubería en la planta, se orienta molecularmente y los desperdicios vuelven a ser extruidos para un futuro uso. Finalmente, al hablar del PVC mezclado con otros plásticos se conoce que, para su reciclaje, es necesario realizar una separación efectiva de los diferentes termoplásticos debido a los efectos que causa su incompatibilidad y sus diferencias en puntos de ebullición en las propiedades mecánicas del material resultante. Para esto, se presentan diferentes mecanismos de separación con sus respectivos porcentajes de recuperación los cuales, por medio de diferencias de densidad, de flotabilidad o por separación electrostática, logran garantizar la separación de materiales que resultaron mezclados debido a su incorrecta disposición o debido a la fabricación de distintos productos que así lo requerían.

Se realiza una revisión bibliográfica que permita establecer las principales diferencias en las propiedades de las diferentes variaciones del PVC, las implicaciones que esto genera en su uso y la disparidad existente entre los procesos de reciclaje de cada uno de ellos.



1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Establecer, por medio de revisión bibliográfica, la viabilidad de realizar reciclaje del PVC, CPVC, PVC molecularmente orientado y PVC mezclado con otros plásticos sin afectar negativamente las propiedades mecánicas del material, y sus posibles usos en la ingeniería.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los principales factores que afectan las propiedades del PVC en el proceso de reciclaje mecánico.
- Realizar revisión bibliográfica acerca de los antecedentes del reciclaje del PVC mezclado con otros plásticos y analizar los cambios en las propiedades registrados en los resultados.
- Determinar factibles usos en la ingeniería del material resultante del reciclaje físico del PVC, CPVC, PVC molecularmente orientado, y PVC mezclado con otros plásticos.

2. ANTECEDENTES

El presente proyecto de grado se basa en investigaciones previas de Braun (2002), quien señaló la vulnerabilidad que presenta el PVC a ser degradado durante su procesamiento a altas temperaturas en la etapa de extrusión del reciclaje mecánico. Debido a esto, el autor expone la necesidad de insertar diferentes aditivos y sistemas estabilizadores que no solo evitarán el proceso de degradación de los polímeros, sino también permitirán obtener las propiedades mecánicas necesarias para futuras aplicaciones del material. Por otro lado, al hablar de la dificultad de combinar el PVC con otros plásticos, el autor menciona también la necesidad de insertar compatibilizadores que ayudarán a reducir la incompatibilidad de estos y la alteración de las propiedades mecánicas que sufre el material resultante en comparación a las iniciales. De igual forma, el proyecto se basa en investigaciones realizadas en términos de la identificación de las principales propiedades mecánicas que poseen los materiales de interés realizadas y su correcto reciclaje como: Campi et al. (2014) quien se enfocó en estudiar el comportamiento y las propiedades del PVC biorientado expuesto a radiación ionizante, Merah (2007) quien estudió el efecto de la meteorización natural en las propiedades de una tubería de CPVC, Carmoin et al. (1977) quienes establecieron las diferencias existentes al momento de variar el porcentaje de cloración del material CPVC y Wang et al. (2015) quienes exponen los métodos de



separación de las combinaciones de plásticos más comunes en la actualidad, entre ellas en PVC, PE y PS.

Este proyecto también se basa en investigaciones de Maou et al. (2022) y de Braun y Fischer (1995), quienes estudiaron las variaciones en las propiedades mecánicas de mezclas de PVC con otros polímeros con la adición de diferentes compatibilizadores. En primer lugar, Maou et al. (2022) demostraron que la adición del anhídrido maleico (MAH) como compatibilizador en la mezcla de PVC y HDPE permite la adhesión entre estos polímeros inmiscibles mejorando su compatibilidad termodinámica. De igual forma, los autores afirman que el material resultante evidencia una mejora significativa en las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y fuerza flexible en comparación a las originales. Para llegar a estas conclusiones, se realizó una comparación de las distintas propiedades entre una mezcla de PVC-HDPE y una de (PVC-HDPE)-g-MAH a partir de un gran número de pruebas que permiten la debida caracterización de cada material. En segundo lugar, Braun y Fischer (1995) encontraron que las propiedades mecánicas de la mezcla PVC-PS fueron drásticamente mejoradas con adición de copolímeros de injerto en bloque P(S-b-(B-g-CHMA)) y P(S-b-(B-g-MMA)). En este caso, también se hizo una comparación entre las propiedades entre la mezcla de polímeros sin modificar y la modificada con el compatibilizador.

Sin embargo, a diferencia de las investigaciones previamente mencionadas, este estudio se centra en la aplicación de los descubrimientos relacionados con los diferentes procesos y mecanismos de disposición y los aditivos o compatibilizadores necesarios en el proceso de reciclaje de las diferentes variaciones del PVC como lo son el PVC molecularmente orientado, CPVC y del PVC mezclado con otros plásticos. Se busca, de igual forma, a través de revisión bibliográfica establecer la viabilidad del reciclaje de estos materiales en función de las variaciones de las propiedades mecánicas y térmicas resultantes para una futura y posible aplicación en la ingeniería.

3. METODOLOGÍA

El presente documento corresponde a un estado del arte en el cual se busca realizar una investigación y revisión bibliográfica del reciclaje del PVC, CPVC, PVC molecularmente orientado y PVC mezclado con otros plásticos. Para esto, se realizó una búsqueda, lectura y análisis de las diferentes fuentes bibliográficas accedidas generando un conocimiento crítico del tema en específico. Esto, con el fin de ampliar el conocimiento acerca de las diferentes técnicas de disposición que existen para un material como el PVC y sus distintas variaciones aportando datos e información pertinente para el cumplimiento de los objetivos anteriormente mencionados. De igual forma, a partir de este tipo de investigación se buscó realizar un planteamiento de diversos enfoques y posturas críticas acerca del estereotipo existente de los materiales plásticos y, más específicamente, del PVC.



Ahora bien, la búsqueda de literatura realizada para elaborar el presente proyecto de grado se realizó a partir de revisión de fuentes primarias en las cuales se transmite información directa como artículos originales, libros de texto o tesis de grado. Para lo cual, se seleccionaron como principales bases de datos a ELSEVIER y MDPI. ELSEVIER es una plataforma que permite el acceso abierto a información académica proponiendo diferentes opciones de publicaciones tanto para autores como para investigadores a través de todas las temáticas y áreas del conocimiento. MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) es una editorial de revistas que ofrece un acceso abierto de publicaciones revisadas por pares. Esta cuenta con una plataforma académica digital en la cual se busca el intercambio de conocimiento científico en todas las áreas de estudio. En este caso, una de las revistas principales que ofrece esta plataforma y con mayor pertinencia para la presente revisión es Polymers. Ambas plataformas cuentan como principales bases de datos académicas con Scopus, Web of Science, PubMed y MEDLINE. Es pertinente mencionar que, a pesar de ser las principales bases de datos utilizadas, estas no fueron las únicas.

Una vez seleccionadas las bases de datos, se procedió a elegir las palabras clave que permiten filtrar de manera eficiente la información disponible y, a medida que se fue avanzando en la revisión de fuentes, se hizo uso de términos alternativos utilizados en los diferentes artículos. Como palabras clave se escogieron: aditivos, estabilizadores, compatibilizadores, PVC, CPVC, PVC-O, plastificantes, reciclaje mecánico, propiedades mecánicas y estabilidad. Para llegar a establecer estas palabras clave, se hizo uso de la herramienta de software VOSviewer la cual permite construir y visualizar redes bibliométricas que incluyen revistas, publicaciones, investigaciones, etc. Estas redes pueden ser construidas a partir de relaciones de citación, co-citación o por acoplamiento bibliográfico. Esta herramienta también puede ser utilizada para la creación de redes de coexistencia de términos, palabras clave, extraídos a partir de un conjunto de literatura científica de un tema en específico. A continuación, en la Figura 2 se presentan los resultados de una búsqueda preliminar en la herramienta VOSviewer la cual permite establecer las palabras clave recomendadas al momento de realizar la búsqueda bibliográfica que cumpla con los objetivos propuestos anteriormente.



Por otro lado, al hablar de los criterios de selección utilizados para la búsqueda bibliográfica, estos fueron determinados a partir de los objetivos propuestos anteriormente, es decir, si la información suministrada y su contenido da respuesta a lo que busca responder el proyecto. Otros aspectos tomados en cuenta para la selección de los artículos, como lo recomienda Abad, et al. (2003), fueron los autores, el resumen y los resultados presentados. En primer lugar, se determinó si los autores aportaban credibilidad a la revisión bibliográfica y, de igual forma, si estos poseían suficiente experiencia en el tema. De esta forma, se asegura que la información encontrada y posteriormente utilizada en el desarrollo del proyecto es la más relevante a criterio de expertos. En segundo lugar, del resumen se verificó si el artículo en cuestión era oportuno, claro y útil para el cumplimiento de los objetivos. En este caso, a través del resumen se evaluó si el artículo verdaderamente abarca el tema de interés y aporta información que permita concluir acerca del tema de estudio. Finalmente, se determinó si los resultados presentados podían ser aplicados, encaminados hacia el desarrollo del proyecto y si estos aportaban a la resolución de la pregunta abarcada en el proyecto. Como resultado, se recolectó un conjunto de 70 publicaciones que proporcionaron información relevante para el correcto desarrollo del presente trabajo.

En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos al momento de establecer los principales autores que se destacan en el tema del reciclaje del PVC con el fin de contar con una primera aproximación a los posibles documentos que aportan información valiosa al proyecto. De igual forma, en la Tabla 1 se presentan los resultados de la búsqueda bibliográfica definitiva posterior a un proceso de filtración en base a las palabras clave encontradas y a los autores con mayor relevancia en el tema especificando el autor, año de publicación, título, idea principal y el aporte que este realiza al proyecto en cuestión.

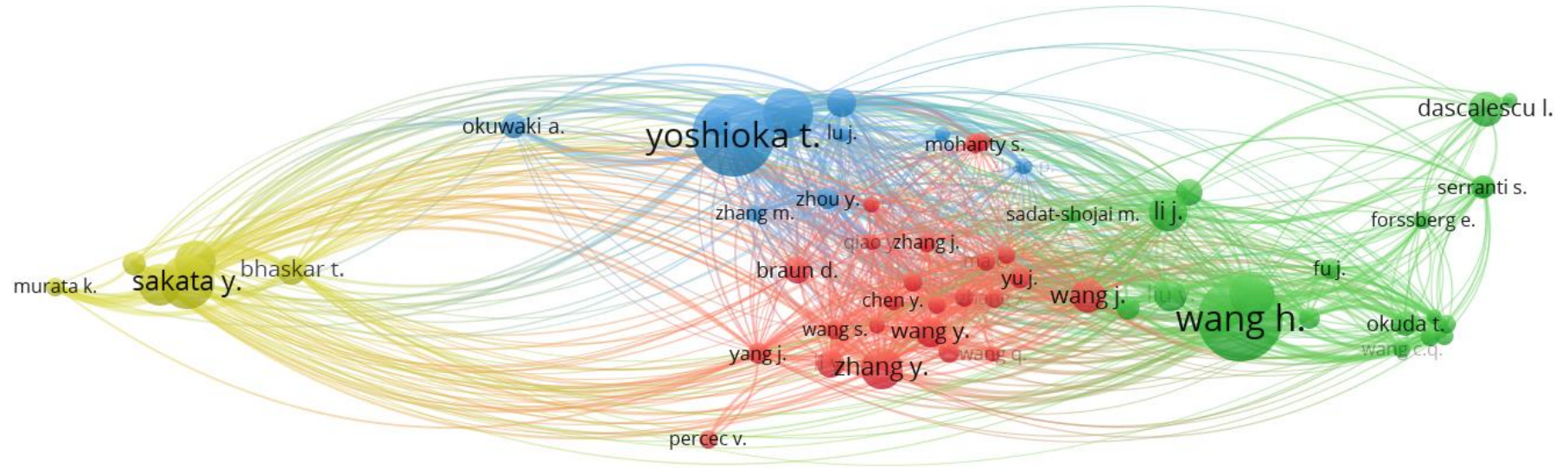


Figura 3. Mapa bibliográfico: Autores principales.



Tabla 1. Resultados búsqueda bibliográfica

AUTOR	AÑO	TITULO	PALABRAS CLAVE	IDEA CENTRAL	APORTE DEL AUTOR EN LA INVESTIGACIÓN
Ambrogi, V., Carfagna, C., Cerruti, P., Marturano, V.	2017	<i>Additives in Polymers. Modification of Polymer Properties</i>	Aditivos, plastificación, compatibilizadores, estabilizadores	Los aditivos más comunes utilizados en las últimas décadas son los estabilizadores térmicos, retardantes de llama, plastificantes y compatibilizadores.	Información acerca de los diferentes aditivos en la industria del plástico y se centra en la descripción específica de los estabilizadores térmicos, plastificantes y compatibilizadores del material de PVC.
Akovali, G.	2012	<i>Plastic materials: polyvinyl chloride (PVC). Toxicity of building materials</i>	PVC, plastificantes, aditivos	El PVC es un material de alta versatilidad y con un gran número de aplicaciones en la industria. Sin embargo, existe una preocupación acerca del número de aditivos tóxicos que este contiene y del riesgo de estos en la salud.	Explicación técnica y detallada acerca del material del PVC, sus ventajas y las diferentes aplicaciones que existen actualmente en la industria.
Ariza, A.	2022	<i>Estado del arte de los costos de toneladas de carbono equivalente para ser incluidos en diseños multiobjetivo</i>	Análisis de ciclo de vida, impacto ambiental, redes hidráulicas urbanas	Determinación de los costos de toneladas de carbono por medio del desarrollo de un análisis de ciclo de vida comparando los diferentes diseños de las redes hidráulicas urbanas.	Información acerca del análisis de ciclo de vida del PVC, sus ventajas y su huella de carbono. Comparación de los distintos materiales para el diseño de redes hidráulicas urbanas.



*de sistemas
 hidráulicos urbanos*

Bai, T., Wang, H., Chen, S., Yu, E., & Wei, Z.	2020	<i>Effect of segment structure on the thermal stability of CPVC in the Gas-Solid PVC chlorination process</i>	Policloruro de vinilo, propiedades térmicas, técnicas de procesamiento y síntesis	Las unidades de CCl_2 promueven la deshidrocloración del CPVC reduciendo las propiedades reológicas y la estabilidad térmica. Por otro lado, la formación de $CHCl$ en el proceso de cloración incrementa la estabilidad térmica de la resina.	Descripción detallada de los diferentes métodos de cloración del PVC para la obtención del CPVC. También identifica las variaciones en las propiedades del material resultante haciendo uso de las diferentes metodologías.
Braun, D.	2002	<i>Recycling of PVC.</i>	Policloruro de vinilo, degradación, estabilización, reciclaje material y químico	Existen cuatro principales vías de disposición de los residuos de PVC: obtención de energía, vertedero, reciclaje químico y reciclaje mecánico. Para su reciclaje, el mayor problema es la falta de homogeneidad de los residuos y la incompatibilidad entre estos.	Presentación detallada de las diferentes maneras de disponer los desperdicios de PVC. Explicación de los factores a tener en cuenta al momento de reciclar mecánicamente el PVC y las distintas variaciones que sufre el material después de ser expuesto a procedimientos de reciclaje.



Braun, D., & Fischer, M	1995	<i>Mechanical behaviour of PS/PVC blends compatibilized with block-graft copolymers based on poly(styrene-block-butadiene)</i>	Mezcla de plásticos, propiedades mecánicas, compatibilización	Estudio de las propiedades mecánicas de una mezcla de PS/PVC al ser mezclado con el compatibilizador P (S-b- (B-g-CHMA, MMA)). Establecimiento de mejoras drásticas en las propiedades de la mezcla al ser compatibilizadas con copolímeros de injerto en bloque en donde las excelentes propiedades del PVC se transforman ampliamente en toda la mezcla.	Presentación de la variación de propiedades de una mezcla de dos polímeros incompatibles. Determinación de las características que debe tener un compatibilizador para lograr obtener las características deseadas del material resultante.
Calin, L., Caliap, L., Neamtu, V., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., & Dascalescu, L.	2005	<i>Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation.</i>	Tribocarga, separación electrostática.	Evaluación de la efectividad de dos materiales para la fabricación de una cámara de carga tribo. Determinación de la eficiencia de separación triboelectrostática de dos polímeros: PVC y PE	Explicación del proceso de separación de polímeros por medio de la triboelectrificación, su eficiencia y las condiciones necesarias para que sea posible. Descripción detallada del proceso de triboelectrificación.
Campi, F., Casagrande, M., Franzoni, G., Minelli, C.,	2014	<i>A study of the behavior of bi-oriented PVC exposed to ionizing radiation and its</i>	PVC biorientado, irradiación, daño por radiación,	Se realiza un análisis de la viabilidad que tiene el PVC biorientado para sustituir con éxito a los materiales metálicos en	Presentación del proceso llevado a cabo para la producción del PVC biorientado. Análisis de las propiedades que presenta el PVC biorientado en



Porta, A., & Ramella, G.		<i>possible use in nuclear applications</i>	descontaminación	aplicaciones industriales bajo radiación ionizante.	comparación al PVC n plastificado.
Carmoin, B., Villoutreix, G., & Berlot, R.	1977	<i>Compatibility of PVC-chlorinated PVC mixtures.</i>	Compatibilidad, PVC, miscibilidad	Al estudiar la compatibilidad del policloruro de vinilo mezclado con dos CPVC industriales se determina que la técnica de mezclado es el principal parámetro para la compatibilidad de las resinas. También se determina que la compatibilidad depende del contenido de cloro en la resina de CPVC.	Presentación de los resultados de un estudio que permiten establecer los principales factores que afectan la compatibilidad de la resina de PVC con la de CPVC. Análisis y presentación de recomendaciones acerca del tipo de resinas que presentan mayor miscibilidad.
Carroll, W. F., Johnson, R. W., Moore, S. S., & Paradis, R. A.	2011	<i>Poly(Vinyl Chloride). Applied Plastics Engineering Handbook</i>	PVC, aditivos, síntesis del cloruro de vinilo, polimerización, estabilizadores	Estudio de las principales características y propiedades del PVC. Revisión bibliográfica de su fabricación, propiedades, reciclaje y efectos en la salud y el medio ambiente.	Descripción detallada el material PVC, sus propiedades y su polimerización. Presentación de los diferentes aditivos, estabilizantes y lubricantes usados en la fabricación del PVC.
Chauffoureaux, J.	1981	<i>Rheological functions and processing by extrusion and</i>	Orientación biaxial, extrusión,	Descripción y estudio general de la producción industrial de PVC corrugado biaxialmente orientado.	Presentación del proceso llevado a cabo para la producción del PVC biorientado.



		<i>stretching of PVC biaxially oriented sheets</i>		Análisis de las propiedades del material en relación con los aditivos insertados en el proceso como estabilidad, estiramiento, gelificación, etc.	Descripción de los factores a tener en cuenta al momento de la elección de aditivos y de la calidad del PVC no plastificado que se hace uso al momento de la producción del PVC-O
Clark, D., Collins, E., Kleiner, L.	1982	<i>Mechanical Criteria por Polymer Compatibility: Poly(vinylchloride)/ Post-chlorinated Poly(vinylchloride) Blends</i>	PVC, CPVC, compatibilidad	Existe una relación entre las propiedades mecánicas de una mezcla de PVC/CPVC con los métodos de mezcla, la composición de la mezcla, los pesos moleculares y el contenido de cloro de la resina.	Presentación de los resultados de una investigación que permite establecer la miscibilidad de diferentes combinaciones de PVC/CPVC evaluando sus propiedades mecánicas.
Cudjoe, D., Wang, H.	2022	<i>Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis</i>	Residuos, PVC, recuperación de energía, incineración	El creciente crecimiento de los desperdicios de plásticos incentiva el aprovechamiento de los mismos para la obtención de energía. Se compara el potencial de generación de energía, la viabilidad económica y el efecto ambiental de la gasificación e incineración de residuos.	Explicación de los métodos de gasificación e incineración para la obtención de energía a partir de los residuos plásticos. Presentación de procesos como vía de disposición de residuos



Erbil, H., Demirel, A., Avci, Y., Mert, O	2003	<i>Transformation of a Simple Plastic into a Superhydrophobic Surface</i>	Recubrimiento, plásticos, hidrofobicidad	Estudio de un método sencillo y económico para la formación de un recubrimiento superhidrófobo utilizando polipropileno y una selección de disolventes para controlar la rugosidad de la superficie.	Descripción de la hidrofobicidad de la superficie de un material plástico. Exposición de los factores que afecta la hidrofobicidad de los plásticos: composición química, plastificantes, grado de polimerización, cristalinidad y estructura.
Ferrante, M., Capponi, C., Brunone, B., & Meniconi, S.	2015	<i>Hydraulic Characterization of PVC-O Pipes by Means of Transient Tests</i>	PVC orientado, pruebas transitorias, análisis de dominio	Caracterización del PVC molecularmente orientado a través de pruebas transitorias. Presentación de resultados de pruebas transitorias realizadas sobre una tubería.	Presentación de las propiedades mecánicas que adquiere el PVC-O posterior a la extrusión del PVC-U. Exposición de las diferencias entre el PVC-O y el PVC extruido para su producción.
Fraunholz, N.	1997	<i>Plastics flotation</i>	Flotación, superficies plásticas,	Presentación teórica de la propiedad de flotación presente en los materiales plásticos, su condicionamiento, proceso y resultado al ser expuesto al método de separación.	Explicación detallada del principio de flotación que posee los plásticos. Presentación de las condiciones óptimas para una eficiente separación de materiales plásticos por medio del método de flotación.



Fraunholz, N.	2004	<i>Separation of waste plastics by froth flotation—a review, part I</i>	Procesamiento de desperdicios, modificación superficial, flotación por espuma, depresores de la flotación	Revisión bibliográfica crítica de los datos bibliográficos sobre el método de separación de plásticos por medio de la flotación en las últimas tres décadas.	Descripción de los métodos para obtener una eficiente flotación selectiva de diferentes tipos de plásticos. Presentación de las condiciones a las que se debe someter el material para poder realizar la separación por flotación.
Gent, M. R., Menendez, M., Toraño, J., & Diego, I.	2009	<i>Recycling of plastic waste by density separation: prospects for optimization</i>	Tecnología de reciclaje, operaciones físicas, separación por densidad, recuperación de plásticos.	Revisión bibliográfica de procesamiento industrial existente y presentación de resultados de previas investigaciones acerca del procesamiento para separar mezclas sólidas. Presentación del reciclaje de residuos plásticos mediante la separación por densidad.	Exposición de información acerca de la separación de plásticos a través del método por densidades. Presentación de las situaciones en las que es posible la implementación de la metodología por densidades.
Gent, M., Menendez, M., Toraño, J., & Torno, S.	2011	<i>Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones</i>	Tecnología de reciclaje, recuperación de material, separación por densidad, residuos plásticos,	Existe una gran variedad de procesos automatizados para la recuperación de materiales. Demostración de la eficiencia del uso de separados por densidades del tipo ciclón y su viabilidad económica al implementarlo a nivel industrial.	Explicación detallada del proceso de separación de materiales plásticos por densidades. Presentación de los principales factores que afectan la eficiencia de la separación por densidad



			recuperación de plástico.		
Geyer, R.	2020	<i>Production, use, and fate of synthetic polymers. Plastic Waste and Recycling</i>	Residuos, plástico, disposición, reciclaje	Recuento de los plásticos fabricados desde 1950. Actualización del flujo de materiales, cadena de producción, uso, generación y disposición de los residuos.	Presentación de la definición y caracterización de residuos plásticos. Descripción y comparación del reciclaje mecánico y químico de los desperdicios de materiales termoplásticos.
Goh, S. H.	2014	<i>Miscible Polymer Blends. Polymer Blends Handbook</i>	Miscibilidad, polímeros,	Búsqueda intensiva de mezclas miscibles de polímeros reportados desde el 2012. Análisis de la miscibilidad por medio de varios métodos y de los factores que afectan la compatibilización de las mezclas de los diferentes polímeros.	Explicación del término de miscibilidad entre polímeros. Descripción de la temperatura de transición vítrea como el método más común utilizado para evaluar la miscibilidad de una mezcla de polímeros.
Grigore, M.	2017	<i>Methods of recycling properties and applications of recycled thermoplastic polymers</i>	Reciclaje de plástico, impactos ambientales del reciclaje químico,	Existe un gran número de materiales obtenidos de procesos de reciclado que pueden ser aplicados en la industria. Para esto, se evalúan los diferentes métodos de reciclaje de los	Recopilación información acerca del reciclaje de diferentes polímeros. Descripción del reciclaje químico y de las implicaciones de las condiciones a las cuales se expone



			recuperación de energía	polímeros termoplásticos, sus propiedades y las aplicaciones que se le puede atribuir al material dependiendo de las propiedades atribuidas al momento de su producción.	el material en las propiedades del material resultante.
Hamid, F., Akhbar, S., & Halim, K. H. K.	2013	<i>Mechanical and Thermal Properties of Polyamide 6/HDPE-g-MAH/High Density Polyethylene</i>	Mezcla de polímeros, HDPE, HDPE-g-MAH, compatibilizador, propiedades mecánicas, caracterización térmica	Presentación de los resultados obtenidos al inyectar HDPE-g-MAH en el proceso de extrusión como compatibilizador de dos materiales plásticos. Pruebas mecánicas y caracterización del material resultante.	Descripción de las variaciones en las propiedades mecánicas que sufre la mezcla de dos polímeros al ser combinados con un compatibilizador
Harper, C.	2000	<i>Modern Plastics Handbook</i>	Propiedades de termoplásticos, polímeros, temperatura de transición vítrea	Existe una amplia gama de materiales plásticos descrita por sus procesos, formas, aditivos, diseño de productos y reciclaje. Es importante poseer un manual de términos, definiciones y fundamentos que recopile una trayectoria académica, de autores y antecedentes con el fin de presentar explicaciones, técnicas y	Presentación y descripción del policloruro de vinilo clorado, sus ventajas, sus propiedades y las principales aplicaciones en la industria de este tipo de materiales.



datos para todos los ámbitos de intereses sobre los plásticos.

Hitt, D. J., & Gilbert, M.	2000	<i>Biaxial orientation of poly(vinyl chloride) compounds Part 2 –Structure– property relationships and their time dependency</i>	Orientación biaxial, PVC, PVC-O, propiedades mecánicas	Estudio experimental de la preparación de hojas de PVC orientadas. Presentación de los resultados de las pruebas mecánicas del material resultante mediante la difracción de rayos X y análisis termomecánico.	Descripción de las variaciones en las propiedades mecánicas que sufre el material de PVC posterior a su orientación. Explicación detallada del proceso de orientación biaxial al que se somete el material de PVC.
Hofer, R.	2012	<i>Processing and Performance Additives for Plastics.</i>	Aditivos, plástico, estabilización	El uso de aditivos en el material plástico toma un papel importante al momento de exponerlo a procesos de moldeo, extrusión o termoformado para producir diferentes productos. Los principales aditivos son los emulsificadores, los lubricantes, los plastificantes y los antioxidantes.	Presentación información de los estabilizadores, los efectos de su uso en un material y las ventajas del material resultante en términos de propiedades. Presentación información de los plastificantes, los efectos de su uso en un material y las ventajas del material resultante en términos de propiedades.



Inculet, I., Castle G., Brown, J.	1998	<i>Electrostatic separation of plastics for recycling. Particulate Science and Technology: An International Journal</i>	Separación electrostática, transferencia de cargas	Exposición de algunos experimentos exitosos en los cuales se aplica la separación electrostática de dos componentes de residuos plásticos. Presentación de dos métodos de carga triboeléctrica: lecho fluidizado y tubo giratorio.	Descripción detallada de la separación electrostática como metodología de separación de una mezcla de plásticos. Explicación de la teoría de transferencia de carga y del proceso de separación triboelectrostática.
Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A., & Dascalescu, L.	2005	<i>Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device</i>	Tribocarga, lecho fluidizado, separación electrostática, plástico granulado	Presentación de dispositivo modular de lecho fluidizado para el estudio de tribocarga de plásticos. Presentación de ensayos de separación electrostática realizados sobre el PET y el PVC y su eficiencia.	Explicación de la separación electrostática de una mezcla de plásticos. Descripción de la separación triboelectrostática de plásticos y su eficiencia.
Jeswani, H., Kruger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., Azapagic, A.	2021	<i>Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with</i>	Desperdicios de plástico, reciclaje, pirólisis, economía circular	Es necesario establecer métodos de aprovechamiento de los desperdicios plásticos ya sea por pirólisis, reciclaje o la recuperación de energía. Estudios demuestran que el proceso de pirólisis genera la mitad del	Descripción detallada de los diferentes métodos de reciclaje químico y del reciclaje mecánico en el proceso de recuperación de energía.



		<i>mechanical recycling and energy recovery</i>		impacto en el cambio climático de la recuperación de energía y, de igual forma, este genera el mismo impacto que el reciclado de estos residuos.	Comparación del impacto que generan los diferentes métodos de disposición de residuos.
Kim, H. C., & Gilbert, M.	2004	<i>Characterisation and properties of oriented PVC fibres</i>	PVC, fibras, orientación	Investigación de fibras de PVC estiradas utilizando diferentes técnicas para medir su tenacidad. Obtención de variación en cristalinidad del material y que la tenacidad es un buen indicador de la orientación molecular.	Descripción de la ventaja que presenta el PVC al ser orientado en términos de cristalinidad. Descripción del efecto que genera la cristalinidad en el procesamiento, plastificación y propiedades del material.
Lewandowski, K., Skórczewska, K.	2022	<i>A brief review of poly(vinyl chloride) (PVC) recycling</i>	Reciclaje, PVC, policloruro de vinilo	Existe un gran número de posibilidades de reciclaje para el material de PVC para el desarrollo de materias primas que cumplan con los requisitos que deben cumplir los materiales involucrados en la economía circular.	Presentación de las ventajas que presenta el PVC contra otros termoplásticos en términos de propiedades mecánicas y versatilidad. Identificación de los aditivos necesarios y los efectos en las propiedades físicas de los polímeros. Recomendación de distintas consideraciones al momento de tratar residuos preconsumo y



posconsumo. Diferencias entre estas.

Liu, Z., & Gilbert, M.	1987	<i>Structure and properties of oriented plasticized poly(vinyl chloride)</i>	Policloruro de vinilo, orientación, difracción rayos X, birrefringencia	Estudio experimental de estiramiento de piezas moldeadas por compresión de PVC. Medición de las propiedades de tracción, de resistencia y de estiramiento posterior al proceso de orientación.	Presentación de las variaciones que adquiere el material de PVC al ser orientado. Descripción detallada de las propiedades mecánicas y de las ventajas de someter a un proceso de orientación a PVC.
Lu, L., Li, W., Cheng, Y., Liu, M.	2023	<i>Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review</i>	Residuos de PVC, reciclaje químico, dechloración, deshidrocloración, pirólisis	La extensa producción de plástico resulta en la necesidad de discutir la síntesis, aplicaciones y los actuales restos que posee la disposición de los desperdicios de PVC. Es necesario un análisis de las tecnologías de reciclaje químico existentes para transformarlos en combustible, materia prima o polímeros de valor agregado.	Descripción de los principales mecanismos de reciclaje químico. Comparación entre mecanismos en términos de las propiedades del material resultante. Explicación del proceso y condiciones de los diferentes mecanismos.



Lu, W., Cao, T., Wang, Q., & Cheng, Y.	2011	<i>Plasma-Assisted Synthesis of Chlorinated Polyvinyl Chloride (CPVC) Using a Gas-Solid Contacting Process</i>	CPVC, cloración, lecho fijo, plasma frío	Estudio experimental de la síntesis de CPVC asistida por plasma mediante un contactor gas-sólido en donde, para generar radicales libres, se utiliza plasma frío y se activan las superficies de las partículas del PVC.	Explicación detallada del proceso de cloración del PVC en el cual se realiza la cloración en la superficie del PVC y, posterior a esto, ocurre una difusión del cloro al interior de las partículas.
Marceneiro, S., Alves, R., Lobo, I., Dias, I., de Pinho, E., Dias, A. M. A., ... C. de Sousa, H.	2018	<i>Effects of Poly (vinyl chloride) Morphological Properties on the Rheology/Aging of Plastisols and on the Thermal/Leaching Properties of Films Formulated Using Nonconventional Plasticizers</i>	Plastificantes, policloruro de vinilo en emulsión, propiedades de película de PVC	El uso de tecnologías de plastificación de PVC genera un efecto en las propiedades morfológicas del material dependiendo de sus diferentes grados descritos por el k-value. Existe una diferencia entre los cambios que un plastificante convencional produce en el material y uno no convencional en términos de estabilidad térmica y la presión de vapor.	Identificación de la importancia de conocer información del termoplástico como lo es el k-value para así determinar los aditivos necesarios y posibles en un proceso de reciclado.
Maou, S., Meftah, Y., Tayefi, M., Meghezzi, A., Grohens, Y.	2022	<i>Preparation and performance of an immiscible PVC-HDPE blend compatibilized with maleic anhydride</i>	PVC, HDPE, MAH, extrusión reactiva in-situ	Existe la posibilidad de crear mezclas miscibles entre materiales de PVC y HDPE con la adición de compatibilizadores que formen puentes entre los polímeros. Al hacerlo, se hace evidente los	Presentación de resultados de una investigación centrada en la mezcla de polímeros de PVC-HDPE con el uso de compatibilizadores



(MAH) via in-situ reactive extrusion

cambios en propiedades como la temperatura de transición vítrea que indica compatibilidad.

Determinación de cambios en las propiedades de los polímeros posterior a su mezcla para una posible aplicación en tecnologías de reciclaje.

McKeen, L. W.	2012	<i>Polyolefins, Polyvinyls, and Acrylics. Permeability Properties of Plastics and Elastomers</i>	Polímeros, PVC	Presentación y descripción de los usos y aplicaciones de los diferentes polímeros descritos por su estructura molecular.	Descripción específica del material PVC, su composición, estructura molecular, clasificación y diferentes propiedades mecánicas. Presentación de las aplicaciones y usos más comunes en la actualidad del material dependiendo de las propiedades adquiridas.
Merah, N.	2007	<i>Natural weathering effects on some properties of CPVC pipe material</i>	CPVC, meteorización natural, de tensión, tenacidad a la fractura	Debido a las propiedades del CPVC este material es usado en ambientes exteriores y, por lo tanto, está expuesto a fenómenos de meteorización natural que llegan a afectar sus propiedades en pequeños periodos de tiempo. Este deterioro es estudiado en relación con la evaluación de los cambios	Información detallada de las propiedades del CPVC que lo diferencian del PVC. Análisis de los cambios que sufre el polímero en términos de las propiedades mecánicas que este contiene.



o el deterioro que presente el mismo.

Merah, N., Irfan-ul-Haq, M., & Khan, Z.	2003	<i>Temperature and weld-line effects on mechanical properties of CPVC</i>	CPVC, polímeros, efectos de temperatura, moldeo por inyección	Se ha demostrado que el módulo de elasticidad y el límite elástico del CPVC disminuye linealmente con la temperatura. Se realiza una comparación entre las curvas de tensión de deformación de materiales con y sin línea de soldadura.	Comparación de las propiedades entre los polímeros de PVC y CPVC. Datos importantes del CPVC: presiones que resiste, temperatura de transición vítrea y temperaturas límite.
Miliute-Plepiene, J., Frâne, A., & Almasi, A. M.	2021	<i>Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries.</i>	Residuos de PVC, residuos plásticos, manejo de residuos	Revisión de las formas de disposición de los residuos de PVC en la región nórdica. Presentación de estadísticas relacionadas con la gestión de residuos de PVC y las estimaciones sobre la generación de estos residuos.	Información acerca de la generación de residuos plásticos en diferentes zonas del mundo. Análisis de la proporción de residuos generados y dispuestos.
Nakamura, S., Nakajima, K., Yoshizawa, Y., Matsubae-	2009	<i>Analyzing Polyvinyl Chloride in Japan with the Waste InputâOutput</i>	Plástico, reciclaje, ecología industrial. PVC	Existe un llamado para la recolección y separación de productos que terminan su vida útil debido a la gran cantidad de material plástico producido y, para	Descripción del PVC, su producción, sus principales aplicaciones, las ventajas que este presenta en comparación a los otros polímeros.



Yokoyama, K., & Nagasaka, T.		<i>Material Flow Analysis Model</i>		esto, es necesario realizar una caracterización del material. La mayoría de PVC producido es aplicada en tuberías, barras y material de construcción.	Identificación de los requerimientos del material para ser expuesto a procesos de reciclaje como la adición de aditivos.
Naqvi, M. K., & Sen, A. R.	1991	<i>Thermal stability and thermal characteristics of PVC/cis-PBR blends</i>	Estabilidad térmica, polímeros, PVC, temperatura de transición vítrea	Para definir la estabilidad térmica de una mezcla de polímeros se describe la temperatura del umbral de degradación y la temperatura de transición vítrea. Esta estabilidad, la degradación térmica y la estabilización que conlleva es basada en las interacciones en las matrices de los polímeros.	Descripción de las interacciones entre los polímeros y los estabilizadores. Definición de estabilizadores térmicos y su funcionamiento en procesos de exposición térmica de los termoplásticos centrado en mezclas con PVC.
Negari, M. S., Ostad Movahed, S., & Ahmadpour, A.	2018	<i>Separation of polyvinylchloride (PVC), polystyrene (PS) and polyethylene terephthalate (PET) granules using various chemical agents by flotation technique.</i>	Reciclaje, plástico, flotación, acondicionamiento químico, separación de residuos municipales	Estudio de la separación de una mezcla de plásticos vírgenes tradicionales disponibles en los residuos municipales como PVC, PS, PET, PVA, etc., haciendo uso de un acondicionamiento químico, diferentes temperaturas y variaciones del pH del medio líquido.	Presentación del efecto que genera el tipo de agente químico, su concentración, temperatura de operación y pH en la separación de plásticos por el método de flotación.



Nidoni, P.	2017	<i>Incineration process for solid waste management and effective utilization of by products</i>	Interacción, manejo de residuos, incineración, control de contaminación del aire	Debido al exponencial crecimiento de los desperdicios, existe la reocupación de utilizar y aprovechar estos desperdicios de una manera efectiva y uno de los métodos de hacerlo es la incineración.	Descripción de una de las alternativas de recuperación de energía: incineración. Identificación de las condiciones y factores a tener en cuenta en el proceso de incineración de desperdicios plásticos.
Niyitanga, E., Sarmad, A., Muhammad, B., Hafiz, M.	2021	<i>Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability.</i>	Termoplásticos, reisduos plásticos, polimerización, manejo de despericios, reciclaje, bioremediación	Los plásticos son producidos bajo procesos de polimerización y policondensación y su uso posterior a consumo puede conllevar efectos en el ambiente si no se realiza de la mejor manera. Se discuten los problemas causados y las posibles soluciones que impulsen la reducción del efecto sobre el cambio climático.	Exposición de la problemática actual resultado de la producción masiva de los diferentes plásticos. Análisis de los efectos que causa el manejo inapropiado de los desperdicios de plástico.
Osry, M.	2005	<i>Modern developments and design criteria for unmodified, modified and oriented PVC pipes</i>	PVC, desarrollo, fuerza, tenacidad	Las necesidades actuales han impulsado el desarrollo de avances en materiales de tuberías en términos de ahorro de material y de la mejora de las propiedades. Se describen los conceptos de resistencia y tenacidad para tuberías de presión de PVC-U,	Descripción del ahorro del material y aumento en las tensiones de diseño que logra el PVC-O. Presentación de las aplicaciones del PVC-O frente al PVC no plastificado.



				PVCC-M, PVC-O ilustrando su versatilidad y durabilidad.	Explicación proceso de orientación del PVC para la producción de PVC-O. Variaciones del material posterior al proceso de orientación.
Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K.	2017	<i>Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste</i>	Reciclaje mecánico, reciclaje químico, olímeros, residuos plásticos sólidos	Existen dos principales metodologías para el reciclaje de polímeros: vía química y vía mecánica. En cada una de estas se han investigado un gran número de técnicas que difieren y, de igual forma, se investigan los diferentes retos y estrategias de estas desde un punto académico y aplicado.	Información detallada del reciclaje químico, reciclaje mecánico y de la recuperación de energía. Descripción de los diferentes procesos de disposición de residuos plásticos y sus respectivas condiciones y retos. Descripción degradación termo mecánica del material.
Sadat-Shojai, M., Bakhshandeh, G.	2011	<i>Recycling of PVC wastes. Polymer Degradation and Stability</i>	Reciclaje, PVC, técnicas de separación, residuos plásticos combinados	El reciclaje es una de las formas para abordar la producción masiva de residuos plásticos. También se presenta el estado actual de las técnicas de reciclado de PVC, las más recientes tecnologías y algunas investigaciones en el campo.	Presentación de las aplicaciones actuales del material de PVC. Determinación de los factores que permiten establecer el método de manipulación y disposición de los residuos plásticos. Descripción y explicación de una de las técnicas de recuperación de energía más comunes: incineración.



Saisinchai, S.	2013	<i>Separation of PVC from PET/PVC mixtures using flotation by calcium lignosulfonate depressant.</i>	Separación, flotación, policloruro de vinilo, polietileno tereftalato	Estudio experimental del proceso de flotación por espuma para una mezcla de PVC y PET y sus parámetros: proporción de componente y concentración de calcio.	Presentación de los resultados obtenidos al someter una mezcla de PVC y PET al proceso de separación por flotación por medio de una humectación selectiva del PET
Saitoh, K., Nagano, I., & Izumi, S.	1976	<i>New separation technique for waste plastics.</i>	Separación, humectación selectiva, densidad	Estudio experimental del método de separación por flotación haciendo uso de la humectación selectiva de uno de los componentes de la mezcla. Esto, mediante el cambio de superficie de los plásticos de hidrófoba a hidrófila y, posteriormente, su inmersión en una celda de separación.	Exposición de las ventajas que presenta el método de separación de plásticos por flotación frente a las técnicas convencionales.
Sears, L., Darby, J.	1982	<i>The technology of plasticizers</i>	Plastificantes, propiedades mecánicas	La adición de los diferentes aditivos existentes a los polímeros se realiza con el fin de manipular y mejorar las propiedades mecánicas de un material. En el caso de los plastificantes, esto se realiza con el objetivo de aumentar la flexibilidad y versatilidad del PVC.	Determinación de las propiedades mecánicas del polímero que se ven afectadas al momento de añadir un plastificante. Diferenciación entre propiedades de un material con contenido de plastificante y sin plastificante



Serranti, S., & Bonifazi, G.	2019	<i>Techniques for separation of plastic wastes. Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete</i>	Separación, residuos plásticos	Presentación de las diferentes técnicas de separación de residuos plásticos, su producción, proporción de generación, clasificación y reciclaje.	Presentación y demostración de las desventajas que presenta la separación triboelectrostática y su sensibilidad a las condiciones de operación. Explicación detallada de los factores que afectan la efectividad del proceso de separación triboelectrostática.
Shen, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E.	2002	<i>Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant.</i>	Reciclaje de plásticos, flotación de plasticos, flotación gamma, surfactante, tensión superficial	Análisis de la flotabilidad de siete plásticos (POM, PVC, PET, PMMA, PC, PS y ABS) en presencia de alquilo. Demostración de las condiciones en las cuales la separación por flotación presenta ser la opción más viable.	Demostración de la viabilidad de exponer al material a un proceso de reducción de la tensión superficial como pretratamiento para ser sometido a un posterior proceso de separación por flotación selectiva.
Shent, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E.	1999	<i>A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics</i>	Flotación de plásticos, reciclaje de residuos, separación de residuos	Revisión bibliográfica de la importancia del reciclaje de residuos plásticos y su separación. Análisis de las características físicas y químicas de los residuos, sus limitaciones y los procesos tecnológicos a los cuales son	Exposición de la importancia de una humectación selectiva como proceso de pretratamiento de las partículas antes de ser llevadas a un proceso de separación por flotación selectiva.



				sometidos para lograr una separación efectiva.	Presentación de las diferentes metodologías existentes para la humectación de las partículas de plásticos.
Speight, J. G.	2020	<i>Monomers, polymers, and plastics. Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes</i>	Polímero, monómero, plástico, polimerización	Debido a la gran variación en la estructura de los monómeros, las características químicas y mecánicas de los polímeros varían de igual forma. También se conoce que la polimerización de un compuesto no necesariamente produce moléculas idénticas. Se clasifican y se describen las principales características de los polímeros atribuidas por su composición molecular.	Información específica acerca de la dependencia que existe entre la estructura de un polímero con la susceptibilidad a degradación. Descripción de los parámetros que definen la clasificación de los diferentes polímeros y sus principales diferencias entre sí.
Vlasopoulos, A., Malinauskaite, J. Zabnienska-Góra, A., Jouhara, H.	2023	<i>Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery.</i>	Manejo de residuos plásticos, incineración, impacto ambiental, vertimiento, recuperación de energía	La evaluación del ciclo de vida de los plásticos ha despertado el interés en las empresas y personas desde que se establece que el plástico direccionado al sector de empaque y manufactura necesita ser reciclado para el 2030. Se investigan las diferentes metodologías para disponer de los	Comparación sostenible entre cada una de las técnicas de manejo y disposición de los residuos plásticos. Descripción detallada de las técnicas de recuperación de energía como la incineración.



				residuos de forma armoniosa con el medio ambiente y se presentan las ventajas y desventajas de cada una de ellas.	Explicación de la evaluación del ciclo de vida de los plásticos y sus correspondientes consideraciones.
Walsh, T.	2011	<i>The Plastic Piping Industry in North America. Applied Plastics Engineering Handbook</i>	Tuberías de plástico, CPVC, PVC,	Los materiales más utilizados para la fabricación de tuberías es el PVC y HDPE. Sin embargo, existen materiales especialmente producidos para resistir condiciones y aplicaciones especiales como en el caso del transporte de fluidos con altas temperaturas.	Información acerca de las condiciones de operación del material de CPVC y su diferencia con las de PVC. Describir las ventajas del uso de los termoplásticos de PVC y CPVC frente a otros comúnmente usados en la industria de las tuberías.
Wang, C., Fu, J., Liu, Y.	2015	<i>Flotation separation of waste plastics for recycling-A review</i>	Incineración, flotación de plásticos, separación, manejo de residuos	Revisión bibliográfica de la separación de una mezcla de plásticos por medio del método de flotación por espuma siendo una opción prometedora de separación. Revisión de literatura reciente enfocada en la flotación de minerales vs plásticos, estrategias, métodos, equipos y desafíos actuales.	Presentación de las dificultades del proceso de reciclaje de una mezcla de diferentes tipos de plásticos con diferente estabilidad térmica. Descripción del concepto de flotabilidad y de la hidrofobicidad que presentan los plásticos.



Wu, G., Li, J., & Xu, Z.	2013	<i>Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review</i>	Residuos plásticos, reciclaje de residuos, separación triboelectrostática	Revisión bibliográfica del método triboelectrostático como técnica de separación de mezclas de plásticos el cual hace uso de las diferencias entre las propiedades de la superficie de los diferentes materiales.	Presentación de las ventajas que presenta el método de separación triboelectrostática y los desafíos que este presenta al depender de la eficiencia de carga y a las condiciones en las que se realiza el proceso.
Wypych, G. (2015).	2015	<i>PVC ADDITIVES. PVC Formulary</i>	Plastificante, PVC, aditivos, fillers	La formulación del PVC incluye un gran número de aditivos que le proporcionan una serie de propiedades aplicados a un interés y producto final. Estos aditivos incluyen los plastificantes, fillers, pigmentos, estabilizantes térmicos, modificadores de impacto, etc.	Descripción del funcionamiento de los plastificantes y los cambios que estos generan en el material. Descripción del funcionamiento de los fillers y los cambios que estos generan en el material. Presentación de resultados de estudios de propiedades mecánicas que demuestran los cambios y variaciones que estos le proporcionan al material.
Yan, B., Lu, W., & Cheng, Y.	2012	<i>China goes green: cleaner production of chemicals.</i>	Conversión limpia de carbón, ingeniería química verde, tecnología de bajo carbón	Revisión de los métodos de procesamiento y síntesis ecológicos de productos químicos. Revisión de los procesos de síntesis de cloruro de vinilo asistido por plasma con el fin de mejorar la eficiencia, de obtener	Descripción detallada del material de CPVC, su producción y las diferencias y propiedades que este presenta frente al PVC. Presentación de las ventajas ambientales que presenta el



				un ahorro de materiales y un ahorro en los costes energéticos.	CPVC en la etapa de producción y fabricación.
Yarahmadi, N., Jakubowicz, I., Martinsson, L.	2003	<i>PVC floorings as post-consumer products for mechanical recycling and energy recovery</i>	PVC plastificado, reciclaje mecánico, emisiones, recuperación de energía.	Estudio sobre el cambio de las propiedades de los suelos de PVC durante su vida útil. Identificación de viabilidad como productos posconsumo para un reciclaje mecánico o para la recuperación de energía.	Descripción de los cambios que experimenta el PVC durante su vida útil. Presentación necesidad del uso de plastificantes y de la importancia de conocer los aditivos introducidos en el material para un posible proceso de reciclado
Yarahmadi, N., Jakubowicz, I., Gevert, T.	2001	<i>Effects of repeated extrusion on the properties and durability of rigid PVC scrap</i>	PVC rígido, reciclado, energía de activación	Se estudian los cambios del PVC rígido posterior a un número de extrusiones sin la adición de aditivos con el fin de investigar los cambios en las propiedades y durabilidad. Se evidencian cambios en el alargamiento de rotura, características químicas y se observa una mejora en las propiedades mecánicas debido al aumento en el grado de gelificación del material PVC.	Presentación de las consecuencias y los cambios que experimenta un material de PVC al ser expuesto a procesos que involucran elevadas temperaturas como la extrusión.



Zakharyan, E., Petrukhhina, N., Maksimov, A.	2020	Pathways of chemical recycling of Polyvinyl Chloride: Part 1.	Policloruro de vinilo, despartidos plásticos municipales, dechloración, pirólisis, tratamiento mecanoquímico	Recopilación de la información disponible sobre los diferentes métodos de clasificar los residuos plásticos. Procedimientos basados en pirólisis, gasificación de clorados y procesos de reciclaje químico de cloruro de vinilo y de mezclas de residuos poliméricos.	Información acerca del proceso de pirólisis del PVC, sus limitaciones y las condiciones en las cuales se debe llevar a cabo.
Zhang, Y., Wang, Q., Yalikun, N., Wang, H., Wang, C., Jiang, H.	2023	<i>A comprehensive review of separation technologies for waste plastics in urban mine.</i>	Residuos plásticos, separación	Revisión bibliográfica sobre las diferentes tecnologías existentes para la separación de mezclas de plásticos excluyendo la eliminación de los microplásticos y la pirólisis de plásticos. Descripción de las rutas de separación impulsadas por el plástico y procesos impulsados por productos básicos.	Presentación de la situación actual de las tecnologías de separación, sus ventajas y desventajas frente a las metodologías convencionales.
Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhagen, K., Tekinalp, H.,	2022	Plastic waste upcycling toward a circular economy.	Residuos plásticos, reciclar,	Como propuesta de solución a las grandes cantidades de plásticos que se descartan a diario, se estudian los métodos de	Identificación diferencias entre los distintos tipos de residuos plásticos.



**Celik, S., ...
Ozcan, S.**

catálisis, energía,
compatibilizador

conversión de residuos incluyendo
pirólisis, gasificación,
fotorreformado y reprocesamiento
mecánico.

Exploración de alternativas de
disposición de residuos
poliméricos.
Descripción de los
compatibilizadores y su
importancia al momento de
caracterizar y mezclar dos tipos de
polímeros.



En la Figura 3 se presenta un mapa realizado con la herramienta Litmaps, herramienta de búsqueda de artículos y papers para realizar una revisión bibliográfica, en la cual se ilustra la relevancia de los autores citados en el presente documento y las diferentes relaciones que existe entre los mismos. Se logra observar que más de uno de los autores que presentan mayor relevancia en el documento coinciden con los autores presentados en la Figura 3 como aquellos con mayor número de citas y mayor número de documentos publicados acerca del tema en cuestión. También se puede observar que los autores referenciados cuentan con un gran número de relaciones entre ellos de manera que se establece que se cuenta con información unificada, aceptada y veraz.

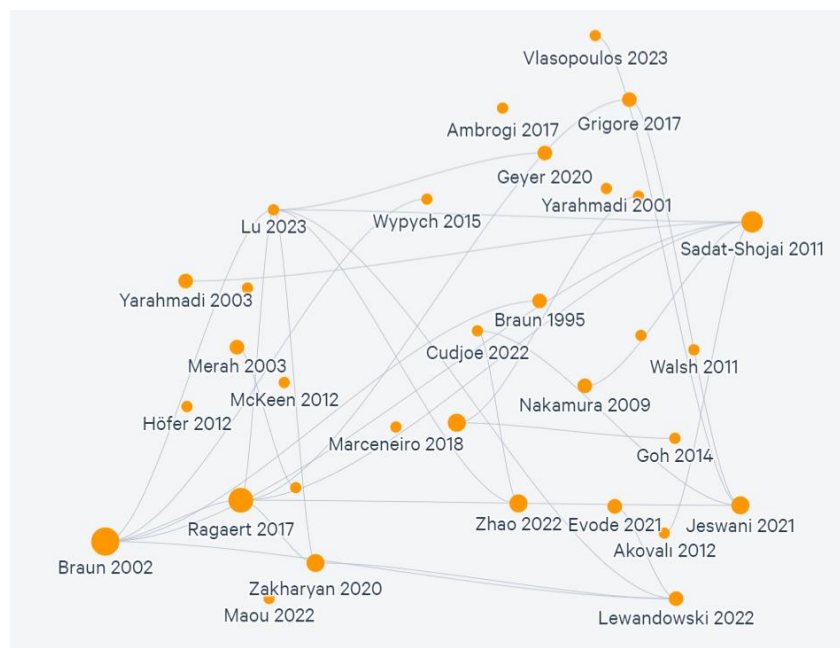


Figura 4. Mapa bibliográfico: Relevancia interna

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. Reciclaje del PVC

En respuesta al exponencial uso del PVC, material termoplástico con un 57% de masa por cloro (Akovali,2012), se han desarrollado una importante cantidad de investigaciones acerca de la correcta disposición del mismo. Al hablar de su reciclaje, el PVC es erróneamente considerado un material con una alta dificultad de reciclado debido a su compleja composición y por su baja estabilidad térmica. Sin embargo, existe un gran número de posibilidades para el manejo de este residuo (Lewandowski et al, 2022).



4.1.1 Recuperación de energía

Una de las alternativas propuestas para la disposición de los residuos de PVC es la recuperación de energía a través de la incineración en la cual la combustión de sustancias orgánicas presentes en los residuos plásticos convierte dicho material en gases de combustión, calor y cenizas (Nidoni, 2017). En particular, el calor o vapor producido en el proceso puede ser utilizado para la generación de electricidad (Cudjoe et al., 2022). Esta técnica es particularmente aplicada en aquellos residuos que contienen una gran cantidad de impurezas o de combustibles sólidos debido a que se busca evitar su llegada a los vertederos (Sadat-Shojai et al., 2011). Adicionalmente, es la tecnología de conversión de residuos a energía más estudiada por su aplicación relativamente sencilla y por reducir la cantidad de residuos dispuestos en los vertederos (Vlasopoulos et al., 2023). Sin embargo, este método trae consigo dificultades ambientales y la necesidad de adoptar medidas de control de los contaminantes generados en el proceso ya sea por condiciones inapropiadas de incineración o por el uso de equipos inadecuados (Ragaert, et al., 2017; Braun, 2002). Al hablar de la incineración del PVC, se evidencia una problemática relacionada con el alto contenido de cloro que, durante el proceso de descomposición térmica, produce grandes cantidades de ácido clorhídrico y cuenta con la posibilidad de la producción de compuestos tóxicos como dioxinas y furanos (Sadat-Shojai et al., 2011).

4.1.2. Reciclaje químico

Por otro lado, el reciclaje químico es un método de reciclaje que comprende una cantidad de tecnologías avanzadas que convierten los desechos plásticos en materias primas como monómeros, oligómeros e hidrocarburos más complejos (Jeswani et al., 2021). Este proceso involucra un cambio en la estructura química del polímero transformándolo en moléculas más pequeñas que pueden ser utilizadas en una polimerización para reproducir el polímero original o un producto relacionado (Grigore, 2017). También se conoce que presenta un alto potencial de aplicación en residuos plásticos heterogéneos y contaminados dado el caso que las diferentes alternativas de separación no sean viables económicamente (Ragaert, et al., 2017). Sus posibles mecanismos pueden ser: hidrogenación, pirólisis, gasificación y degradación catalítica (Lu et al. 2023). El principal de estos es la pirólisis en la cual se obtienen monómeros y materia prima petroquímica que puede ser utilizada posteriormente para la producción de varios productos teniendo en cuenta que la presencia de una mínima cantidad de compuestos clorados no permite el uso de los productos de dicho proceso como combustible (Zakharyan et al., 2020). Lo anterior a través de la descomposición del PVC a intermedios y HCL, descomposición de los intermedios a polienos y algunos volátiles y, finalmente, descomposición de los polienos a compuestos aromáticos y carbones. Sin embargo, a pesar de que el reciclaje químico es menos sensible a la falta de homogeneidad que el mecánico, la energía utilizada para descomponer el polímero, producir y fabricar el



producto final, se destruye; por esta razón, hablando desde un punto de vista energético, es menos aconsejable que el mecánico. (Sadat-Shojai et al., 2011)

4.1.3. Reciclaje mecánico

Finalmente, se conoce como reciclaje mecánico al conjunto de operaciones de separación, molienda y alimentación del material molido a un equipo de conversión o extrusión sin alterar la composición química original (Sadat-Shojai et al., 2011). El mayor problema asociado con el reciclaje mecánico está relacionado con la degradación del polímero bajo el tratamiento térmico y las condiciones bajo las cuales es sometido en el proceso. La degradación termomecánica que sufre el material es causada por el cizallamiento mecánico y el calentamiento del polímero durante la etapa de fundido (Ragaert, et al., 2017). Esta degradación está relacionada con la baja estabilidad térmica del PVC, es decir, la eliminación del cloruro de hidrógeno a una temperatura relativamente baja o bajo la influencia de la luz (Braun,2002). Debido a lo anterior, se hace necesario el uso de algunos aditivos y estabilizantes que mejore su procesamiento.

4.1.4. Aditivos y estabilizantes

Los estabilizadores térmicos son añadidos a los polímeros con el fin de protegerlos contra el estrés térmico sufrido durante su procesamiento y durante su vida útil. La estabilización del PVC, el termoplástico comercial más sensible al calor, consiste en la acción estabilizadora sobre los átomos de cloro para evitar la deshidrohalogenación y, secundariamente, en la neutralización de HCl mediante la incorporación de jabones o la captura de HCl mediante grupos epoxi (Hofer, 2012). Para explicar este fenómeno, también se propone otra hipótesis en la cual se le atribuye la estabilización a la acción como no polar reductora de tensiones polares e interacciones entre los átomos de cloro al calentarse (Naqvi, 1991). Al considerar el reciclaje de PVC, se debe tener en cuenta el hecho de que, además de los estabilizadores mencionados, se utilizan otros aditivos como lubricantes externos o internos, modificadores de flujo y plastificantes. Su uso permite el ajuste de las propiedades funcionales y de procesamiento del PVC en donde, en algunos casos, su adición puede ahorrar hasta un 90% de la energía necesaria para su tratamiento (Lewandoski et al., 2022)

En el caso del PVC el uso de *fillers* como co-estabilizadores resulta ser una alternativa satisfactoria al momento de mejorar la estabilidad térmica del polímero. Este permite un reciclaje de los desechos de PVC sin necesidad de adicionar estabilizadores adicionales. El carbonato de calcio es adecuado para este fin debido a que posee la capacidad de reaccionar con el cloruro de hidrógeno. También proporciona la ventaja de mejorar las propiedades mecánicas, su bajo precio y su alta disponibilidad (Braun,2002). En la Figura



5 se observa el incremento de la estabilidad térmica del material de manera que se identifica un aumento en el tiempo que le toma al termoplástico el proceso de deshidrocloración en el caso del material con tiza en comparación al que no lo tiene. De igual forma, en la Figura 6 se ilustran los resultados obtenidos por Braun (2002) en el cual se demuestra la variación de las propiedades mecánicas del material. Se observa un aumento del módulo de estabilidad el cual describe la rigidez del material en donde a mayor rigidez, mayor será el módulo de estabilidad. También se observa que no hay un cambio significativo en el alargamiento de rotura, resistencia al impacto y la fuerza de tensión que poseía originalmente el material indicando que la adición de este *filler* no desacredita las propiedades que fueron atribuidas al material inicialmente.

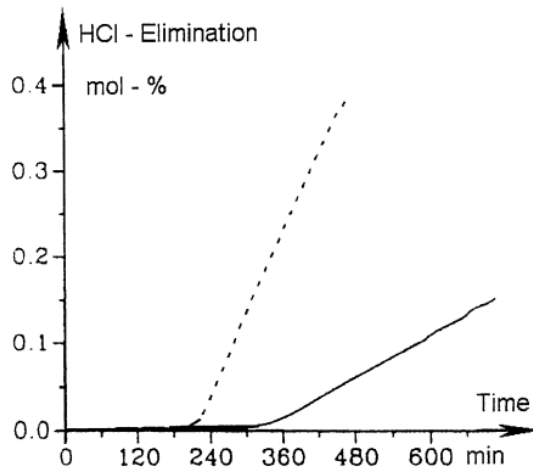


Figura 5. Deshidrocloración del PVC a 180°C bajo nitrógeno. PVC con 10 phr de filler (-). PVC sin filler (- -). Tomado de Braun (2002).

Table 1
 Results of the mechanical measurements of the filled and unfilled PVC, according to DIN 53455 and DIN 53735

	Modulus of elasticity (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation at break (%)	Notched impact strength (kJ/m ²)
PVC without chalk	3190	66.1	10.5	4.3
PVC + 10 phr chalk	3360	62.4	11.0	5.0

Figura 6. Resultados medición propiedades mecánicas del PVC con y sin filler. Tomado de Braun (2002).

Otro aditivo comúnmente usado son los plastificantes, estos son incorporados en el plástico o elastómero con el fin de incrementar su flexibilidad, trabajabilidad o distensibilidad (Sears & Darby, 1982). Este reduce la viscosidad de fusión, baja la temperatura de una transición vítrea de segundo orden o baja el módulo elástico de un polímero (Hofer, 2012). En la Figura 7 se observa el efecto de la adición de plastificantes



en la temperatura de transición vítrea (T_g) del PVC, es decir, la temperatura en que se evidencia un cambio de estado duro a blando o viceversa. Se establece que, a medida que se añade mayor cantidad de plastificante, la temperatura de transición vítrea disminuye explicando la resistencia del PVC plastificado a las bajas temperaturas. Además, uno de los factores que deben tenerse en cuenta al momento de evaluar su adición es la miscibilidad entre el plastificante y el polímero. Si el plastificante es soluble a una alta concentración de polímero se conoce como plastificante primario y este gelificará el polímero en un rango normal de temperatura de procesamiento y con gran rapidez. Un plastificante secundario, es aquel que, por el contrario, tienen menor capacidad de gelificación y puede generar una plastificación parcial del polímero (Ambrogi et al., 2017). Las resinas del PVC flexible contienen una gran cantidad de aditivos, en su mayoría plastificantes, usualmente para hacerlo más suave, flexible y estable. Gracias a esto, puede ser usado para ropa, membrana para techos y juguetes. La mayoría de plastificantes usados son ftalatos (Akovali, 2012). Para su reciclaje, es necesario tener en cuenta el factor de la pérdida del contenido del mismo en el PVC ocurrido durante su primer uso. Se conoce que la pérdida del plastificante conlleva a la disminución de las propiedades mecánicas atribuidas al material y, debido a esto, es necesario la adición de nuevos plastificantes que compensen la pérdida del anterior (Yarahmadi et al., 2003).

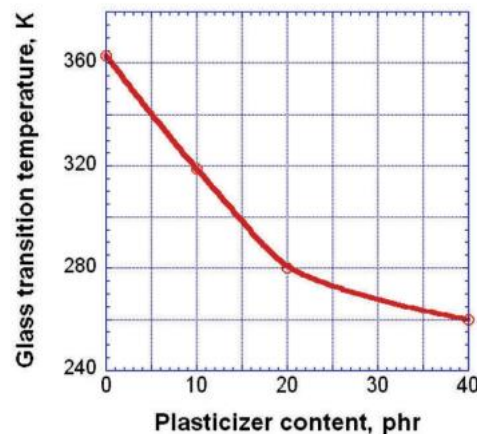


Figura 7. Temperatura de transición vítrea del PVC con diferentes cantidades de plastificantes. Tomado de Wypych (2015).

Ahora bien, para un correcto reciclaje del PVC es necesario tener conocimiento de los distintos tipos de PVC producidos y de la información detallada del material específico de interés. Esta clasificación es determinada por los aditivos y estabilizadores empleados con el fin de proporcionarle al material las propiedades adecuadas y necesarias para su respectiva aplicación en la industria (Braun, 2002). Su uso, como se ha mencionado, genera diferencias en propiedades como la estabilidad residual, peso molecular, estabilidad térmica, módulo de estabilidad, etc. Conocer esta información es necesaria para decidir la fiabilidad del reciclado y la técnica de reciclado que puede ser usada en el



proceso. Por esta razón, reciclar residuos de PVC en la misma planta de producción en la cual se conoce la composición exacta del material representa una ventaja significativa (Lewandowski et al., 2022).

Un claro ejemplo de la importancia de la información disponible del material PVC es la determinación de la técnica de procesamiento y la adición de estabilizadores a partir del k-value. Al hablar del PVC, un limitante es su estabilidad térmica. Por esta razón, se requiere la adición de estabilizadores de calor para prevenir la deshidrocloración y se conoce que la cantidad de estabilizador activo de un residuo posconsumo tiene que ser medido para determinar si este requiere de una restabilización en el reciclaje (Yarahmadi et al., 2003). También se conoce que el k-value, unidad de medida usada por los fabricantes para describir el peso molecular del material y su nivel de polimerización (Marceneiro et al., 2018), está ligado a la degradación y, por consiguiente, a la estabilidad debido a que la susceptibilidad de un polímero a la degradación depende de su estructura (Speight, 2020). Este valor de peso molecular o su distribución, como lo afirma Braun (2002), puede ser modificado bajo la influencia del calor utilizado en el reciclaje mecánico y, con la existente relación entre el k-value con las propiedades mecánicas de un material como la estabilidad térmica, representa ser una de las variables que influyen en el límite térmico que debe contar el procesamiento del material con el fin de evitar la deshidrocloración del compuesto.

En el caso de un reciclaje de productos posconsumo, se crea la necesidad de implementar tratamientos adicionales en los cuales se extraigan los diferentes aditivos del producto. Esto con el fin de agregar los aditivos adecuados para obtener las propiedades requeridas para la nueva aplicación del material (Lewandowski et al, 2022). De igual forma, se hace necesario conocer el k-value del PVC mediante métodos como la determinación de la viscosidad de una solución de PVC disuelto en ciclohexano haciendo uso de la ecuación de Mark-Houwink o por medio de la cromatografía de permeación en gel. (Braun,2002). En el caso contrario, en el reciclaje de desperdicios preconsumo se conoce la composición del material y, generalmente, se reprocesan directamente mediante molienda. Además, se ha demostrado que el PVC no plastificado puede ser procesado repetidas veces sin presentar signos de degradación y que este número de veces se puede aumentar mezclando el material reciclado con material virgen en una cantidad superior al 30%. De hecho, se conoce que, en algunos casos, el material PVC mezclado logra ahorrar hasta un 90% de energía en comparación al aporte energético necesario para la producción y uso de materiales vírgenes reduciendo así su aporte en las emisiones de CO₂ (Lewandowski et al., 2022).



4.2. Reciclaje del CPVC

4.2.1. Introducción

El PVC clorado (CPVC) es un termoplástico producto de la cloración adicional de la resina de PVC. Su contenido puede ser variable desde, en el caso de las resinas comerciales, un 63% hasta un 74% en masa permitiendo afinar sus propiedades finales (Yan et al., 2012). Este material es el resultado del proceso de poscloración del PVC en una reacción secundaria posterior a su polimerización. La adición de cloro a la molécula de PVC se ejecuta con el objetivo de aumentar la temperatura de transición vítrea (T_g) de la base de la resina desde 95 a 115-135°C. Una de las ventajas que presenta el material es que las tuberías fabricadas con este material resisten presiones de hasta 1.4 MPa comparado con 0.95 MPa del PVC a 50°C (Merah et al., 2003). También, el aumento de contenido de cloro permite un aumento de la temperatura de deflexión desde 68°C a 103°C impulsando su actual aplicación en transporte de agua a muy altas temperaturas (Walsh, 2011).

Se considera que la comercialización del PVC clorado debe seguir siendo comercializado debido a sus características superiores frente al PVC al ser térmicamente más estable, poseer mayor capacidad retardante de llama y, en consecuencia, al ofrecer un mayor valor añadido neto (Yan et al., 2012). De igual forma, su producción ayuda a disminuir el impacto ambiental al momento de disminuir el cloro, el cual es un producto tóxico, inmovilizándolo en las resinas de estado sólido y al poder utilizar el exceso de cloro gaseoso de la red de producción industrial de cloro-álcali fijándolo en las resinas y generando un efecto en el cloro neto de gran importancia (Bai et al., 2020; Yan et al., 2012).

La reacción de cloración normalmente inicia mediante la aplicación de energía ultravioleta o térmica con el fin de descomponer el cloro gaseoso en cloro radical libre, que luego reaccionará con el PVC en un proceso de posproducción que reemplaza esencialmente una porción del hidrógeno del PVC con cloro (Yan et al., 2012). Por lo tanto, todo el proceso de cloración se logra resumir en dos pasos: la cloración en las superficies del PVC, y la difusión del cloro desde la superficie hacia el interior de las partículas (Lu et al., 2011). Gracias a que los átomos de cloro ocupan una mayor área en la estructura del polímero, la molécula de CPVC posee gran rigidez, una temperatura de ablandamiento mayor, un punto de reblandecimiento más alto y es conocido por su buena resistencia química.

4.2.2. Características y propiedades

Como se ha mencionado, en comparación al PVC, el PVC clorado tiene un módulo más alto y mejor resistencia a la tracción, razón por la cual es utilizado para la distribución de fluidos calientes, de líquidos químicos industriales, entre otras (Harper, 2000). También



se conoce que posee propiedades fisicoquímicas superiores como estabilidad térmica, resistencia a corrosión y resistencia a ambientes exteriores de manera que, a medida que la temperatura disminuye en los ambientes exteriores, el CPVC conserva su resistencia.

Sin embargo, a pesar de presentar una mayor estabilidad térmica que el PVC, esta propiedad dependerá de las condiciones y el método de cloración implementado al momento de su producción (Bai et al., 2020). También, a pesar de presentar superiores propiedades físicas, Merah (2007) estableció que propiedades como el módulo de elasticidad, indicador de rigidez, y la resistencia a la tracción se ven afectados al verse sometido a condiciones de meteorización natural presente en los entornos comunes de su actual aplicación. Es por esto que, al igual que el PVC, este material necesita la implementación de algunos aditivos tanto en su producción como en procesos posteriores a su uso.

Por otro lado, para su disposición, al igual que el PVC, este puede ser aprovechado energéticamente, llevado a vertederos o reciclado. Al hablar de su reciclaje, se realiza el mismo proceso mecánico que el PVC en el cual se introduce el material a procesos de separación, molienda y alimentación a una extrusora sin alterar su composición química. En este proceso se añaden también los diferentes aditivos necesarios para el procesamiento del material y para la aplicación del material reciclado resultante. No obstante, al presentar una molécula más pesada debido a la presencia de cloro en lugar de hidrógeno y, en consecuencia, presentar una mayor densidad en comparación al PVC, su procesabilidad se vuelve más difícil. De igual forma, como lo afirman Carrol et al. (2011), existen dos consideraciones al momento de evaluar el proceso de extrusión: la necesidad de eliminar el aire y los componentes volátiles por medio de un respiradero y el peso molecular de la resina debido a que las condiciones de lubricación, estabilización y procesamiento deben estar en equilibrio para así gestionar el calentamiento por cizallamiento. El CPVC es un material más rígido y, debido a esto, operaciones como la molienda difieren a la del PVC y requieren de maquinaria con la capacidad de tratar con este tipo de materiales.

A pesar de que el uso de PVC con CPVC no es típicamente usado en los mismos sistemas o aplicaciones, actualmente se han desarrollado investigaciones en torno a la mezcla de estas resinas con el fin de combinar la fácil procesabilidad del primero con la alta resistencia al calor del último (Clark et al., 1982). Así mismo, se busca mejorar la calidad y versatilidad de estos en las diferentes aplicaciones desarrolladas en la industria. Para llegar a esto, es necesario que los polímeros sean miscibles entre sí. La miscibilidad de una mezcla de polímeros es usualmente determinada con el comportamiento morfológico de la mezcla, estudiando la mezcla o con la transición vítrea de la mezcla. El método más común es la medición de la temperatura de transición vítrea (T_g) en donde la existencia de una sola T_g dependiente de la composición indica una mezcla íntima de los polímeros, mientras que la aparición de dos T_g indica una muestra inmiscible de dos fases (Goh, 2014). Con relación a lo anterior, se conoce que la miscibilidad de los polímeros de interés dependerá del método de mezclado, de la composición de la mezcla, del contenido de cloro del CPVC y del método de poscloración (Clark et al., 1982). En primer lugar, Carmoin et al. (1977) establecieron que se obtiene una única T_g , indicador de favorable miscibilidad, al momento de mezclar los polímeros haciendo uso de un plastógrafo



Brabender con producto de molienda y por medio de una sinterización del producto posterior a su gelificación. Demostraron que realizar este mezclado en seco por compresión con un molde de conipresión resulta en dos valores de T_g diferentes correspondientes a cada uno de los polímeros. En segundo lugar, Carmoin et al. (1977) encontraron que el PVC y CPVC con 67.5% de contenido de cloro fueron incompatibles mientras que la mezcla de PVC con CPVC con 65.2% de contenido de cloro presentan un comportamiento de compatibilidad. También, investigaciones de Clark et al. (1982) establecieron una mayor miscibilidad entre mezclas de PVC y CPVC con entre 64% y 65% de contenido en cloro.

En este mismo orden de ideas, tomando en cuenta los factores de compatibilidad mencionados anteriormente, se considera la posibilidad de poder realizar un reciclaje mecánico de una mezcla de PVC/CPVC. Para esto, al igual que el reciclaje de PVC mencionado en el capítulo anterior, es necesario tener conocimiento de la composición de cada uno de los residuos de los polímeros con el fin de poder identificar los diferentes aditivos que fueron añadidos en su fabricación y, así mismo, lograr determinar los aditivos necesarios para que su reciclaje sea viable y pueda ser utilizado en la aplicación requerida. De igual forma, conociendo los datos importantes de la composición del CPVC como el contenido de cloro, se logra conocer si es posible o no su combinación con el PVC para ser sometido a un posterior proceso de reciclado.

4.3. Reciclaje del PVC-O

4.3.1. Introducción

El PVC molecularmente orientado es uno de los materiales más prometedores con potencial capacidad de reemplazar materiales metálicos y de PVC debido a la peculiar orientación de sus cadenas poliméricas. Esta orientación puede ser axial o biaxial y le proporciona un límite elástico de más del doble en comparación al PVC no plastificado, una menor fragilidad y mayor resistencia a los golpes (Campi et al., 2014). Una de las mayores aplicaciones de este material es su instalación en tuberías a presión y ha logrado ser un producto competitivo en el sector frente a tuberías como PVC no plastificado debido a que el proceso en línea que posee ofrece mayores tasas de producción y costos de fabricación reducidos. Adicionalmente, la notable combinación de propiedades como resistencia y tenacidad logradas permite un ahorro del material y mayores tenciones de diseño (Osry, 2005).

Se conoce que los termoplásticos están formados por largas cadenas de moléculas formadas por carbono, hidrógeno y otros elementos. El PVC cuenta con la característica de que sus cadenas tienen una disposición tipo “espagueti” clasificándolo como polímero amorfo. Al momento en que este se calienta hasta su temperatura de transición vítrea T_g



y se estira, las cadenas que lo conforman tienden a orientarse en la dirección de la tensión aplicada formando una estructura celosía como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Ilustración orientación molecular polímer. Tomado de Molecor (2016).

La orientación biomolecular es un proceso en el cual, por medio de una deformación mecánica de una tubería extruida, se producen modificaciones significativas en las propiedades mecánicas: mejora en fluencia, mayor resistencia a la propagación de grietas, aumento del módulo de Young y mayor resistencia a la tracción permitida (Chauffoureaux, 1981). Para esto, se estira el tubo PVC bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación inducida en la mayor parte del material produciendo una alineación de las moléculas en dirección a la tensión ejercida. Posterior a la orientación, la tubería se enfría rápidamente a temperatura ambiente (Campi et al., 2014). La orientación se logra mediante un proceso que orienta las moléculas de cadena larga de la materia prima del PVC-U (no plastificado) al aumentar el diámetro de los tubos extrusionados a alta temperatura y enfriándolos rápidamente ya sea con agua o con aire. El aumento de casi el doble de la resistencia a la tracción produce mayores diámetros internos, menor material para la producción de un tubo, reduce el peso para la misma presión nominal de la tubería, aumenta la capacidad hidráulica, mejora la manipulación e instalación del material y aumenta en gran medida las distancias cortas y resistencia del material a largo plazo (Ferrante et al., 2015; Osry, 2005).

La producción de PVC-O se realiza a partir de tuberías extruidas de PVC. Sin embargo, para llegar al material de interés es necesario tener en cuenta reglas estrictas para la elección de la calidad del PVC y los aditivos de procesamiento. De igual forma, se debe tener en cuenta que, si se recalienta el PVC biorientado a una temperatura mayor que la temperatura de transición vítrea, este perderá completamente la orientación y volverá a la forma original previa a este proceso (Campi et al., 2014). En primer lugar, para obtener una lámina que logre estirarse biaxialmente lo suficiente como para alcanzar la resistencia al impacto necesaria, se debe hacer uso de un grado de extrusión de PVC de alto peso molecular y aditivos que permitan alcanzar una buena gelificación sin disminuir el HDT del polímero, es decir, su temperatura de deformación al calor. En segundo lugar, la estabilidad térmica del compuesto polvo obtenido al mezclar el polímero con los aditivos debe ser lo suficientemente altos como para permitir un proceso de extrusión continua. Además, solo se pueden utilizar aditivos que no reduzcan la resistencia a la intemperie del PVC (Chauffoureaux, 1981).



4.3.2. Características y propiedades

Con la creciente necesidad de superar los límites que presenta el material PVC como su fragilidad, baja resistencia mecánica y baja resistencia a la propagación de una fisura, los productores de este material encuentran la orientación como una solución factible. Como principal resultado de este proceso se obtiene una potencialización de las propiedades mecánicas haciendo que este nuevo material se caracterice por su alta resistencia a los impactos y alta fluencia (Campi et al., 2014). También se conoce que el PVC contiene un nivel bajo de cristalinidad, valor que describe la rigidez, resistencia química y resistencia mecánica del polímero, y que este tiene una gran influencia en su procesamiento, plastificación y propiedades. Estudios han demostrado que el PVC-O posee la ventaja de presentar mayores niveles de cristalinidad pasando de un comportamiento amorfo a una estructura mesomorfa limitada (Kim y Gilbert, 2004).

Al analizar en más detalle las propiedades mecánicas del PVC-O se determina, como se observa en la Figura 9 que este presenta un menor porcentaje de deformación al ser expuesto a un determinado esfuerzo. De igual forma, debido a su resistencia a la fatiga y resistencia química, este material es capaz de soportar una vida útil de más de 100 años. Se conoce que los materiales pierden propiedades mecánicas a lo largo de su vida útil, característica conocida como fluencia, pero el PVC-O presenta la ventaja de manifestar esta característica en menor grado y, por consiguiente, poseer una mejor resistencia hidrostática a largo plazo como se ilustra en la Figura 10. Al hablar de la capacidad hidráulica de este material se obtiene que, al reducir el espesor de la pared y al poseer una superficie extremadamente lisa, se obtiene un mayor diámetro hidráulico y una disminución de las pérdidas generando así un aumento de esta propiedad. Como se observa en la Figura 11, la capacidad hidráulica del PVC-O supera tanto al PVC sin modificar como al PE.

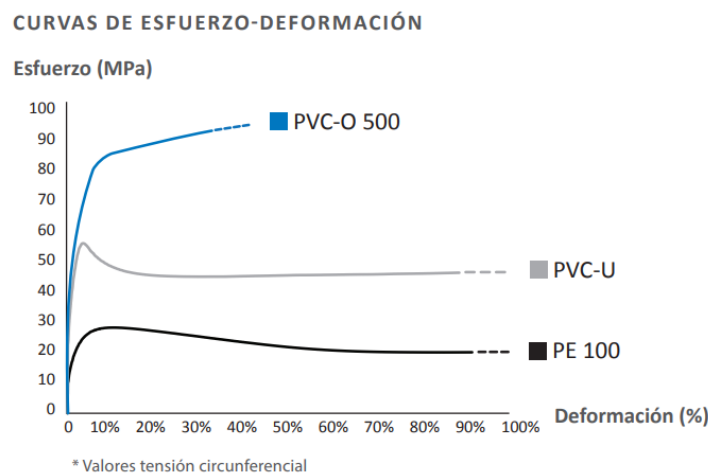


Figura 9. Curva Esfuerzo-Deformación. Tomado de Molecor (2016).

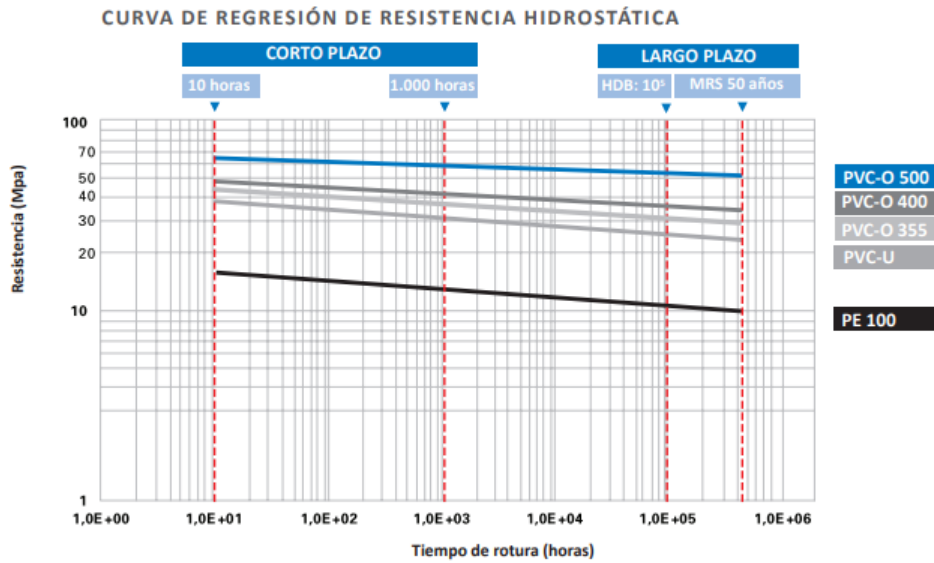


Figura 10. Curva regresión de resistencia hidráulica. Tomado de Molecor (2016)

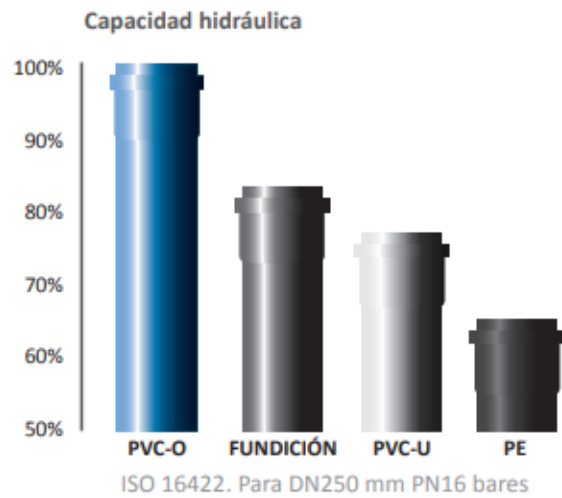


Figura 11. Comparación capacidad hidráulica. Tomado de Molecor (2016)

Como se ha mencionado anteriormente, el PVC-O posee una serie de características y propiedades como la tenacidad y rendimiento las cuales son resultados de la estructura laminar o en capas desarrollada en el proceso de orientación molecular. Este posee la ventaja de que, en caso de sufrir alguna grieta por alguna perturbación, su paso a través del material se ve dificultado y su propagación es evitada (Osry, 2005). De igual forma, a diferencia del PVC rígido el cual presenta una rápida disminución en la resistencia al impacto cuando este es expuesto a temperaturas menores a 0°C, la orientación molecular biaxial del PVC incrementa esta resistencia y reduce la dependencia que existe entre la temperatura y su propiedad. Lo anterior lo afirma Chauffoureaux (1981) y es mostrado en la Tabla 2.



Tabla 2. Test impacto a tensión. Tomado de Chauffoureaux (1981)

Temperatura (°C)	Test de resiliencia en impacto a tensión	
	PVC grado normal $\left(\frac{kJ}{m^2}\right)$	PVC biaxialmente orientado $\left(\frac{kJ}{m^2}\right)$
23	600	1600
0	280	1600
-20	215	1600
-40	<200	1580
-60	<200	1570

Existen investigaciones que demuestran que la variación en las propiedades mecánicas, posterior a la orientación del material, puede ser alterada con el tipo de PVC utilizado (Hitt y Gilbert, 2000; Liu y Gilbert, 1987). Hitt y Gilbert (2000) realizaron un estudio de las propiedades de tres diferentes PVC antes y después de realizar un proceso de orientación: PVC rígido, PVC flexible con 30 phr de plastificante y PVC flexible con 70 phr de plastificante. Sus principales resultados se presentan en la Tabla 3 y a partir de ellos se obtiene que, como era de esperarse, la orientación biaxial mejora significativamente la resistencia a la tracción del PVC tanto rígido como flexible y reduce el alargamiento a la rotura. También afirman que, bajo las mismas condiciones de estiramiento, la relación entre la cristalinidad que presenta el material antes y después de la orientación disminuye a medida que se adiciona plastificante. Es importante recordar que el grado de cristalización en un polímero describe la resistencia mecánica del mismo y que el PVC se caracteriza por presentar baja resistencia a la fatiga y baja resistencia mecánica.

Tabla 3. Propiedades de tracción de PVC orientado y no orientado. Tomado de Hitt y Gilbert (2000)

Plastificante (phr)	Propiedades de tracción			
	σ_B (MPa)		ε_B (%)	
	No orientado	Orientado	No orientado	Orientado
0	55.4 (3.4)	79.3 (2.9)	213 (22)	111 (10)
30	29.8 (1.4)	51.9 (2.9)	331 (22)	271 (6)
70	15.3 (0.4)	23.2 (1.1)	613 (13)	380 (19)

Ahora bien, al hablar del proceso de reciclaje de este tipo de materiales se tiene que actualmente las empresas productoras de PVC-O realizan un reciclado del material sobrante en el mismo proceso de fabricación. El proceso consiste en que, por ejemplo, en la fabricación de tuberías las resinas del PVC son llevadas a la etapa de extrusión, posterior a esto, se lleva el material a una deformación mecánica por la cual se realiza la orientación del mismo y, finalmente, el material orientado sobrante se lleva nuevamente



a la etapa de extrusión. Esto es posible debido a que, como se ha mencionado anteriormente, una vez el material orientado sea expuesto a temperaturas mayores a la temperatura de transición vítrea, este pierde su orientación y vuelve a la forma original permitiendo así que pueda ser tratado con el material virgen que es insertado en la etapa de extrusión. La Figura 12 ilustra el proceso descrito anteriormente. Al realizar este proceso en el punto de fabricación, una de las ventajas que surgen es que se conoce la caracterización de la materia prima que se quiere reciclar, es decir, se conoce el grado del PVC, la cantidad y el tipo de aditivos utilizados en su fabricación y los diferentes plastificantes utilizados.

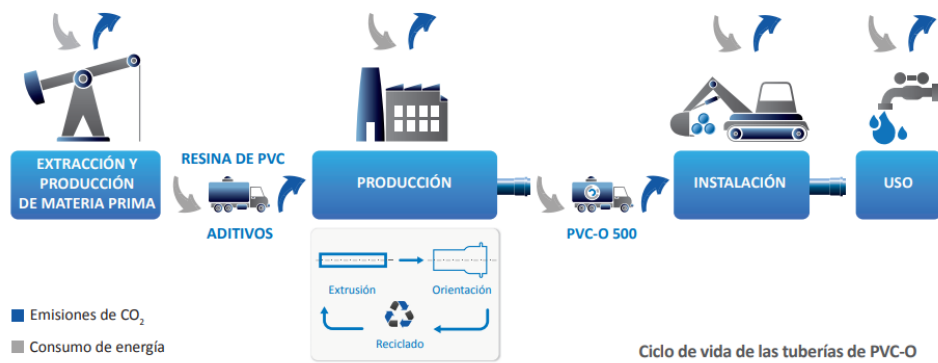


Figura 12. Ciclo de vida de tuberías PVC-O. Tomado de Molecor (2016)

4.4. Reciclaje del PVC mezclado con otros plásticos

4.4.1. Introducción

Como se observa en la Figura 13, el PE, PVC, PP y PET representan aproximadamente el 80% de los residuos plásticos generados y, al existir un contacto directo en las etapas de disposición de los mismos, existe un riesgo de contaminación entre ellos. Debido a esto, se crea la necesidad de la producción de información acerca de los efectos que genera la presencia de más de uno de estos polímeros en procesos como el reciclaje.

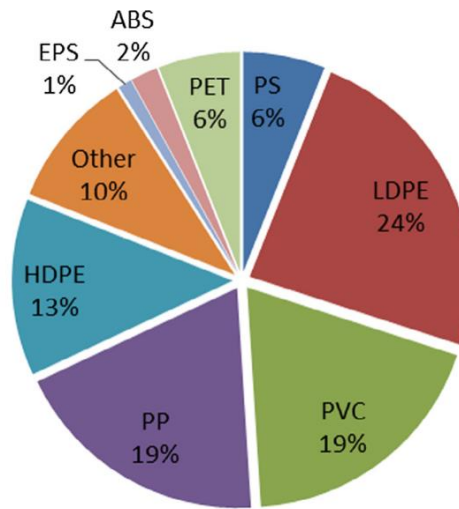


Figura 13. Composición por tipo de polímero de los residuos plásticos. Tomado de Ragaert et al. (2017)

El principal reto que enfrenta el reciclaje mecánico de los residuos mezclados con otros plásticos es que estos deben ser separados efectivamente. Esto debido a que el reciclaje mecánico es altamente sensible a las impurezas y, por lo general, diferentes tipos de plásticos no son compatibles entre sí. Todos ellos poseen diferentes características físicas como puntos de ebullición, densidad, dureza e inmiscibilidad. Por ejemplo, se ha reportado que el PET en una corriente de reciclaje de PVC reduce significativamente el valor del material debido a la formación de grumos cristalinos de PET (Wang et al., 2015). Se conoce que la diferencia en los puntos de fusión y, en consecuencia, en la temperatura del tratamiento del polímero en plásticos mixtos genera problemas en el reciclaje de plásticos mixtos debido a que este es a menudo realizado a la temperatura requerida para el tratamiento del polímero de mayor punto de fusión presente en la mezcla, lo que conduce al sobrecalentamiento y la degradación de algunos componentes de bajo punto de fusión y, por tanto, al deterioro de sus propiedades. Este sobrecalentamiento genera degradación en los componentes de bajo punto de fusión y, al hablar de una mezcla de PVC con PET, este acelera considerablemente la deshidrocloración de cloruro (Zakharyan et al., 2020). En la Figura 14 se presentan los rangos de temperatura de procesamiento de algunos de los plásticos más comunes dentro de los cuales se debe someter cada tipo de plástico para su correcto moldeado. Como se menciona anteriormente, en procesos de reciclado, se somete la mezcla a la temperatura de mayor punto de fusión, por tal razón, combinaciones de plásticos con rangos de temperaturas de fusión que presentan diferencias significativas pueden causar degradación de uno de ellos y, por lo tanto, propiedades mecánicas indeseadas. En el caso contrario, esta limitación se descarta al momento de tratar materiales en los cuales exista un solapamiento de los rangos de temperatura como es el caso del PET y PC.

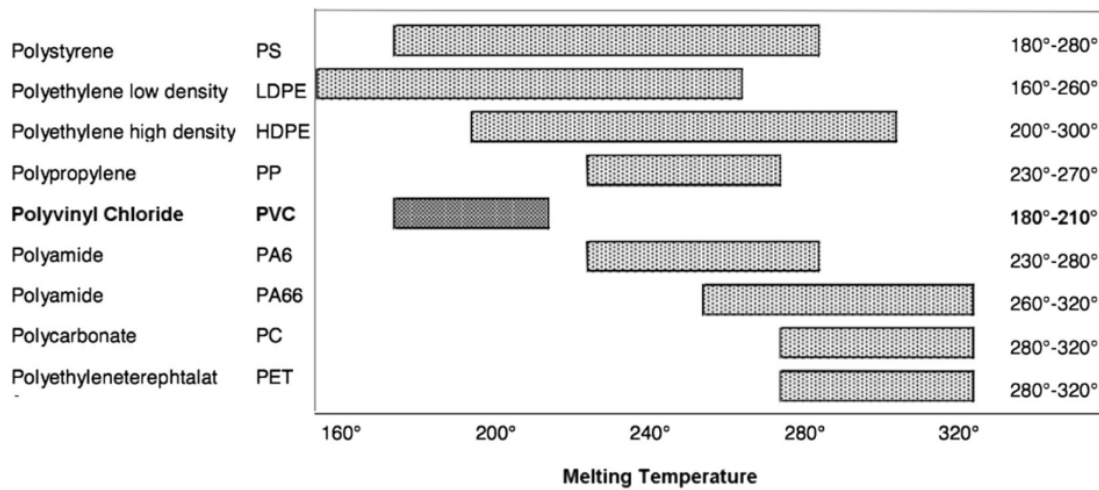


Figura 14.
 Rango de temperaturas de procesamiento por tipo de polímero. Tomado de Ragaert et al. (2017)

El reciclaje de residuos plásticos mixtos ha presentado un incremento en el mundo debido a los costos en los materiales, el aumento de materias primas y el impacto ambiental que genera. Actualmente, una parte importante de estos desechos es dispuesto en vertederos o es sometido a procesos de incineración lo cual aumenta gravemente los problemas ambientales. En este orden de ideas, para poder realizar un reciclaje de cada plástico, se recomienda que estos sean separados entre sí ya que cada uno de los plásticos presenta propiedades y aplicaciones diferentes (Negari et al., 2018). De igual forma, se conoce que, debido a su estructura química, diferentes tipos de plásticos no deben ser mezclados para el proceso de reciclaje y, que la contaminación del producto principal con un polímero con diferente estabilidad térmica o punto de fusión puede llegar a limitar la calidad del plástico reciclado. La incompatibilidad, decoloración, disminución de propiedades físicas y la degradación del polímero causan una disminución en el precio del material en comparación con los vírgenes (Wang et al., 2015)

4.4.2. Compatibilizadores

La mezcla de diferentes polímeros se ha convertido en una ruta conveniente en la industria para el desarrollo de nuevos materiales con el fin de combinar las excelentes propiedades de cada uno de los polímeros involucrados. Esta mezcla se suele dar durante su procesamiento en la etapa de extrusión, sin embargo, las estructuras no siempre son termodinámicamente miscibles y no son capaces de generar mezclas homogéneas. En estos casos, el polímero con mayor concentración va a formar una fase continua mientras que el de menor concentración se dispersará en el continuo (Ambroggi et al., 2017). Con el fin de evitar lo anterior, en la fabricación de los materiales se recurre a la adición de compatibilizadores. Un compatibilizador es un tercer componente introducido en la mezcla de polímeros con el fin de reducir la tensión interfacial y promover la adhesión



interfacial entre los polímeros inmiscibles (Ragaert et al., 2017). Un agente compatibilizador hace referencia a un conjunto de especies macromoleculares que exhiben actividades interfaciales en mezclas heterogéneas. Generalmente, estas poseen la estructura de bloque, con uno miscible a un componente de la mezcla y un segundo bloque miscible con el otro componente (Ambrogi et al., 2017).

En relación a esto, se han desarrollado un gran número de investigaciones en las cuales se ha determinado la variación de las propiedades del material al momento de añadir un compatibilizador. Por un lado, se encuentra Maou et al. (2022) quienes estudiaron la adición del compatibilizador anhídrido maléico (MAH) en una mezcla de PVC y HDPE. A partir de esta adición, se mejora la compatibilidad térmica de la mezcla de polímeros y se evidencia una mejora significativa en algunas de las propiedades mecánicas del material resultante. En la Figura 15 se muestran algunos de los resultados obtenidos por los autores en los que se demuestran que, con la adición del compatibilizador mencionado, se experimenta un aumento en la resistencia a la tracción, módulo de tracción, fuerza flexible y en el módulo de fuerza. Los autores le otorgan a la alta adhesión interfacial polímero-polímero logrado por el compatibilizador, las mejoras de las propiedades del material. Además de esto, se logra convertir la mezcla de HDPE y PVC en una mezcla homogénea mediante la reacción de injerto (Hamid et al., 2013; Maou et al. 2022).

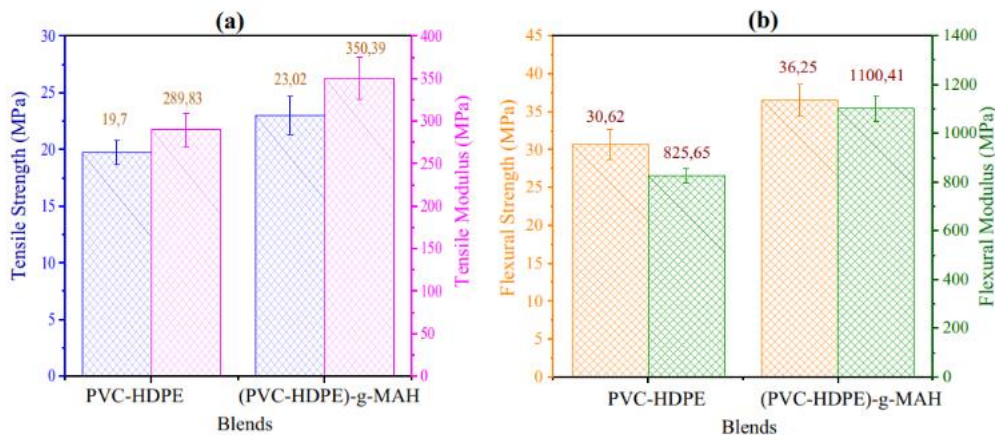


Figura 15. Propiedades mecánicas mezclas PVC-HDPE y (PVC-HDPE)-g-MAH. Tomado de Maou et al. (2022)

Por otro lado, se encuentran las investigaciones de Braun y Fisher (1995) en las cuales encontraron una mejora en las propiedades de la mezcla incompatible de PVC y PS con la adición de copolímeros de injerto en bloque P(S-b-(B-g-CHMA)) y P(S-b-(B-g-MMA)) basados en previas publicaciones en la literatura. Al igual que el anterior, los autores le atribuyen esta mejora en las propiedades físicas a la morfología de fase marcadamente refinadas y a la adhesión superior resultante entre la fase de PVC y PS. También concluyeron que es necesario la adición de más del 10% en peso del copolímero de injerto para lograr inducir una compatibilización eficiente



4.4.3. Métodos de separación

Se han desarrollado un gran número de metodologías para la separación de los diferentes plásticos que pueden estar presentes en los residuos y que buscan ser sometidos a procesos de reciclaje. Entre ellos se encuentra la separación manual, por gravedad, por flotación selectiva y por disolución selectiva. A continuación, se presenta una descripción detallada de algunos de ellas.

Manual

Para la implementación de esta metodología de separación, es necesaria la clasificación manual de materiales por parte de un operador capacitado a quien se le enseña a clasificar según el producto. Dentro del reciclaje, el operador llega a separar los distintos tipos de plásticos a partir de los residuos que este encuentre. Por ejemplo, los colores de las botellas (PET verde, azul, blanco) son un indicativo de los aditivos que este contiene. De igual forma, la separación manual es utilizada para la clasificación de mezcla de productos de plástico duro incluyendo pasacables (HDPE), perfiles para ventanas (PVC), piscinas infantiles (PVC), plexiglás (PMMA) o muebles de jardín (PP rellenos de talco). Esta metodología es costosa debido a que este proceso debe ser realizado por un operador capacitado, pero puede llegar a ser altamente eficiente (Ragaert et al. 2017). Sin embargo, durante el desarrollo de la separación del plástico, la clasificación automatizada ha ido reemplazando el trabajo manual basado en la experiencia del trabajador y en su trabajo manual debido a su identificación precisa y separación eficiente. Esta clasificación automatizada es una serie de tecnologías basadas en equipos mecánicos (Zhang et al., 2023).

Separación por flotación selectiva

Este método de separación es totalmente diferente a aquellas metodologías convencionales que están basadas solamente en las diferencias de densidades. Esta resuelve la principal su principal limitante debido a que plásticos con la misma densidad pueden ser separados a través de su aplicación (Saitoh et al., 1976). La flotabilidad de los plásticos es una propiedad relacionada con algunas de sus características distintivas como la baja densidad y energía superficial (Wang et al., 2015). La aplicación de esta propiedad en la separación de plásticos proviene de que, a pesar de que la mayoría de los plásticos son hidrofóbicos por naturaleza, estos pueden ser separados por flotación a través de una humectación selectiva de los componentes (Fraunholz, 1997). De igual forma, se conoce que la hidrofobicidad de la superficie de un plástico depende de la composición química, los plastificantes que este posea, el grado de polimerización, la cristalinidad, la estructura de superficie, etc. (Erbil et al., 2003; Wang et al., 2015). Sin embargo, todas las características que presente el plástico pueden verse afectadas por el contacto y la acción mecánica con otros plásticos a lo largo de su uso o al momento de someter el material a los procedimientos empleados para la implementación de esta metodología como lo es el lavado, trituración y el tratamiento superficial. La mayoría de los procesos de reciclaje comienzan con una reducción de tamaño seguida por la separación por flotación en donde



se hace uso de un tanque de flotación para separar los componentes más ligeros como las poliolefinas (PP y PE) y las resinas espumadas (PUR y PS expandido), de los plásticos más pesados (ABS, PS, PVC y PC). En el caso de la separación de plásticos más pesados, se hace uso de la flotación por espuma.

Al hablar de la trituración y el tamaño de la partícula, se conoce que, debido a su baja densidad, el tamaño máximo de partícula capaz de flotar es usualmente de varios milímetros de tamaño y que la selectividad disminuye significativamente cuando el tamaño se encuentra por debajo de 1mm (Fraunholz, 1997; Stuckrad, 1996). A partir de esto, la partícula flota cuando el promedio de la gravedad específica del conjunto burbuja-partícula descrito en la Figura 16 sea menor a la densidad del medio de flotación. Esta gravedad específica depende de la fracción de la partícula cubierta por burbujas, la densidad, tamaño y el área superficial del mismo en donde partículas con mayor diámetro y densidad son más difíciles de flotar (Wang et al., 2015).

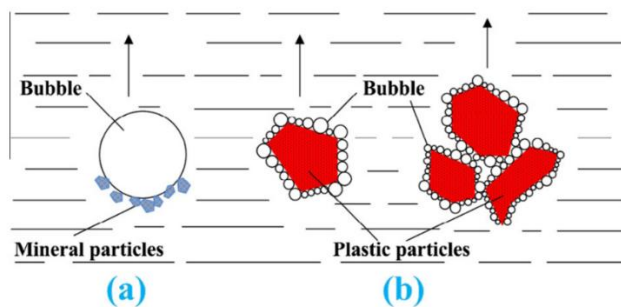


Figura 16.

Agregados partícula-burbuja en (a) flotación de minerales y (b) flotación de plásticos. Tomado de Wang et al. (2015)

El principio de la tecnología de flotación se basa en la fijación selectiva de burbujas en las partículas que se desean separar, por lo que es necesaria una diferencia significativa en la humectabilidad de la superficie de las partículas. Sin embargo, es necesario encontrar los métodos eficientes de la humectación selectiva ya sea por reducción de la tensión superficial líquido-vapor, acondicionamiento químico y tratamiento de superficie (Shent et al., 1999; Fraunholz, 2004). Para el caso del PVC se han encontrado un gran número de posibilidades de separación de este termoplástico cuando se encuentra mezclado con otros polímeros a través de las diferentes metodologías de humectación descritas anteriormente. Al hablar de la reducción de la tensión superficial, estudios realizados por Shen et al. (2002) demostraron la viabilidad de la reducción de la tensión superficial del polímero haciendo uso del surfactante 15-S-7. Por otro lado, en el acondicionamiento químico, se tiene el ejemplo de Saisinchai (2014) quien obtuvo una completa separación entre el PVC y PET por medio de una humectación selectiva del PET mediante el uso del reactivo lignosulfonato de calcio bajo condiciones óptimas. Adicionalmente, se han realizado un número considerable de estudios acerca de la separación de plásticos en los cuales, de acuerdo con el comportamiento de flotación de



estos en presencia de reactivos de flotación, se seleccionan los reactivos adecuados para la separación de las mezclas de interés. En la Figura 17 se pueden observar los estudios mencionados anteriormente con sus respectivos porcentajes de recuperación de materiales. A partir de esta figura, se logran observar los altos porcentajes de recuperación que presenta el PVC (mayores al 90%) al ser mezclado con diferentes plásticos por medio de la utilización de una gran variedad de reactantes. Finalmente, teniendo en cuenta varios de los estudios mencionados y los resultados obtenidos, Negari et al. (2018) demostraron el efecto que genera el tipo de agente químico utilizado, su concentración, la temperatura de operación, el tiempo de operación y el pH promedio en el proceso de separación de una de las mezclas de plásticos más comunes encontrados en los residuos municipales (PVC/PS/PET).

Authors	Reagents	Plastics		Grade (wt%)		Recovery (wt%)		
		Float	Non-float	Float	Non-float	Float	Non-float	
Wang et al. (2014)	Tannic acid	PS	PET	94.81	98.54	98.60	94.60	
		PC	PET	92.51	95.67	95.83	92.24	
		PS	PC	94.58	97.00	97.08	94.44	
		PET	PVC	95.85	98.58	98.63	95.73	
		PS	PVC	95.46	98.83	98.88	95.30	
	Lignin sulfonate	PC	PVC	94.97	96.87	96.94	94.86	
		PET	PVC	98.36	99.24	99.25	98.35	
		PS	PVC	98.12	96.76	96.71	98.15	
		PC	PVC	97.24	98.07	98.09	97.21	
		PET	PVC	94.07	96.81	96.72	93.90	
	Methylcellulose	PS	PVC	93.89	96.73	96.62	93.71	
		PC	PVC	93.04	91.88	91.98	93.13	
	Triton X-100	PET	PVC	91.41	70.17	59.88	94.38	
		PS	PVC	91.04	72.65	64.75	93.63	
		PC	PVC	89.44	69.05	58.25	93.13	
Saisinchai (2013)	Calcium lignosulfonate	PVC	PET	100	-	100	-	
Pongstabodee et al. (2008)	Calcium lignosulfonate	PVC	PET	-	-	98.7	90.6	
	Calcium lignosulfonate	PS	ABS	-	-	99.0	96.3	
	Calcium lignosulfonate	PVC	PET	99.3	98.9	98.9	99.3	
Marques and Tenório (2000)	Montanol 531	PVC	PET	100	100	100	100	
Deiringer et al. (1993)	Sodium lignin sulfonate	POM	PVC	96.0	92.0	95.0	97.0	
Singh, 1998	Sorbitan momolaurate	POM	PVC	96.0	90.7	80.0	95.0	
Valdez and Wilson (1979)	Sodium silicate	PS	D-Nylon/Z-Nylon	92.5	-	100	-	
	Aeromine 3037	D-Nylon	Z-Nylon	91.7	99.0	99.0	98.5	
	Sodium silicate	PS	ABS/Z-Nylon	97.0	-	96.0	-	
	Aeromine 3037	ABS	Z-Nylon	86.5	99.4	96.6	89.0	
	Methyl isobutyl carbinol (1000 g/t)	HDPE	PET	100	-	99.6	-	
Kangal (2010)	Tannic acid	PVC	PET	96.34	92.25	91.89	96.51	
Abbasi et al. (2010)	Epoxidized linseed oil (300 mg/L)	PET	PVC	99.7	-	57.0	-	
Burat et al. (2009)	Lignin sulfonate	PC	PVC	99.5	79.3	74	99.6	
	Lignin sulfonate	POM	PVC	90.8	96.5	96.7	90.2	
	Lignin sulfonate	PPE	PVC	94.9	97.3	87.4	95.0	
	Saponin	POM	PC	88.0	99.7	99.5	86.3	
	Tannic acid	PPE	PC	98.8	87.2	85.5	99.0	
	Sorbitan	PPE	POM	96.2	78.7	73.4	98.0	
	Izumi and Saithoh (1979)	Tannic acid	PP	PS	96.1	100	-	-
		Sodium lignin sulfonate	PP	ABS	98.8	97.8	-	-
		Sodium lignin sulfonate	PP	PE	98.8	97.3	-	-

Figura 17.

Separación por flotación de mezclas de plásticos por reactivos de flotación. Tomado de Wang et al. (2015)

Separación electrostática

Las técnicas electrostáticas son utilizadas para la separación de pequeñas partículas basado en la diferencia de conductividad que presentan los distintos materiales. En esta, las partículas son cargadas ya sea por carga de corona o por inducción y, posteriormente, son separadas debido a los diferentes tiempos de relajación de carga presentes. Como resultado, se crean diferencias de fuerzas de adhesión electrostática lo cual permite que las partículas conductoras caigan libremente en un tambor giratorio por gravedad y las



aislantes se adhieran al tambor para ser recogidas por procesos de raspado o succión (Inculet et al., 1998). Sin embargo, en el caso de los plásticos, ambos materiales son aislantes y no es posible ejecutar esta metodología. Por esta razón, se han desarrollado estudios acerca del aprovechamiento de la facilidad que presentan los plásticos de adquirir y conservar una polaridad diferente o una cantidad de carga electrostática.

La separación triboelectrostática es la metodología utilizada cuando los residuos de interés consisten en dos o más materiales plásticos y su alta eficiencia se le atribuye a la capacidad de controlar la tribocarga de partículas (Iuga et al., 2005). El proceso involucra tres etapas: preparación del material, carga triboeléctrica y la separación del material. En la preparación del material se reduce el tamaño de las partículas a aproximadamente 2-5 mm. Además de esto, se retiran los posibles contaminantes externos provenientes del uso de los materiales por medio de un lavado y secado. Para la carga triboeléctrica, se procede a introducir el material a un equipo de triboelectrificación: una cama fluidizada, un ciclón, un alimentador vibratorio o un tambor giratorio. La teoría estipula que cuando dos materiales entran en contacto entre sí, se produce una transferencia de carga desde la superficie con menor función de trabajo a la de mayor. Es importante mencionar que la salida de la separación triboelectrostática depende significativamente de la efectividad de carga de partícula. Finalmente, una vez las partículas son cargadas, el material se pasa a través de un campo electrostático generado por un sistema de electrodos en el cual las fuerzas eléctricas que actúan sobre los gránulos con cargas diferentes los impulsan a acumularse por separado (Calin et al., 2005; Inculet et al., 1998).

Se considera que este método es uno de los más prometedores al hablar del reciclaje del plástico debido a que resulta ser un proceso mecánico económicamente satisfactorio y presenta valores de eficiencia mucho mayores en comparación a los métodos de separación convencionales. Sin embargo, para su implementación industrial es necesario conocer los desafíos que este presenta. Se ha mencionado que la eficiencia del proceso depende de la eficiencia de carga, pero este es extremadamente sensible al cambio de ambiente en donde la baja humedad beneficia el proceso de carga (Wu et al., 2013). De igual forma, las principales desventajas de esta metodología están relacionadas con las condiciones de operación en donde el material o residuos de plástico debe ser sometido a un proceso de secado, al tamaño y forma de las partículas a tratar ya que las características de la superficie y su tamaño afectan significativamente la capacidad de ser cargada, con la presencia de aditivos o fillers, y, finalmente, la presencia de suciedad de la superficie puede generar cambio o la inhibición de la carga de la superficie de las partículas (Serranti & Bonifazi, 2019).

Separación por gravedad

La separación por densidad es un método establecido para producir separaciones plásticas en situaciones en las que existe una diferencia definitiva en la densidad del producto principal y los demás materiales presentes (Gent et al., 2009). Este método de separación es implementado en recipientes de flotación/hundimiento en los que la separación entre partículas de diferentes densidades se produce sólo bajo la fuerza de la gravedad. Es



basado en soluciones salinas o químicas para la creación de un fluido de separación de una densidad deseada o en seco usando mesas de aire o clasificadores de aire en zigzag (Gent et al., 2011). En la implementación de un sistema en el cual las partículas de diferentes densidades son puestas en un medio con una densidad intermedia, las partículas con menos densidad flotan mientras que aquellas que presentan una mayor densidad tienden a hundirse a velocidades que dependen de su flotabilidad relativa en el medio bajo la fuerza de la gravedad (Gent et al., 2009).

La separación por densidad es una operación de procesamiento estándar en muchos sectores de la industria y se considera como el proceso de separación más ampliamente usado en la industria. También se considera que es probablemente el más costo-efectivo y el que presenta mayor capacidad de recuperación de material debido a su simpleza y flexibilidad de operación en comparación a otras metodologías. En este caso, la efectividad de obtención y la obtención de niveles razonables de pureza de un producto son afectadas por el tamaño y la forma aerodinámica de las partículas, especialmente en la separación en seco, por lo que se recomiendan tamaños entre 6.4 a 9.5 mm. Al hablar de la separación de plásticos por gravedad, se hace uso de procesos de separación en soluciones o suspensiones y los principales factores que afectan su eficacia a nivel industrial son: el tiempo necesario para que se dé la separación, la adherencia a otras partículas, la aglomeración de gotas o burbujas con las partículas y la resistencia hidrocópica de los plásticos al hundimiento cuando existe la interfaz aire-agua (Gent et al., 2011; Gent et al., 2009). Con el fin de dar una idea de aquellos plásticos que pueden llegar a ser separados por medio de esta metodología y reconociendo que entre las densidades de los involucrados debe existir una diferencia definitiva, en la Figura 18 se presentan los rangos de densidades de algunos tipos de plásticos. Por lo tanto, los plásticos que presenten rango de densidades en el que exista un solapamiento no pueden ser separados por medio de esta metodología como es el caso del C-PET y P-PVC mientras que aquellas mezclas con diferencias significativas de densidad como el PP y el U-PVC logran una alta eficiencia de separación y un alto porcentaje de recuperación de material.

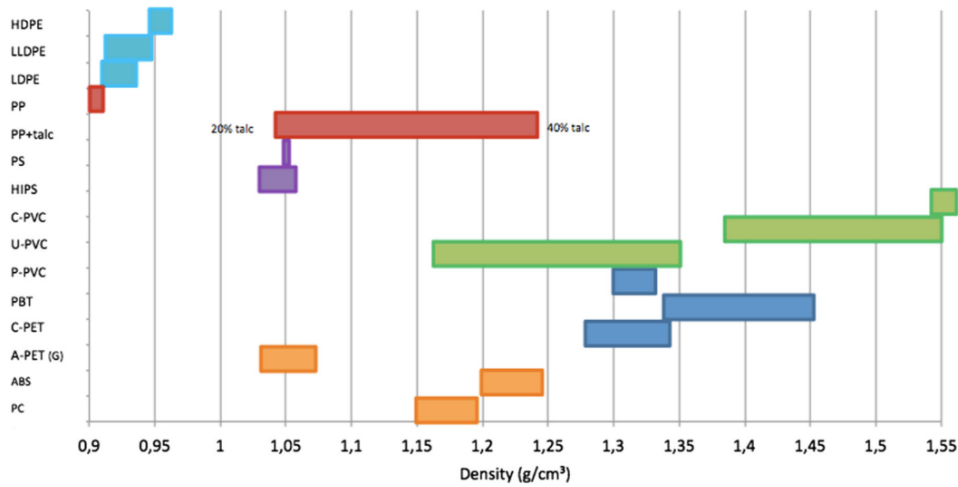


Figura 18.
 Rango de densidades de algunos tipos de plásticos. Tomado de Ragaert et al. (2017)

5. CONCLUSIONES

En la presente revisión bibliográfica se llevó a cabo una investigación para el establecimiento del estado del arte del reciclaje mecánico de diferentes variaciones del PVC: PVC, PVC-O, CPVC y PVC mezclado con otros plásticos en la industria. De igual forma, se determinaron los diferentes factores que afectan las propiedades de cada uno de ellos y, a su vez, los resultados de procesos de reciclaje. Esto, a través de la descripción detallada de cada una de las variaciones de este material termoplástico. De acuerdo a lo anterior se puede concluir que en el caso del PVC:

- El reciclaje del PVC resulta ser una de las vías de disposición de este tipo de residuos incluyendo la tradicional disposición en vertederos y la obtención de energía por medio de una conversión en gases de combustión, calor o cenizas.
- Una de las principales limitaciones del reciclaje mecánico del PVC es su baja estabilidad térmica la cual provoca la eliminación del cloruro de hidrógeno a bajas temperaturas. Por esta razón, se recurre a la adición de aditivos y estabilizantes que mejoren el procesamiento y protejan al material contra el estrés térmico al que se ve sometido durante etapas de procesamiento y durante su vida útil.
- La adición de aditivos en el procesamiento del PVC genera un cambio en las propiedades mecánicas del material resultante y logran reducir el consumo energético necesario para su tratamiento hasta en un 90% contribuyendo a la reducción de las emisiones de CO₂.
- El reciclaje mecánico de este tipo de termoplásticos involucra las etapas de separación, molienda y alimentación a un equipo de conversión o extrusión sin la alteración de la composición química del material. En el caso del PVC, al momento de alimentar el equipo de extrusión con los residuos de interés, se debe tener en consideración la caracterización del mismo, es decir, se debe conocer la



composición del material en específico, su grado de polimerización y los aditivos adicionados en su fabricación.

- A partir de lo establecido en el análisis de ciclo de vida realizado por Ariza (2022), el PVC presenta una ventaja significativa a nivel energético ya que, al tratarse de un material con una baja rugosidad, el consumo energético en un periodo de funcionamiento resulta ser significativamente inferior que otros de uso convencional.

Para el caso del CPVC se logra concluir que:

- El CPVC es el resultado de la poscloración de la resina de PVC en la cual se adiciona el contenido de coloro a la molécula del PVC con el principal objetivo de aumentar la temperatura de transición vítrea de la resina base. Como principales características, a diferencia del PVC, este material presenta una mayor estabilidad térmica, mayor temperatura de deflexión, mayor capacidad retardante de llama y mayor resistencia a la tracción. Debido a esto, este material presenta un alto potencial de aplicación en el transporte de agua a altas temperaturas.
- El proceso de reciclaje mecánico del CPVC es similar al del PVC y cuenta con las mismas rutas y posibilidades de disposición. Sin embargo, presenta la diferencia y la dificultad que, al ser un material con una mayor rigidez, requiere de una maquinaria diferente al PVC en la etapa de molienda que cuente con la capacidad de reducir el tamaño con este tipo de propiedades mecánicas.

Para el caso del PVC-O se concluye que:

- El PVC-O es el material resultante de un proceso de orientación o deformación mecánica de un material extruido mediante un proceso que orienta las moléculas que conforman el material en dirección a la tensión ejercida. Como resultado, se obtiene la potencialización de las propiedades mecánicas del material original como la resistencia al impacto, la fluencia, resistencia química y capacidad hidrostática. Gracias a la mejora de estas propiedades, a su superficie extremadamente lisa y a los mayores diámetros internos logrados, es posible reducir la cantidad de material en peso necesario para la producción de una tubería.
- La orientación del PVC permite hacer uso de menos cantidad de material para la producción de una tubería debido al aumento del diámetro interno que se logra al aumentar la rigidez del material. Esto genera la reducción de materia prima en procesos de producción y, en consecuencia, mejoras económicas.
- En la actualidad, el proceso de reciclaje mecánico del PVC-O se centra principalmente en los residuos de preconsumo en el cual existe un tratamiento directamente en el punto de producción y fabricación del material. En este, los residuos resultantes de la etapa de orientación y moldeado son llevados nuevamente al proceso de extrusión junto con el material de PVC-U. Lo anterior se hace posible debido a que, al momento de someter el material orientado nuevamente al proceso de extrusión, el material pierde las características adquiridas en la orientación y retoma las propiedades del material original.



Finalmente, en el caso del PVC mezclado con otros plásticos se logra concluir que:

- En la industria se ha optado por la fabricación de materiales a partir de la combinación de dos o más termoplásticos con el fin de aprovechar las propiedades de cada uno de ellos. De igual forma, en los residuos domésticos y en su disposición final se puede presentar un riesgo de contaminación entre ellos. El principal reto del reciclaje de esos materiales es que el proceso es sensible a la presencia de impurezas y a la incompatibilidad de los plásticos involucrados, por lo cual, es necesario implementar una etapa de separación.
- Se expone la necesidad de realizar una caracterización de los tipos de plásticos que conforman el material de interés con el fin de conocer sus principales características como densidad, puntos de fusión, etc. Al conocer esta información, es posible tomar una decisión acerca del método más conveniente de separación.
- Existen un gran número de estudios relacionados con la debida y correcta separación de los diferentes tipos de plásticos basados en sus propiedades y características térmicas y mecánicas.
- A pesar del efecto negativo que genera la presencia de otro plástico en procesos mecánicos de reciclaje, se han desarrollado una gran variedad de métodos de separación de plásticos que sustentan la viabilidad de su tratamiento. Estas técnicas presentan un alto porcentaje de recuperación y poseen la ventaja de, incluso en una misma metodología, presentar varias opciones de separación.
- Al momento de tomar una decisión enfocada en las metodologías de separación es importante tener en cuenta el componente energético asociado a cada una de ellas. En este orden de ideas, cada uno de los métodos presentados requieren de un pretratamiento del material en el cual se realizan procesos de lavado y trituración. Sin embargo, a pesar de poseer un alto porcentaje de recuperación, el tratamiento triboelectrostático requiere del consumo de energía adicional al presentar la necesidad de someter al material a procesos de secado. Tratamiento que no se hace necesario en la separación mediante las otras técnicas.

6. RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la realización de trabajos futuros o para la implementación de la información presentada en proyectos de interés:

- El reciclaje de plásticos es un proceso que requiere del conocimiento total de las principales propiedades y características del material. Por lo cual, como principal recomendación, se aconseja realizar una correcta y completa caracterización, previa a su tratamiento, que permita la recopilación de la información necesaria para la toma de decisiones presentada anteriormente.
- La información disponible acerca del análisis de ciclo de vida del PVC en Colombia es muy limitada siendo la tesis presentada por Ariza (2022) la referencia más importante. Es por esto que se halla la necesidad de generar más información relacionada con este tema y, con esto, realizar un análisis crítico acerca de la



sostenibilidad de este material en comparación a los otros termoplásticos aplicados en la industria.

- En la evaluación de las metodologías de separación de plásticos un factor importante es el contexto social y económico del país en el cual se busca su aplicación. Se recomienda realizar un estudio económico que determine la viabilidad de la implementación de cada una de las metodologías. Por ejemplo, establecer si es viable la conversión de estos tratamientos a un sistema automático en países no desarrollados por temas como el costo de mano de obra y las tecnologías necesarias para su desarrollo.
- En la evaluación del sistema de separación manual es recomendable, además de lo mencionado anteriormente, tener en cuenta un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo. Al momento de tratar residuos domésticos o industriales, existe un peligro al que se ve expuesto el operador capacitado en actividades de separación, debido a esto, las etapas de pretratamiento como el lavado adquieren un valor adicional esencial.

7. REFERENCIAS

Advanced Platform INC (API). (s.f). *Thermoplastics vs thermoset materials*. [Online]. <https://advancedplastiform.com/thermoplastics-vs-thermoset-materials/>

Akovali, G. (2012). *Plastic materials: polyvinil chloride (PVC). Toxicity of building materials*, 23-53. doi:10.1533/9780857096357.23

Ambrogio, V., Carfagna, C., Cerruti, P., Marturano, V. (2017). *Additives in Polymers. Modification of Polymer Properties*, 87-108. doi:10.1016/b978-0-323-44353-1.00004-x

Ariza, A. (2022). *Estado del arte de los costos de toneladas de carbono equivalente para ser incluidos en diseños multiobjetivo de sistemas hidráulicos urbanos*. Repositorio Universidad de los Andes.

Bai, T., Wang, H., Chen, S., Yu, E., & Wei, Z. (2020). *Effect of segment structure on the thermal stability of CPVC in the Gas–Solid PVC chlorination process*. *Journal of Applied Polymer Science*, 49396. doi:10.1002/app.49396

Braun, D. (2002). *Recycling of PVC*. *Progress in Polymer Science*, 27(10), 2171–2195. doi:10.1016/s0079-6700(02)00036-9

Braun, D., & Fischer, M. (1995). *Mechanical behaviour of PS/PVC blends compatibilized with block-graft copolymers based on poly(styrene-block-butadiene)*. doi:10.1002/apmc.1995.052330107



- Calin, L., Caliap, L., Neamtu, V., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., & Dascalescu, L. (2005). *Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation*. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. doi:10.1109/ias.2005.1518548
- Campi, F., Casagrande, M., Franzoni, G., Minelli, C., Porta, A., & Ramella, G. (2014). *A study of the behavior of bi-oriented PVC exposed to ionizing radiation and its possible use in nuclear applications*. *Radiation Physics and Chemistry*, 99, 86–91. doi:10.1016/j.radphyschem.2014.02.018
- Carmoin, B., Villoutreix, G., & Berlot, R. (1977). *Compatibility of PVC-chlorinated PVC mixtures*. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 14(2), 307–321. doi:10.1080/00222347708220371
- Carroll, W. F., Johnson, R. W., Moore, S. S., & Paradis, R. A. (2011). *Poly(Vinyl Chloride)*. *Applied Plastics Engineering Handbook*, 61–76. doi:10.1016/b978-1-4377-3514-7.10005-4
- Chauffoureaux, J. (1981). *Rheological functions and processing by extrusion and stretching of PVC biaxially oriented sheets*. *Pure and Applied Chemistry*, 53(2), 521–531. doi:10.1351/pac198153020521
- Clark, D., Collins, E., Kleiner, L. (1982). *Mechanical Criteria for Polymer Compatibility: Poly(vinylchloride)/Post-chlorinated Poly(vinylchloride) Blends*. *Polymer Engineering and Science*, 22(11), 698–704. doi:10.1002/pen.760221109
- Cudjoe, D., Wang, H. (2022). *Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis, vol 237*. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470>
- Erbil, H., Demirel, A., Avci, Y., Mert, O. (2003). *Transformation of a Simple Plastic into a Superhydrophobic Surface*. *Science*, 299(5611), 1377-1380. Doi: 10.1126/science.1078365
- Ferrante, M., Capponi, C., Brunone, B., & Meniconi, S. (2015). *Hydraulic Characterization of PVC-O Pipes by Means of Transient Tests*. *Procedia Engineering*, 119, 263–269. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.884
- Fraunholz, N. (1997). *Plastics flotation*. Delft University of Technology, Eburon P&L. ISBN: 90-5651-046-0



- Fraunholz, N. (2004). *Separation of waste plastics by froth flotation—a review, part I. Minerals Engineering, 17(2), 261–268.* doi:10.1016/j.mineng.2003.10.028
- Gent, M. R., Menendez, M., Toraño, J., & Diego, I. (2009). *Recycling of plastic waste by density separation: prospects for optimization. Waste Management & Research, 27(2), 175–187.* doi:10.1177/0734242x08096950
- Gent, M., Menendez, M., Toraño, J., Torno, S. (2011). *Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones. Resources, Conservation and Recycling, 55(4), 472–482.* doi:10.1016/j.resconrec.2010.12.010
- Geyer, R. (2020). *Production, use, and fate of synthetic polymers. Plastic Waste and Recycling, 13–32.* doi:10.1016/b978-0-12-817880-5.00002-5
- Goh, S. H. (2014). *Miscible Polymer Blends. Polymer Blends Handbook, 1915–2151.* doi:10.1007/978-94-007-6064-6_24
- Grigore, M. (2017). *Methods of recycling properties and applications of recycled thermoplastic polymers. Recycling, 2, 24.* doi:10.3390/recycling2040024
- Hamid, F., Akhbar, S., & Halim, K. H. K. (2013). *Mechanical and Thermal Properties of Polyamide 6/HDPE-g- MAH/High Density Polyethylene. Procedia Engineering, 68, 418–424.* doi:10.1016/j.proeng.2013.12.201
- Harper, A. (2000). *Modern Plastics Handbook.* 1st ed. New York: McGraw-Hill. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070267145>
- Hitt, D. J., & Gilbert, M. (2000). *Biaxial orientation of poly(vinyl chloride) compounds Part 2 –Structure–property relationships and their time dependency. Plastics, Rubber and Composites, 29(3), 149–160.* doi:10.1179/146580100101540905
- Hofer, R. (2012). *Processing and Performance Additives for Plastics. POLYMER sCIENCE: a cOMPREHENSIVE rEFERENCE, 369–381.* doi:10.1016/b978-0-444-53349-4.00272-7
- Inculet, I., Castle G., Brown, J. (1998). *Electrostatic separation of plastics for recycling. Particulate Science and Technology: An International Journal, 16:1, 91–100.* DOI: 10.1080/02726359808906787
- Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A., & Dascalescu, L. (2005). *Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. Journal of Electrostatics, 63(6–10), 937–942.* doi:10.1016/j.elstat.2005.03.064



- Jeswani, H., Kruger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., Azapagic, A. (2021). *Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery*. *Science of the Total Environment*, vol 799. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>
- Kim, H. C., & Gilbert, M. (2004). *Characterisation and properties of oriented PVC fibres*. *Polymer*, 45(21), 7293–7301. doi:10.1016/j.polymer.2004.08.016
- Lewandowski, K., Skórczewska, K. (2022). *A brief review of poly(vinyl chloride) (PVC) recycling*. *Polymers*, 14, 3035. <https://doi.org/10.3390/polym14153035>
- Liu, Z., & Gilbert, M. (1987). *Structure and properties of oriented plasticized poly(vinyl chloride)*. *Polymer*, 28(8), 1303–1308. doi:10.1016/0032-3861(87)90442-3
- Lu, L., Li, W., Cheng, Y., Liu, M. (2023). *Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review*. *Waste Management*, 166, 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.012>
- Lu, W., Cao, T., Wang, Q., & Cheng, Y. (2011). *Plasma-Assisted Synthesis of Chlorinated Polyvinyl Chloride (CPVC) Using a Gas-Solid Contacting Process*. *Plasma Processes and Polymers*, n/a–n/a. doi:10.1002/ppap.201000097
- Marceneiro, S., Alves, R., Lobo, I., Dias, I., de Pinho, E., Dias, A. M. A., ... C. de Sousa, H. (2018). *Effects of Poly(vinyl chloride) Morphological Properties on the Rheology/Aging of Plastics and on the Thermal/Leaching Properties of Films Formulated Using Nonconventional Plasticizers*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(5), 1454–1467. doi:10.1021/acs.iecr.7b03097
- Maou, S., Meftah, Y., Tayefi, M., Meghezzi, A., Grohens, Y. (2022). *Preparation and performance of an immiscible PVC-HDPE blend compatibilized with maleic anhydride (MAH) via in-situ reactive extrusion*. *J Polym Res* 29, 161. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03016-3>
- McKeen, L. W. (2012). *Polyolefins, Polyvinyls, and Acrylics. Permeability Properties of Plastics and Elastomers*, 145–193. doi:10.1016/b978-1-4377-3469-0.10009-8
- Merah, N. (2007). *Natural weathering effects on some properties of CPVC pipe material*. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 198–201. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.031



- Merah, N., Irfan-ul-Haq, M., & Khan, Z. (2003). *Temperature and weld-line effects on mechanical properties of CPVC*. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(1), 247–255. doi:10.1016/s0924-0136(03)00567-3
- Miliute-Plepiene, J., Frâne, A., & Almasi, A. M. (2021). *Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries*. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100246. doi:10.1016/j.clet.2021.100246
- Molecor. (2016). *La nueva generación de tubería de PVC orientado*. Catálogo. [Online]. <http://eurobrisa.com.uy/wp-content/uploads/2015/08/Cat%C3%A1logo-Molecor-2016.pdf>
- Nakamura, S., Nakajima, K., Yoshizawa, Y., Matsubae-Yokoyama, K., & Nagasaka, T. (2009). *Analyzing Polyvinyl Chloride in Japan With the Waste Input&Output Material Flow Analysis Model*. *Journal of Industrial Ecology*, 13(5), 706–717. doi:10.1111/j.1530-9290.2009.00153.x
- Naqvi, M. K., & Sen, A. R. (1991). *Thermal stability and thermal characteristics of PVC/cis-PBR blends*. *Polymer Degradation and Stability*, 33(3), 367–375. doi:10.1016/0141-3910(91)90082-3
- Negari, M. S., Ostad Movahed, S., & Ahmadpour, A. (2018). *Separation of polyvinylchloride (PVC), polystyrene (PS) and polyethylene terephthalate (PET) granules using various chemical agents by flotation technique*. *Separation and Purification Technology*, 194, 368–376. doi:10.1016/j.seppur.2017.11.062
- Nidoni, P. (2017). *Incineration process for solid waste management and effective utilization of by products*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 04. <https://www.irjet.net/archives/V4/i12/IRJET-V4I1270.pdf>
- Niyitanga, E., Sarmad, A. Muhammad, B., Hafiz, M. (2021). *Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100142>
- Osry, M. A. (2005). *Modern developments and design criteria for unmodified, modified and oriented PVC pipes*. *Plastics, Rubber and Composites*, 34(1), 9–14. doi:10.1179/174328905x29721



- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. *Waste Management*, 69, 24–58. doi:10.1016/j.wasman.2017.07.044
- Sadat-Shojai, M., Bakhshandeh, G. (2011). *Recycling of PVC wastes*. *Polymer Degradation and Stability*, 96, 404-415. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.001>
- Saisinchai, S. (2014). *Separation of PVC from PET/PVC mixtures using flotation by calcium lignosulfonate depressant*. *Engineering Journal*, 18(1), 45-54.
- Saitoh, K., Nagano, I., & Izumi, S. (1976). *New separation technique for waste plastics*. *Resource Recovery and Conservation*, 2(2), 127–145. doi:10.1016/0304-3967(76)90004-4
- Sears, L., Darby, J. (1982). *The technology of plasticizers*. Wiley: New York.
- Serranti, S., & Bonifazi, G. (2019). *Techniques for separation of plastic wastes. Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete*, 9–37. doi:10.1016/b978-0-08-102676-2.00002-5
- Shen, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (2002). *Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 196(1), 63–70. doi:10.1016/s0927-7757(01)00706-3
- Shent, H., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (1999). *A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics*. *Resources, Conservation and Recycling*, 25(2), 85–109. doi:10.1016/s0921-3449(98)00017-2
- Speight, J. G. (2020). *Monomers, polymers, and plastics*. *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes*, 597–649. doi:10.1016/b978-0-12-809923-0.00014-x
- Statista. (2022). *Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2021*. [Online]. Accessed: 20-Aug-2023, <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
- Stuckrad, B., Lohr, K., Vogt, V. (1997). *Sorting of waste plastic mixtures by flotation*.
- Vlasopoulos, A., Malinauskaite, J., Zabnienska-Góra, A., Jouhara, H. (2023). *Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery*. *Energy*, vol 277. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127576>



- Walsh, T. (2011). *The Plastic Piping Industry in North America*. *Applied Plastics Engineering Handbook*, 585–602. doi:10.1016/b978-1-4377-3514-7.10034-0
- Wang, C., Fu, J., Liu, Y. (2015). *Flotation separation of waste plastics for recycling-A review*. *Waste management*, 41(28-38). <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.027>
- Wu, G., Li, J., & Xu, Z. (2013). *Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review*. *Waste Management*, 33(3), 585–597. doi:10.1016/j.wasman.2012.10.014
- Wypych, G. (2015). *PVC ADDITIVES*. *PVC Formulary*, 45–88. doi:10.1016/b978-1-895198-84-3.50005-3
- Yan, B., Lu, W., & Cheng, Y. (2012). *China goes green: cleaner production of chemicals*. *Green Processing and Synthesis*, 1(1). doi:10.1515/greenps-2011-0024
- Yarahmadi, N., Jakubowicz, I., Gevert, T. (2001). *Effects of repeated extrusion on the properties and durability of rigid PVC scrap*. *Polymer degradation and stability*, 73, 93-99.
- Yarahmadi, N., Jakubowicz, I., Martinsson, L. (2003). *PVC floorings as post-consumer products for mechanical recycling and energy recovery*. *Polymer Degradation and Stability*, 79, 439-448. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00360-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00360-9)
- Zakharyan, E., Petrukhina, N., Maksimov, A. (2020). *Pathways of chemical recycling of Polyvinyl Chloride: Part I*. *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol 93,1271-1313. DOI: 10.1134/S1070427220090013
- Zhang, Y., Wang, Q., Yalikhun, N., Wang, H., Wang, C., Jiang, H. (2023). *A comprehensive review of separation technologies for waste plastics in urban mine*. *Resources, conservation & Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107087>
- Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., ... Ozcan, S. (2022). *Plastic waste upcycling toward a circular economy*. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131928. doi:10.1016/j.cej.2021.131928

