

PROYECTO DE GRADO

INGENIERÍA AMBIENTAL

**ESTADO DEL ARTE SOBRE EL RECICLAJE QUÍMICO Y EL
APROVECHAMIENTO DEL PVC QUE HA SIDO DESECHADO O HA
CUMPLIDO SU CICLO DE VIDA. UNA PERSPECTIVA DE LA
VIABILIDAD ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL DE ESTE TIPO
DE PRÁCTICAS.**

**PRESENTADO POR:
GABRIELA MELENDEZ PLATA**

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

*Quiero agradecer a toda mi familia por su apoyo constante
y aliento durante la realización de este trabajo y mi carrera.*

*Agradezco a mi asesor, Juan Saldarriaga por compartir
generosamente sus conocimientos, brindándome una guía
valiosa a lo largo de este proceso de investigación.*



TABLA DE CONTENIDO

1. MOTIVACIÓN	6
2. ANTECEDENTES	6
3. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
3.1 Introducción	7
3.2 Objetivos	9
3.2.1 Objetivo General.....	9
3.2.2 Objetivos Específicos	10
4. METODOLOGÍA	10
4.1.1 Establecimiento del estado del arte	11
4.1.2 Descripción de la información disponible	12
5. VOSviewer – REDES BIBLIOMÉTRICAS	15
5.1.1 VOSviewer: Características y utilidades	15
5.1.2 Bases de datos bibliográficas.....	16
5.1.3 Redes bibliométricas	16
6. TÉCNICAS DE RECICLAJE QUIMICO DEL PVC	26
6.1.1 Despolimerización basada en disolventes	26
6.1.2 Despolimerización térmica	33
6.1.3 Despolimerización química	42
6.1.4 Reciclaje enzimático.....	49
7. VIABILIDAD ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL	57
7.1.1 Viabilidad medioambiental.....	57
7.1.2 Viabilidad económica	67
8. CONCLUSIONES	71
9. RECOMENDACIONES	74
10. REFERENCIAS	75



ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Esquema general del proceso de producción de PVC y cuatro tipos de reciclaje de desechos de PVC expuestos de manera general (L. Lu et al., 2023).....	9
Ilustración 2. Esquema de metodología general de la investigación.	11
Ilustración 3. Esquema de proceso para establecer el estado del arte.....	12
Ilustración 4. Descripción general del proceso de pirolisis.	34
Ilustración 5. Esquema general del mecanismo de degradación microbiológica de los plásticos bajo condiciones aerobias (Mohanani et al., 2020).....	51
Red 1. Primera red de palabras clave.	18
Red 2. Segunda red de palabras clave.	20
Red 3. Red de países con mayor publicación en el tema de reciclaje químico de PVC.	22
Red 4. Red de autores que más publican en el tema del reciclaje químico del PVC. Base bibliográfica: Web of Science.....	24
Red 5. Red de autores que más publican en el tema del reciclaje químico del PVC. Base bibliográfica: Scopus.	25
Gráfica 1. Años de publicación de los artículos relacionados con el tema de reciclaje químico del PVC. Las publicaciones consideradas son las que se encuentran en la plataforma de Web of Science.	13
Gráfica 2. Porcentaje de artículos correspondientes a cada tipo de despolimerización para el caso del PVC.	14
Gráfica 3. Tasa de rendimiento interno (TIR) esperada del reciclaje molecular en tres escenarios de mercado. El primer escenario (barras verdes) evidencia la fijación de precios de mercado para el 2021, el segundo escenario (barras azules) evidencia los precios del mercado para el 2019 y finalmente el tercer escenario (barras moradas) evidencian el precio de producción esperado por las propias empresas de tecnología (Partners, 2020).....	68



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Autores más recurrentes en la investigación del reciclaje químico del PVC y el número de publicaciones correspondientes.	13
Tabla 2. Listado de países que investigan en el reciclaje químico del PVC.	23
Tabla 3. Resultados de estudios de despolimerización basada en disolventes para el reciclaje químico del PVC.	28
Tabla 4. Resultados de estudios de despolimerización térmica para el reciclaje químico del PVC.	35
Tabla 5. Resultados de estudios de despolimerización química para el reciclaje químico del PVC.	43
Tabla 6. Resultados de estudios relacionados con el reciclaje enzimático como una técnica de reciclaje químico del PVC.	52
Tabla 7. Técnicas de reciclaje químico del PVC, con sus respectivas formas de reciclaje, ventajas, desventajas e investigaciones que reportan aspectos medioambientales de cada una de ellas (L. Lu et al., 2023).	58
Tabla 8. Resumen de resultados de impacto ambiental: sistemas de reciclaje químico frente a sistema virgen, análisis al pellet de plástico (Partners, 2020).	63
Tabla 9. Composición de los productos gaseosos generados en el proceso de pirólisis de una mezcla de residuos plásticos que contienen PVC (Ragaert et al., 2020). Los valores presentados se presentan en unidades de porcentaje en peso (wt%).	65
Tabla 10. Costos externos de los contaminantes generados en los procesos de reciclaje del PVC (Brignon, 2021).	70



1. MOTIVACIÓN

La motivación subyacente en esta investigación radica en la necesidad de comprender y destacar cuál es la contribución del policloruro de vinilo (PVC) en el contexto ambiental, basándose en la disponibilidad de técnicas de reciclaje químico del mismo. Además de comprender si dichas técnicas llegan a ser viables en el ámbito económico.

A menudo el PVC ha sido objeto de críticas y precauciones medioambientales debido a la asociación con la química del cloro (Petrović & Hamer, 2018). Sin embargo, es un material que tiene una amplia cabida en aplicaciones industriales y de construcción debido a sus propiedades altamente resistentes. A diferencia de los plásticos de un solo uso, este tiende a tener una vida útil extensa, lo cual deriva en que, si se maneja adecuadamente, al final de su ciclo de vida puede representar una opción mucho más sostenible en comparación con otros materiales. De hecho, el estudio titulado “*Production, use and fate of all plastics ever made*” destaca que el PVC representa una fracción menor de los plásticos de un solo uso en comparación con otros tipos de plásticos (Geyer et al., 2017), lo anterior reafirma la idea de que impacto ambiental puede ser menos significativo en ciertos contextos.

Dado lo anterior, la motivación detrás de esta investigación es promover una comprensión equilibrada del PVC y su potencial en el mercado donde la sostenibilidad es esencial. Al investigar a fondo el estado del arte del reciclaje y aprovechamiento químico del PVC al finalizar su vida útil, se busca resaltar como este polímero puede hacer parte de soluciones ambientales. Al hacerlo se espera exponer diversas técnicas de reciclaje químico del material, para influenciar en futuras prácticas y en la toma de decisiones basada en evidencia en relación con el PVC.

2. ANTECEDENTES

El origen del PVC se remonta al siglo XIX, cuando por primera vez el primer padre del PVC, un químico francés llamado Henri Víctor Regnault observó que al exponer el gas de cloruro de vinilo a la luz solar se empezaban a formar unas partículas sólidas de color blanco. Sin embargo, fue hasta 1912 cuando el químico alemán Fritz Klatte desarrolló un método de polimerización de cloruro de vinilo, su investigación fue fundamental, ya que abrió la puerta al proceso de producción industrial de este plástico (Mulder & Knot, 2001). A lo largo de los años, la producción de PVC ha venido aumentando y se ha convertido en uno de los materiales con la más alta demanda.



El auge del PVC y de otros plásticos, trajo consigo un aumento en las preocupaciones ambientales. Alrededor de la década de los 2000 la conciencia ambiental empezó a tener relevancia, aunque los estudios científicos iniciales datan de décadas anteriores (Berenguer & Corraliza, 2000). Pero fue justo en la década más reciente en la cual se empezó a entender el término “microplástico”, su origen y su impacto. Los microplásticos son fragmentos pequeños (menores a 5 milímetros) que provienen de la fragmentación de polímeros más grandes. A medida que se han realizado investigaciones con respecto a estos temas se ha comprendido que estos materiales se llegan a situar en diversos ecosistemas, así como su potencial impacto en el medio ambiente (Rojo-Nieto & Montoto Martínez, 2017).

Es por lo que, en los últimos años, a medida que la conciencia ambiental y la necesidad de implementar soluciones sostenibles han ido aumentando, la investigación en el campo del reciclaje químico del PVC ha experimentado un crecimiento significativo. Los estudios más importantes en este campo buscan desarrollar métodos eficientes y económicamente viables, así como evaluar su impacto ambiental y económico en comparación con las técnicas de reciclaje convencionales.

3. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

3.1 Introducción

La problemática ambiental asociada al uso y producción de materiales plásticos es una preocupación global debido a que estos pueden llegar a impactar de diversas maneras. Por ejemplo, la producción masiva y el uso generalizado de plásticos en todo el mundo han llevado a una acumulación de residuos plásticos en vertederos, océanos y otros ecosistemas. Estos residuos suelen ser duraderos, por lo cual pueden tardar cientos de años en degradarse, lo cual contribuye al deterioro de los ecosistemas. Es importante recalcar que esta situación no puede ser generalizada a todos los tipos de plástico, lo anterior debido a que se conoce que la mayor parte de estos se emplean en la fabricación de envases, es decir, en productos de un solo uso, como lo pueden ser botellas, bolsas de plástico o películas de plástico (Greenpeace, 2019). Este tipo de materiales suelen estar fabricados con polietileno (PE), poliéster (PET) o polipropileno (PP) (Greenpeace, 2019). Dichos plásticos ocupan el 49% de la basura marina, mientras que otros plásticos como lo es el PVC solo llegan a ocupar el 6% (Parlamento Europeo, 2021).

Ahora bien, la fabricación de plásticos requiere del uso de recursos no renovables, como, por ejemplo, el petróleo y el gas natural, por lo cual estos procesos favorecen el



agotamiento de recursos finitos y, por lo tanto, puede derivar en la dependencia de combustibles fósiles (Agarski et al., 2019). Sin embargo, este no es el único problema asociado con la producción de estos materiales, ya que es posible que durante esta etapa se generen emisiones significativas de gases de efecto invernadero asociadas a la extracción y transporte de las materias primas, lo que contribuye al cambio climático (Sharma et al., 2023). Es importante mencionar que no todos los procesos productivos generan el impacto en las mismas proporciones, no obstante, es un factor relevante que hay que considerar. Con respecto a la contaminación química, es importante mencionar que algunos plásticos contienen determinados químicos de interés, los cuales pueden liberarse en el medio ambiente durante su vida útil y descomposición. Este es el caso del PVC, sin embargo, se abordará más adelante con mayor detalle en esta introducción.

Teniendo en cuenta lo anterior, a pesar de que se conoce los impactos de este tipo de materiales, siguen siendo vitales para la economía global (Loa Olivia, 2022). Para el caso específico del PVC, se conoce que “el último estudio de mercado realizado por la firma de consultoría Ceresana, se prevé que la demanda de PVC siga creciendo y alcance unos 57,7 millones de toneladas en todo el mundo para el año 2031” (Interempresas, 2023). Es por esto, que surge la necesidad de implementar con urgencia mayores niveles de reciclaje, sobre todo técnicas que sean altamente efectivas y que no sean contraproducentes con respecto al objetivo inicial (disminuir el impacto ambiental).

Con respecto al reciclaje mecánico (la practica más tradicional), consiste básicamente en descomponer el plástico en pequeños gránulos, pero conserva la estructura natural del polímero, por lo cual puede limitar las aplicaciones post reciclaje (Schyns & Shaver, 2021) y además sólo es adecuado para ciertos tipos de envases y casos de uso. A diferencia del reciclaje mecánico, los procesos de reciclaje químico abren la puerta a poder tomar los polímeros y descomponerlos en algunas sustancias puras o de calidad “virgen” (Loa Olivia, 2022), lo cual lleva a que se puedan dar aplicaciones de uso final de mayor valor. A pesar de su ventaja, es importante mencionar que cuenta con algunas limitaciones importantes debido a que este proceso consume más carbono que el reciclaje mecánico y el rendimiento puede ser bajo para las operaciones comerciales (Loa Olivia, 2022).

Como ya se sabe, para esta investigación es de interés reconocer las principales técnicas de reciclaje químico de PVC. Sin embargo, hay que tener en cuenta algunas consideraciones al aplicar este tipo de técnicas, dado que este termoplástico tiene un alto contenido de compuestos clorados y al implementar este tipo de prácticas es posible que se libere al ambiente emisiones de dioxinas y furanos (compuestos orgánicos altamente tóxicos), o cloro gaseoso y por ende es posible que se generen productos de combustión peligrosos tales como el ácido clorhídrico o el cloruro de hidrógeno (L. Lu et al., 2023). A pesar de que el cloro es una sustancia de especial manejo cuando de PVC se trata, también es importante recalcar que es la encargada de brindarle sus características más



importantes como su durabilidad, su buena resistencia química y su compatibilidad con diversos aditivos (L. Lu et al., 2023). A continuación, se muestra un esquema el cual sintetiza parte del proceso de producción del PVC y cuatro tipos generales de reciclaje de residuos de PVC:



Ilustración 1. Esquema general del proceso de producción de PVC y cuatro tipos de reciclaje de desechos de PVC expuestos de manera general (L. Lu et al., 2023).

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación se centra en el reciclaje terciario. Específicamente, el estudio del arte abordará las principales técnicas de reciclaje químico del PVC relacionadas con la despolimerización basada en disolventes, térmica, química y de reciclaje enzimático. A continuación, se presentarán los objetivos de este trabajo investigativo. Posteriormente se encontrará un capítulo destinado a la generación de redes bibliométricas para conocer el estado de actual del tema en cuestión. Seguido de esto se presenta la metodología para después proceder con el estado del arte. A partir del estado del arte se realizará un análisis de la viabilidad económica y medioambiental de las principales técnicas para finalmente llegar a las principales conclusiones obtenidas.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo General

- Determinar por medio de información bibliográfica, cuales procesos químicos pueden ser viables económica y ambientalmente para el reciclaje o aprovechamiento del PVC que ya ha cumplido su ciclo de vida útil o que ha sido desechado.



3.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el estado del arte para las diversas metodologías químicas de aprovechamiento del PVC.
- Identificar si las formas de reciclar el PVC son viables, económica y ambientalmente.
- Estudiar procesos químicos que pueden ser aplicables para el reciclaje de PVC.

4. METODOLOGÍA

Para realizar este estudio de investigación, fue necesario emprender múltiples indagaciones para recopilar la información disponible hasta la fecha relacionada con el tema en cuestión. Lo anterior se realiza con el objetivo primordial de entender cuál es el panorama actual del conocimiento en el área del reciclaje químico del PVC. La búsqueda de información permitió a identificación de investigaciones previas ya registradas en las bases de datos disponibles. Tras recopilar esta información, se procedió a la formulación de planteamientos iniciales, como por ejemplo las técnicas más utilizadas y las características de cada una de ellas. Partiendo de lo anterior, fue posible determinar cuál es la precisión, el alcance y las limitaciones de este estudio. Este enfoque estratégico no solo proporciona una sólida base conceptual, sino que también aporta las bases para abordar de manera efectiva el análisis medioambiental y económico de este tipo de prácticas de reciclaje. Todo lo anterior permite extraer las principales conclusiones de este estudio de investigación. A continuación, se presenta el esquema de la metodología general seguida en esta investigación:

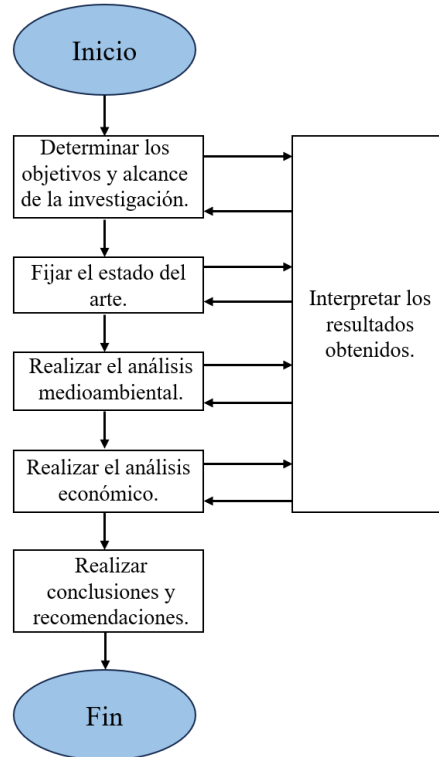


Ilustración 2. Esquema de metodología general de la investigación.

4.1.1 Establecimiento del estado del arte

Con el objetivo de establecer el estado del arte, se consideró pertinente recurrir a un software especializado que permitiera recopilar y visualizar información de investigadores, revistas, publicaciones y palabras clave de las investigaciones realizadas hasta el momento, relacionadas con el tema central de esta investigación. El software seleccionado para este caso fue VOSviewer, el cual se alimentó a partir de dos bases de datos, Web of Science y Scopus. Con las consultas bibliográficas extraídas Redel software se establecieron tres puntos de partida. Lo primero fue identificar cuáles eran los autores y países clave en el tema de investigación, con el objetivo de encontrar un patrón de búsqueda de la bibliografía que haría parte de este estado del arte. Lo segundo fue identificar cada una de las metodologías o técnicas principales para posteriormente categorizar las diferentes prácticas de reciclaje químico del polímero. Finalmente, el tercer punto fue estudiar cada una de las investigaciones consultadas para determinar si mencionaban los impactos ambientales asociados a las prácticas y/o la viabilidad económica de cada una de ellas. A partir de la información obtenida, se consultaron informes y consultorías internacionales que evaluaban la viabilidad medioambiental y económica de las prácticas de reciclaje químico.

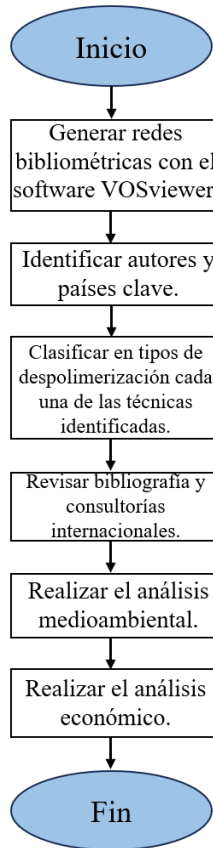


Ilustración 3. Esquema de proceso para establecer el estado del arte.

4.1.2 Descripción de la información disponible

Como se entenderá más adelante en la sección número cinco del documento, uno de los recursos de fuentes bibliográficas más importantes para esta investigación es Web of Science. Esta sección tiene como objetivo principal realizar una breve descripción de la información disponible en este recurso. Se espera que los datos que se presentan a continuación permitan que el lector comprenda cuáles son las tendencias en investigación relacionadas con el reciclaje químico del PVC. Para empezar, se presenta un gráfico en el cual se muestra el número de publicaciones realizadas por cada año, considerando los últimos diez años. Seguido de esto se muestra una tabla en la cual se exponen los principales autores del tema y finalmente, un gráfico que evidencia el porcentaje de artículos correspondientes a cada tipo de despolimerización.



Gráfica 1. Años de publicación de los artículos relacionados con el tema de reciclaje químico del PVC. Las publicaciones consideradas son las que se encuentran en la plataforma de Web of Science.

La gráfica 1, muestra cuantos de los 186 artículos relacionados con la investigación se publicaron en cada uno de los últimos diez años. El gráfico muestra una tendencia creciente a la investigación en este tema, siendo el año 2023 con mayor número de publicaciones. El comportamiento sugiere cómo la implementación de técnicas de reciclaje químico para el PVC ha tenido un interés creciente y se espera que continúe a lo largo del tiempo. Este análisis justifica además la necesidad de una revisión continua del estado del arte que se está generando continuamente.

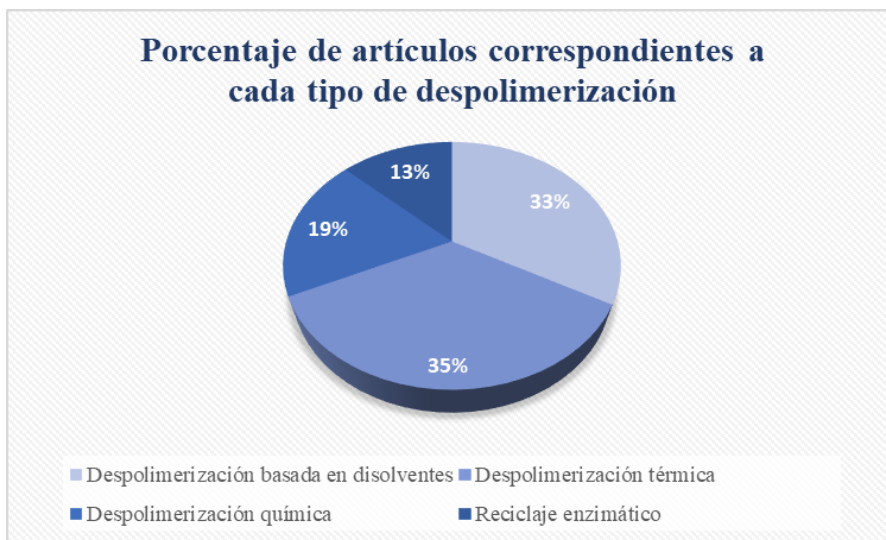
Tabla 1. Autores más recurrentes en la investigación del reciclaje químico del PVC y el número de publicaciones correspondientes.

Autores	Número de publicaciones
Yoshioka, Toshiaki	8
Kameda, Tomohito	7
Al-Harabsheh, Mohammad S	5
Wang, Hui	5
Grause, Guido	4
Bockhorn, Henning	4



Wang, Chongqing	4
Serranti, Silva	3
Lu, Jiaqui	2
Zhao, Yuko	2

La tabla anterior presenta los autores con mayor número de publicaciones en el tema en cuestión. Los nombres presentados en dicha tabla deben ser considerados como algunos de los principales contribuyentes a este tema de investigación y es probable que puedan considerarse como expertos en el tema y a quienes se podría contactar en caso de que llegue a ser necesario.



Gráfica 2. Porcentaje de artículos correspondientes a cada tipo de despolimerización para el caso del PVC.

La gráfica 2 permite evidenciar como se distribuyen los artículos reportados en las fuentes bibliográficas con referencia a la clasificación planteada en este trabajo. La anterior información permite localizar al lector en cuáles han sido las técnicas mayormente estudiadas y por ende de la clasificación en la cual se reporta más información. Lo anterior puede sugerir que tipo de técnicas presentan mayor viabilidad. Adicionalmente, sugiere cuáles son las principales prácticas utilizadas en el reciclaje químico del PVC, por lo cual permite establecer un buen punto de partida si se desea conocer el estado del arte relacionado con el tema en cuestión.



5. VOSviewer – REDES BIBLIOMÉTRICAS

5.1.1 VOSviewer: Características y utilidades

VOSviewer es un software el cual fue desarrollado por dos investigadores académicos en el campo de la cienciometría y la visualización de datos. Nees Jan van Eck y Ludo Waltman, trabajadores del Centro para la Ciencia y Tecnología de la Universidad de Leiden de Países Bajos (De Jong & Bus, 2023). La primera versión de esta herramienta se dio a conocer en el año 2006. Desde su lanzamiento, VOSviewer ha evolucionado y se ha convertido en una herramienta esencial al momento de analizar y visualizar redes de coautoría y citas en la investigación científica.

Este programa es especializado en el diseño y construcción de redes bibliométricas. El cual permite recopilar y visualizar información de investigadores, revistas, publicaciones y palabras clave de un tema en específico. Adicionalmente, es reconocido por su capacidad para explorar y representar visualmente la estructura y dinámica de las redes de coautoría y de citas en las investigaciones científicas que se encuentran publicadas en las bases bibliográficas más prestigiosas del mundo. Las características de este programa permiten que los investigadores puedan analizar con facilidad patrones de colaboración, identificar tendencias emergentes y evaluar la relevancia y la interconexión de los trabajos científicos (VOSviewer, 2023). Dado lo anterior, es posible reconocer e identificar con facilidad cuál es avance científico del tema que se quiera investigar.

Algunas de las características más distintivas de VOSviewer es que tiene capacidad para procesar y transformar datos bibliográficos en representaciones gráficas, como lo son los mapas de redes y visualizaciones que representan la relación entre autores, términos clave y países de investigación. Estas representaciones son generadas mediante técnicas de análisis de coocurrencia, las cuales identifican los patrones de colaboración y citación mediante el estudio de frecuencia y proximidad de elementos (De Jong & Bus, 2023).

Hacer uso de esta herramienta permite identificar comunidades de investigadores los cuales trabajan en los temas de interés, lo cual, si así se desea, permite la colaboración y el intercambio de conocimientos. Por otro lado, utilizando esta herramienta, es posible que se detecten rápidamente las tendencias emergentes y la evolución de los términos clave. Es por esta razón, por la cual en este estado del arte se implementará la herramienta VOSviewer, con el objetivo de conocer cuál es el estado actual del tema de interés, los principales autores y las principales prácticas de reciclaje químico del PVC.



5.1.2 Bases de datos bibliográficas

VOSviewer tiene la capacidad de procesar información descargada de tres de las bases de datos bibliográficas más importantes a nivel mundial: Web of Science, Scopus y PubMed. Para este caso en particular, las dos bases bibliográficas que contienen más información relacionada con el tema de interés son Web of Science y Scopus. Es por esta razón por la cual las redes bibliográficas fueron generadas a partir de los papers extraídos de estas plataformas.

Para empezar Web of Science, es una base de datos desarrollada por Clarivate Analytics la cual proporciona datos relacionados con diversas áreas de investigación. Permite a los usuarios acceder a diversas revistas académicas de alto prestigio, las cuales cubren los campos de ciencias naturales, ciencias sociales, ciencias de la salud, entre otros. Web of Science es altamente compatible con VOSviewer debido a que rastrea la citación de los artículos, lo cual permite realizar un seguimiento de las conexiones entre los artículos relacionados (Clarivate, 2023). Lo anterior permite evaluar la influencia y la importancia de las investigaciones a las cuales se está accediendo.

Ahora bien, Scopus es una base bibliográfica proporcionada por Elsevier. Scopus, al igual que Web of Science, provee una gran cantidad de información de diversas disciplinas. Por otra parte, Scopus brinda algunas métricas de investigación, lo cual permite medir el impacto de una investigación, además de evaluar la importancia relativa de una revista en función de las citas recibidas por sus artículos (Elsevier, 2022). Gracias a esta función VOSviewer puede presentar de manera visual la relevancia que tienen algunos autores o palabras clave.

Es importante mencionar que estas dos bases de datos bibliográficas cuentan con una herramienta de búsqueda avanzada, la cual permite refinar la búsqueda utilizando diversos filtros como, por ejemplo, fecha de publicación, autor o palabras clave. En este caso, en particular se decide implementar una restricción de tiempo no mayor a diez años con el objetivo de garantizar información reciente y que se pueda evitar datos desactualizados y la búsqueda de la bibliografía se realiza partiendo de algunas palabras clave que fueron seleccionadas e identificadas a partir de la lectura de algunas investigaciones iniciales.

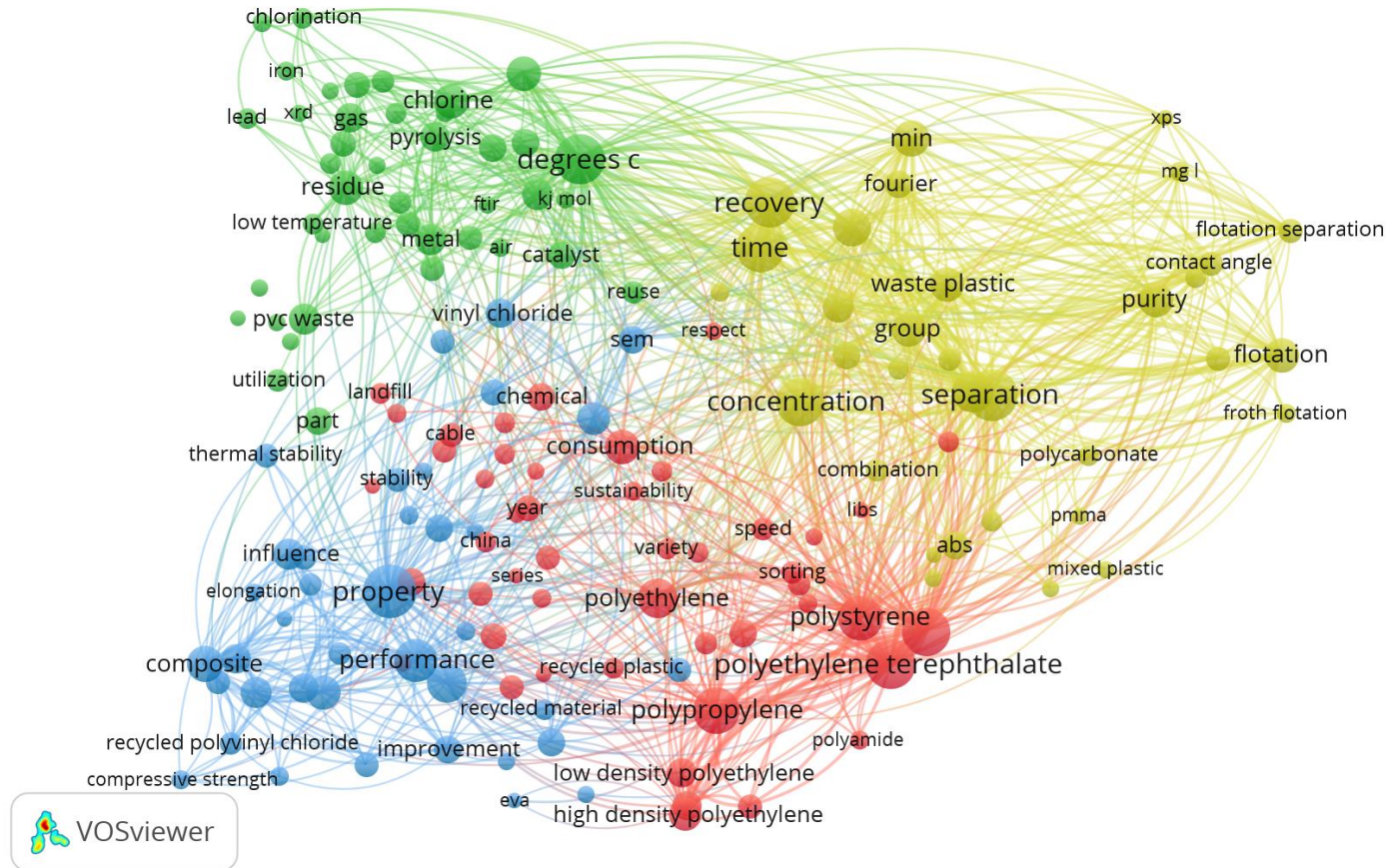
5.1.3 Redes bibliométricas

- **Palabras clave:**



Para generar las redes de palabras clave se utilizaron los datos obtenidos a partir de la búsqueda de bibliografía en la base de datos de Web of Science. Estas redes se generaron exclusivamente con esta plataforma debido a que Scopus solo permite generar redes de coautoría. En este caso se realizaron dos redes de palabras clave, la primera red fue generada utilizando palabras poco delimitadas pero relacionadas con el tema en cuestión. Una vez se generó esta primera red fue posible identificar técnicas más específicas del reciclaje químico del PVC, con ellas fue posible realizar la segunda red. Es importante resaltar que la búsqueda de bibliografía se realiza en inglés debido a que se conoce que de esta manera se logra localizar las mejores y más actualizadas investigaciones, además de que de esta forma se obtienen más resultados de búsqueda.

Para la primera red, las palabras clave que se usaron como criterio de búsqueda fueron: *“Chemical recycling of PVC”*, *“PVC recycling”* y *“Polyvinyl chloride recycling”*. Adicionalmente, el periodo de publicación debía estar entre el primero de enero del año 2013 y el primero de enero del año 2023. Cabe mencionar que las investigaciones mostradas deben contener mínimo una de las palabras clave especificadas, pero su fecha de investigación debe estar dentro del rango especificado. Bajo las condiciones anteriormente especificadas se obtiene un total de 787 investigaciones con las cuales se generó la red. A continuación, se presenta la primera red de palabras clave obtenida:

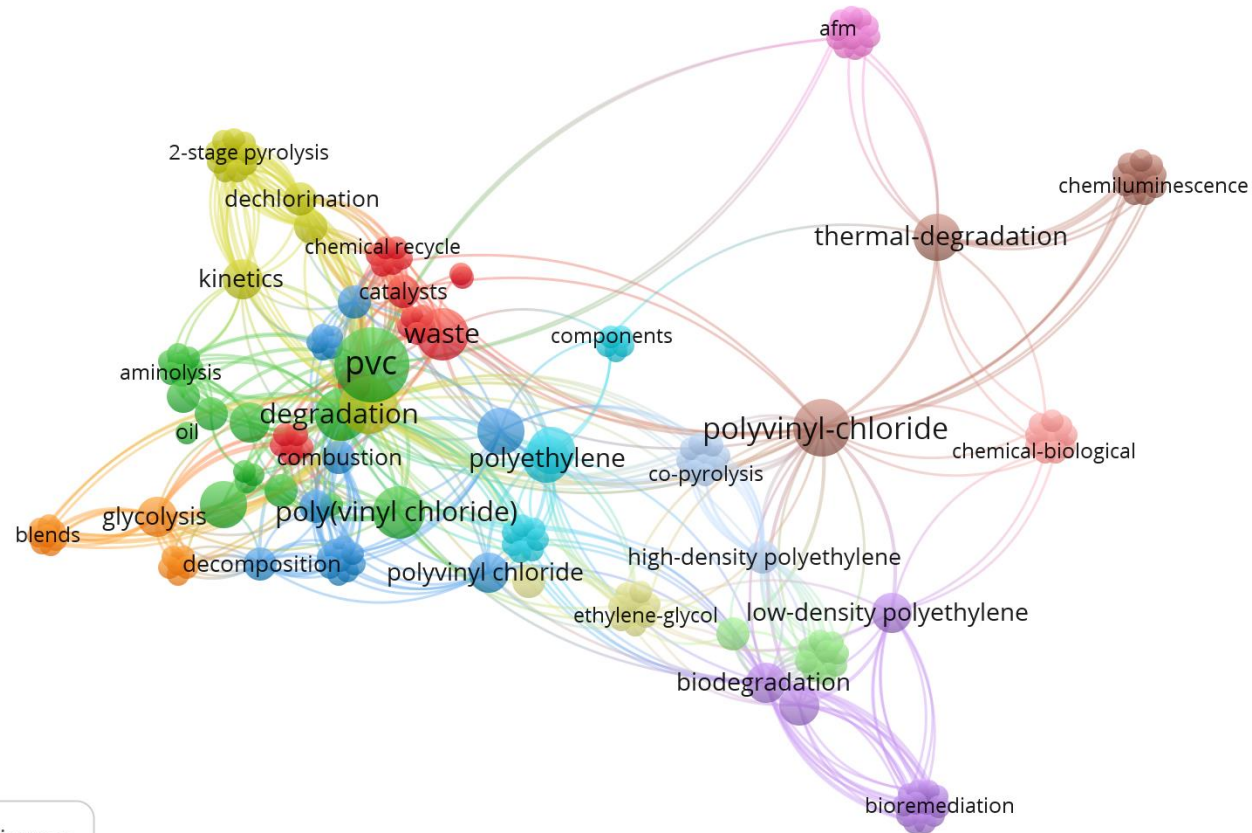


Red 1. Primera red de palabras clave.



De la red anterior se pueden identificar algunas palabras que se suelen aparecer con mayor frecuencia dentro de las 787 investigaciones que se tienen en consideración. Nótese que se evidencian algunas palabras relacionadas con la sostenibilidad, lo cual es de alto interés para esta investigación. Es importante destacar que lo más relevante en esta red es que algunas técnicas de reciclaje químico evidencian alguna relevancia, como por ejemplo pirólisis, la cual está localizada en la parte superior izquierda de la red. Partiendo de lo anterior, se realiza una investigación y se encuentra que esta práctica se encuentra clasificada en un grupo de técnicas denominadas como despolimerización térmica. Lo anterior deriva en un nuevo grupo de palabras clave con las cuales se generó la segunda red y además se encuentran mayormente orientadas a identificar técnicas de reciclaje químico del PVC.

La segunda red fue generada con las siguientes palabras clave: *“Chemical depolymerisation of PVC”*, *“Solvent-based depolymerisation of PVC”*, *“Thermal depolymerisation of PVC”* y *“Enzymatic recycling of PVC”*. Teniendo en cuenta las mismas restricciones de tiempo de publicación anteriormente descritas. Con las condiciones anteriormente establecidas se generó una red que considera los 128 resultados obtenidos bajo estas condiciones. A continuación, se presenta la siguiente segunda red:



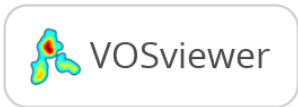
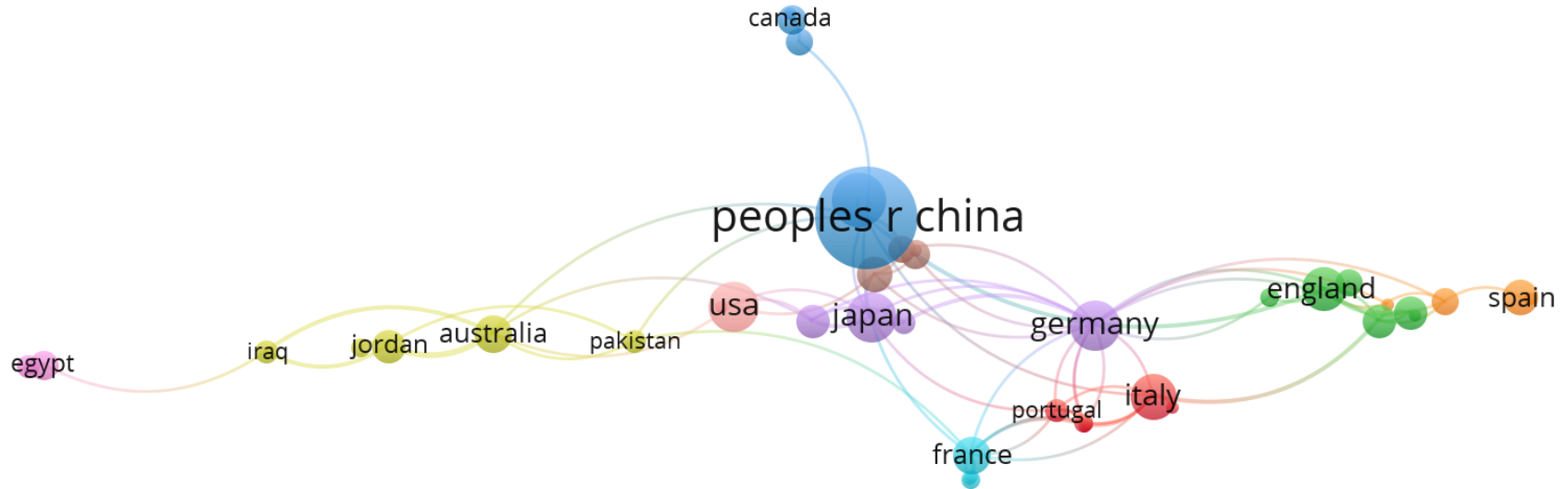
Red 2. Segunda red de palabras clave.



La red anteriormente presentada, deja en evidencia cuáles son las palabras clave más repetitivas dentro de las investigaciones que se están considerando. La importancia de esta red radica en que es posible orientar la investigación hacia las técnicas más comunes de reciclaje químico del PVC. La red evidencia técnicas comunes como lo son la degradación térmica del PVC, glicólisis y nuevamente la técnica de pirólisis. A partir de esta red es posible identificar cuáles son las técnicas de reciclaje químico del PVC que tienen mayor importancia y por ende serán las técnicas en las cuales se centrara este estudio.

- **Países con mayor publicación en el tema de reciclaje químico del PVC:**

Para entender con mayor claridad el contexto mundial de investigación en el tema del reciclaje químico del PVC, se realizó una red de los países que más publican. Además de poder comprender una característica importante de tópico. Con esta red, es posible seleccionar artículos que tenga como origen los países con mayor investigación, lo anterior ayuda a validar la relevancia de las investigaciones que se están teniendo a consideración en este estudio. Esta red fue generada con los mismos 128 resultados obtenidos de Web of Science y con los cuales se fabricó la segunda red. A continuación, se presenta la red de países con mayor publicación en el tema:



Red 3. Red de países con mayor publicación en el tema de reciclaje químico de PVC.



Es importante aclarar que se presentan algunos países con una participación menor y no se logran apreciar en la red, sin embargo, el software reporta que logró identificar el siguiente listado de países.

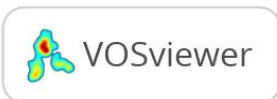
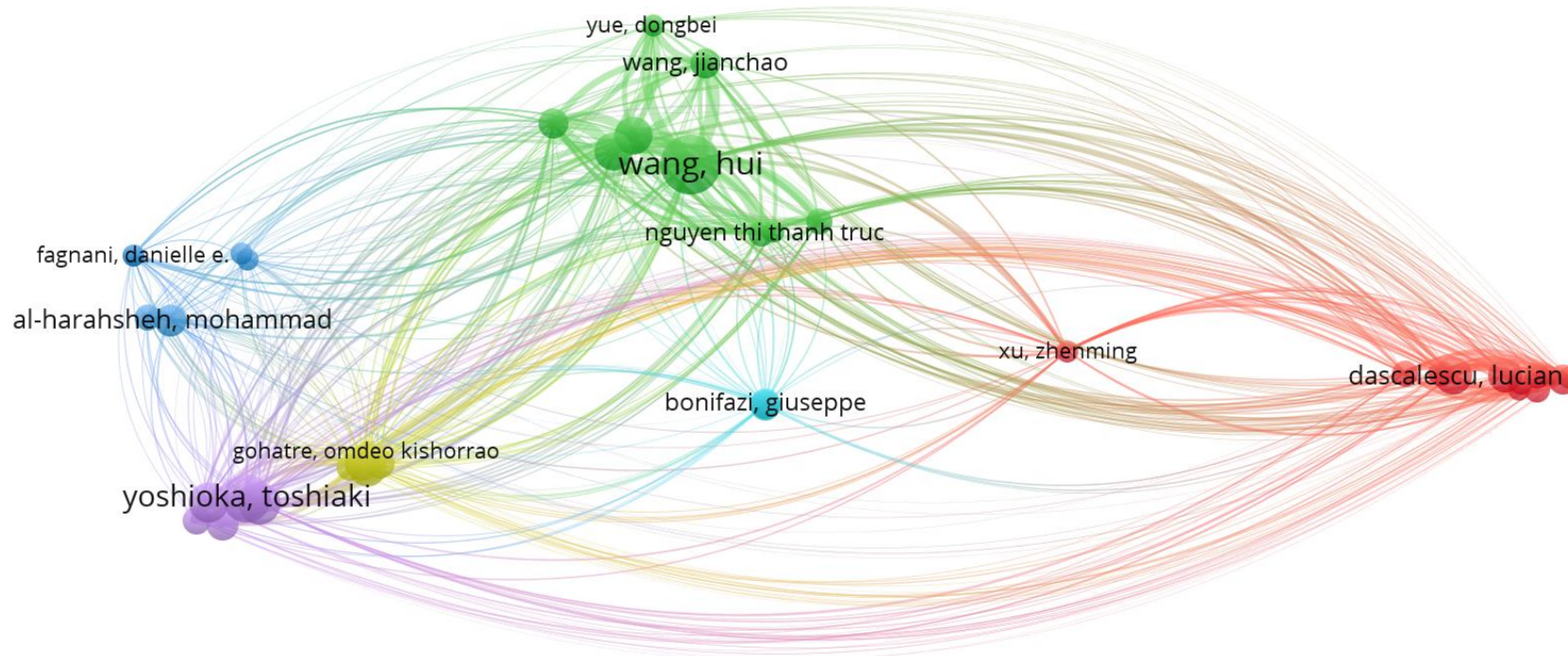
Cluster 1 (6 items)	australia	
croatia	iraq	
finland	jordan	
italy	pakistan	
luxembourg	u arab emirates	
portugal	Cluster 5 (4 items)	
romania	brazil	
Cluster 2 (6 items)	germany	
england	japan	
netherlands	nigeria	Cluster 8 (4 items)
slovakia	Cluster 6 (4 items)	indonesia
sweden	albania	malaysia
switzerland	algeria	south korea
turkey	france	taiwan
Cluster 3 (5 items)	singapore	Cluster 9 (3 items)
canada	Cluster 7 (4 items)	egypt
india	belgium	lithuania
iran	lebanon	saudi arabia
morocco	norway	Cluster 10 (3 items)
peoples r china	spain	denmark
Cluster 4 (5 items)		georgia
		usa

Tabla 2. Listado de países que investigan en el reciclaje químico del PVC.

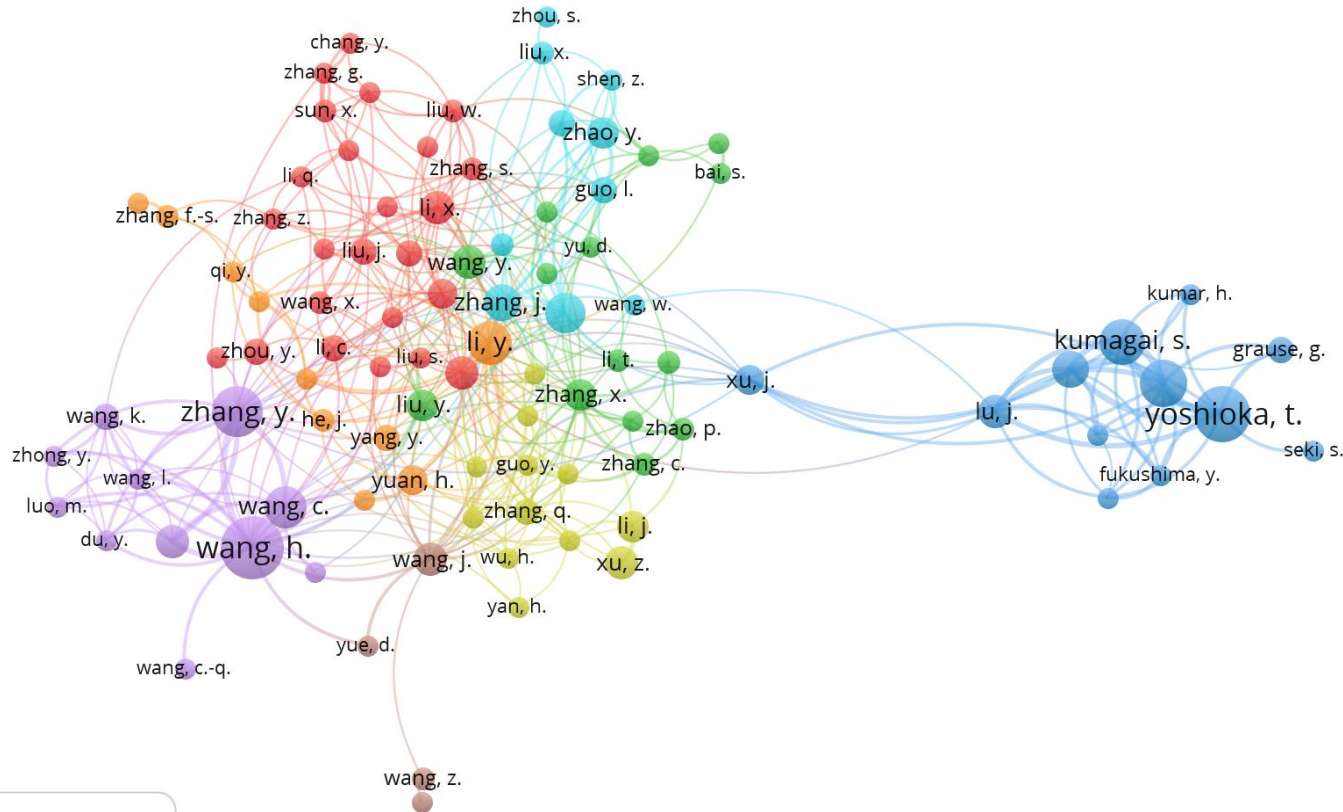
De la red tres se puede observar que el país con mayor investigación en el tema del reciclaje químico del PVC es China, seguido de Alemania, Japón y Estados Unidos. Ahora bien, de la tabla número uno se puede evidenciar que el único país de América Latina que aparece en la red es Brasil, aunque tiene un bajo índice de investigación por lo cual, el estudio de este tema de interés en este continente es baja, según lo reportado. Es posible determinar que, a nivel mundial, los avances relacionados con el reciclaje químico del PVC están centrados en los continentes de Europa y Asia.

- **Autores con el mayor índice de publicaciones y citaciones relacionadas con el reciclaje químico del PVC:**

Al igual que para las redes generadas anteriormente, se utilizó la información extraída de Web of Science. Sin embargo, para este caso también se busca información en Scopus utilizando los mismos parámetros de búsqueda con la cual se generó la red número dos. Esto se realiza para tener un panorama más amplio de autores y a su vez de investigaciones y para que este trabajo no se vea sesgado a una sola base de datos. A continuación, se presentan las dos redes obtenidas.



Red 4. Red de autores que más publican en el tema del reciclaje químico del PVC. Base bibliográfica: Web of Science.



Red 5. Red de autores que más publican en el tema del reciclaje químico del PVC. Base bibliográfica: Scopus.



Las redes número cuatro y número cinco, permiten rectificar que uno de los continentes que más publica con respecto al tema en cuestión es Asia. Lo anterior es debido a que los nombres presentados en la red sugieren un origen de ascendencia asiática. Por otra parte, estas redes permiten evidenciar como se referencian entre autores y cuáles son los autores con más publicaciones relacionadas con el tema de interés.

6. TÉCNICAS DE RECICLAJE QUIMICO DEL PVC

La creciente preocupación global por la sostenibilidad ambiental y la gestión responsable de los recursos naturales ha desarrollado la necesidad de implementar, aplicar e investigar diversas técnicas de reciclaje para plásticos. En particular, el PVC tiene un ciclo de vida largo debido a sus propiedades altamente resistentes (REHAU, 2022), sin embargo, cuando su desecho es inadecuado, puede llegar a generar impactos negativos en su entorno (Adeola, 2018). Por lo cual, la adopción de técnicas de reciclaje para el PVC se ha consolidado como una práctica de suma importancia. Dado lo anterior, para el presente trabajo de investigación es de vital importancia establecer los antecedentes relacionados específicamente con las técnicas del reciclaje químico del PVC y de tal forma poder instruir los precedentes investigativos alcanzados hasta el momento. Teniendo en cuenta lo anterior y llevando a cabo una exhaustiva investigación bibliográfica, como se mencionó anteriormente, a continuación, se presenta, el estado del arte del reciclaje químico del PVC, a partir de las investigaciones recientes llevadas a cabo en los últimos diez años. Las diferentes investigaciones consultadas se dividen en la clase de técnica utilizada, por lo cual, se organizan de manera específica según los resultados obtenidos en cada una de ellas. Además, al concluir, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en los diversos estudios.

6.1.1 Despolimerización basada en disolventes

La despolimerización basada en disolventes es una de las técnicas de reciclaje químico del PVC, que más ha sido investigada. Este tipo de técnicas buscan descomponer el PVC en sus componentes básicos o en algunos casos descomponer la matriz donde se encuentra contenida la molécula de interés, lo cual permite su posterior reutilización considerando aplicaciones de los componentes de manera individual (Elgegren et al., 2012). Este enfoque implica el uso de disolventes específicos, según sea el caso, como lo puede ser el cloruro de metileno o tetrahidrofurano. En general los enfoques de reciclaje basados en disolventes ofrecen un medio eficaz para recuperar materiales plásticos de alta calidad (Soyemi & Szilvasi, 2023). Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 2 se presentan diferentes estudios que hacen uso de esta técnica, así como la fuente de información, el



origen del PVC (de qué matriz se está reciclando), descripción de la técnica utilizada, condiciones de operación con las cuales se llevó a cabo la técnica, principales resultados obtenidos y finalmente los posibles usos del PVC después del reciclaje.



Tabla 3. Resultados de estudios de despolimerización basada en disolventes para el reciclaje químico del PVC.

Referencia.	Origen del PVC.	Descripción de la técnica.	Condiciones de operación.	Resultados.	Posibles usos del PVC después del reciclaje.
<p>(Calosi et al., 2022)</p> <p>Glycolysis of semi-interpenetrated polymer network foam based on poly (vinyl chloride) for recovery and reuse of the individual components.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Waste Management.</p>	<p>Espuma rígida semi-interpenetrada de polímeros a base de PVC y poliurea.</p>	<p>Técnica usada: Glucólisis</p> <p>Caracterización: FTIR, RMN, DSC, análisis elemental, solubilidad en disolventes y mediciones de reología.</p>	<p>Tiempo de reacción: 8 min a 3 h.</p> <p>Temperatura: de 155 °C a 200°C</p> <p>Catalizadores: Acetato de potasio, DBTL, etilenglicol, dietilenglicol, etc.</p>	<p>Condición de reacción óptima para la glucólisis:</p> <p>Temperatura: de 165 °C a 175°C</p> <p>Tiempo: de 20 – 30 min.</p> <p>Catalizador: DBTL</p> <p>Pureza del PVC recuperado: 90%</p>	<p>El PVC recuperado demostró un bajo grado de degradación y una viscosidad adecuada para su procesamiento como material termoplástico, es apto para ser procesado mediante moldeo por inyección.</p>
<p>(Glas et al., 2014)</p> <p>End-of-Life Treatment of Poly(Vinyl Chloride) and Chlorinated Polyethylene by Dehydrochlorination in Ionic Liquids.</p> <p>Journal of Waste ChemSusChem.</p>	<p>PVC al final de su vida útil.</p>	<p>Técnica usada: Líquidos iónicos (LI) de fosfonio para deshidroclorar y/o disolver polímeros clorados.</p> <p>Caracterización: FTIR y RMN.</p>	<p>Tiempo de reacción: 1 h a 8 h.</p> <p>Temperatura: de 80 °C a 180 °C</p>	<p>Los LI disuelven y deshidrocloran con éxito el PVC (hasta un 98%). Las piezas más pequeñas se deshidrocloran más rápido.</p> <p>Temperatura: 80 °C</p> <p>Tiempo: de 60 min.</p> <p>LI: Tetrabutilfosfonio.</p>	<p>El PVC fue deshidroclorado con éxito por lo cual si es desechado se evitarán impactos ambientales asociados a los compuestos clorados.</p>



<p>(Sherwood, 2020)</p> <p>Closed-Loop Recycling of Polymers Using Solvents</p> <p>Journal Johnson Matthey Technology Review.</p>	<p>Desechos de PVC contaminados con textiles y otros materiales.</p>	<p>Técnica usada: Metiletilcetona (MEK) utilizada como solvente y n-hexano como cosolvente.</p> <p>Caracterización: FTIR y RMN.</p>	<p>Tiempo y temperatura de mezclado: 10 min a 100°C.</p> <p>Temperatura para precipitar PVC: de 64 °C a 65 °C.</p>	<p>Para obtener la mayor cantidad de PVC recuperado se debe agregar el 82% de MEK, 5% agua y 13% de n-hexano por cada kilogramo de PVC. El PVC se empieza a precipitar a los 63°C y se logra recuperar la mezcla de solventes.</p>	<p>El 99% del PVC puro recuperado pudo pasar por un tamiz de 1 mm. Sin embargo, la combinación de solventes no es la ideal por su alta toxicidad.</p>
<p>(Grause et al., 2017)</p> <p>Solubility parameters for determining optimal solvents for separating PVC from PVC-coated PET fibers.</p> <p>Journal Springer.</p>	<p>Polímero compuesto de PVC y PET</p>	<p>Técnica usada: despolimerización utilizando tetrahidrofurano (THF), metilcetona (MEK), N,N-dimetilformamida (DMF), ciclohexanona y ciclopentanona.</p>	<p>Temperatura promedio para disolución del PVC: 20°C a 40°C.</p>	<p>THF disolvió el PVC a 20°C.</p> <p>La ciclohexanona y la ciclopentanona lo hicieron a 40°C</p> <p>MEK y DMF no lograron una disolución completa del PVC a ninguna temperatura.</p>	<p>Dependiendo del solvente se logra obtener PVC con 99% a partir de la mezcla de PVC y PET.</p>
<p>(Achilias et al., 2013)</p> <p>Recycling of polymers from plastic packaging materials using the dissolution-reprecipitation technique.</p> <p>Journal Springer.</p>	<p>PVC contenido en envases utilizados en alimentos, productos farmacéuticos y detergentes.</p>	<p>Técnica usada: DCM Y tolueno usado como solvente y metanol como cosolvente</p> <p>Caracterización: FTIR</p>	<p>Temperatura de calentamiento: 89°C.</p> <p>Tiempo de calentamiento: 30 min.</p>	<p>Se logra recuperar el 92% del polímero y las propiedades de los materiales reciclados no varían con respecto a los materiales originales.</p>	<p>Se logra obtener un precipitado de PVC puro reciclado a partir de algunos envases.</p>



<p>(Zhao et al., 2018)</p> <p>Solvent-based separation and recycling of waste plastic: A review</p> <p>Journal Chemosphere.</p>	<p>Botellas plásticas desechadas, hechas a base de PVC</p>	<p>Técnica usada: Ciclohexanona y n-hexano utilizados como disolvente</p> <p>Caracterización: FTIR</p>	<p>Temperatura de calentamiento: 70°C.</p> <p>Tiempo de calentamiento: 15 a 60 min.</p>	<p>Se logra recuperar el 97% del polímero y las propiedades de los materiales reciclados no varían con respecto a los materiales originales.</p>	<p>Se logra recuperar el PVC con excelente peso moléculas y se conservan las propiedades mecánicas a las del polímero original.</p>
<p>(J. Q. Lu et al., 2019)</p> <p>Practical dichlorination of polyvinyl chloride wastes in NaOH/ethylene glycol using an up-scale ball mill reactor and validation by discrete element method simulations.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Waste Management.</p>	<p>Desechos de PVC.</p>	<p>Técnica usada: decloración.</p>	<p>Temperatura de calentamiento: 190°C.</p> <p>Tiempo de calentamiento: 5 horas.</p>	<p>Se obtuvo un grado máximo de Cl del 99% con NaOH 1M en etilenglicol. El contenido de Cl restante en los residuos de las muestras fue pequeño y disminuyó al disminuir el tamaño del residuo. Se sugiere que primero se declora las superficies de PVC y luego se trituran las partículas finas mediante el molino de bolas para exponer la superficie interior que no reacciona.</p>	<p>El PVC fue deshidroclorado con éxito por lo cual si es desechado se evitarán impactos ambientales asociados a los compuestos clorados.</p>



A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los estudios, así como las consideraciones clave:

Calosi et al. (2022) implementaron en su estudio la técnica de despolimerización a través de la glicolisis (usando un alcohol conocido como glicol) con el objetivo de separar el PVC y la poliurea/isocianurato los cuales formaban una espuma rígida de polímero semi-interpenetrado. En este caso se determinó que para llevar a cabo la glicolisis es necesario manejar un rango de temperatura entre 165 °C y 175°C por 30 minutos. Durante el proceso se logra demostrar que la espuma se despolimeriza en oligómeros terminados con hidroxilos y aminas. Adicionalmente, las pruebas de caracterización demostraron que el PVC recuperado tiene un bajo grado de degradación y tiene potencial para ser reutilizado como un material termoplástico, se sugiere que sea utilizado en procesos de moldeo por inyección. Es importante aclarar que al finalizar el proceso el PVC reciclado presenta trazas de material derivado del catalizador utilizado en el proceso, además de contener rastros de isocianurato y carbonilo. A pesar de lo anterior, el PVC reciclado arroja espectros similares a los del PVC puro. Finalmente, la viscosidad del PVC reciclado fue menor a la del PVC virgen, por lo cual se evidencia que al finalizar el proceso de reciclaje el peso molecular del polímero disminuyó.

Glas et al. (2014) presentaron los retos del tratamiento del PVC al final de su vida útil (los cuales se abordarán con más detalle en capítulos posteriores en este documento). Los autores proponen el método de dechloración haciendo uso de líquidos iónicos. Dichos líquidos tienen la capacidad de disolver el PVC lo cual facilita la reacción de dechloración. Se recomienda, para obtener los mejores resultados, utilizar líquidos iónicos con aniones que tengan una alta capacidad de aceptar enlaces de hidrógeno. También es necesario tener en cuenta que el número de átomos de carbono en el catión (parte cargada positivamente del líquido iónico) determina la temperatura de inicio de la dechloración. Una vez es disuelto el PVC, es necesario someterlo a temperaturas elevadas para eliminar el cloruro de hidrógeno de la cadena del PVC. Para confirmar la eliminación de las moléculas de cloro se verificó que los enlaces dobles estuvieran presentes en la nueva molécula. Finalmente, se determina que para mejorar esta técnica de reciclaje se sugiere utilizar piezas más pequeñas de PVC, temperaturas más altas y mayores cargas de polímero en el líquido iónico.

Sherwood. (2020) presenta en su estudio la técnica del reciclaje de polímeros a base de disolventes, entre ellos el PVC. Para este material en particular, la técnica implica disolver selectivamente los residuos del PVC en un disolvente orgánico y luego precipitar el PVC evaporando el disolvente. En esta investigación se presenta el caso de éxito de VinyLoop, método en el cual se tomaron desechos de PVC, usualmente contaminados con textiles. El solvente utilizado en esta metodología fue el n-hexano y metil etil cetona los cuales son altamente efectivos para disolver selectivamente el plástico de interés. El PVC



reciclado tenía la misma calidad que la del material original. Una de las principales desventajas de este tipo de procedimientos es que son débiles económicamente hablando con respecto al reciclaje mecánico, además de que la materia prima puede ser difícil de conseguir.

Grause et al. (2017) discutieron el uso de los parámetros de solubilidad para determinar cuál es el solvente más apropiado para el reciclaje químico del PVC proveniente del recubrimiento de fibras de PET. A lo largo de la investigación se probó la solubilidad del PVC en 30 diferentes solventes, algunos de los más efectivos en este proceso fueron el tetrahidrofurano, la metiletilcetona, la N,N-dimetilformamida, la ciclohexanona y la ciclopentanona. En este artículo destacan el parámetro aceptor-donador de electrones de Gutmann y los parámetros de Kamlet-Taft como los más eficaces para describir el sistema de PVC-disolvente. Finalmente, los disolventes que demostraron mayor eficiencia en separación de fibras de PVC del PET fueron el tetrahidrofurano, la metiletilcetona, y la N,N-dimetilformamida. El tetrahidrofurano demostró el mejor rendimiento y fue capaz de eliminar el PVC a una temperatura de 20°C en 20 minutos. Mientras que la ciclohexanona y la ciclopentanona, mostraron altas capacidades de solvatación a una temperatura mayor (40°C). Cabe mencionar que la N,N-dimetilformamida y la metiletilcetona no eliminaron por completo el PVC de las fibras.

Achillas et al. (2013) implementaron la técnica de disolución-reprecipitación para el reciclaje del PVC. A grandes rasgos el método implica disolver el material de desecho de PVC en un disolvente para después reprecipitarlo añadiendo una sustancia no disolvente lo que da como resultado la formación de polvo o pequeñas partículas de PVC, el material residual se puede eliminar por filtración. Este método permite la separación del polímero del interés de otros contaminantes y aditivos. Para lograr lo propuesto, los autores implementaron pruebas de FTIR para determinar el tipo de polímero presente en el material, lo anterior permitiría optimizar las condiciones experimentales. La selección del solvente y no disolvente se realiza probando diferentes químicos y midiendo su efectividad. La investigación informa que para lograr los resultados deseados es fundamental establecer de manera adecuada la temperatura de disolución y la concentración inicial del polímero. La investigación establece que el PVC recuperado conserva sus propiedades originales y queda libre de contaminante por lo cual puede ser utilizado nuevamente en diversas aplicaciones.

Zhao et al. (2018) presentaron información relacionada con las diferentes prácticas de reciclaje químico del PVC, relacionada con métodos basados en solventes. Este documento es fundamental ya que presenta información específica sobre el reciclaje de tuberías de PVC. Para este caso en particular se establece que utilizando solventes orgánicos se logra tener una tasa de recuperación del 86% a temperatura ambiente durante 24 h. Para mejorar las propiedades del material reciclado, se utiliza como aditivo $CaCO_3$. Este último compuesto se puede recuperar y reutilizar como carga en la producción de



nuevas tuberías de PVC, por lo cual se convierte en una estrategia para reducir la necesidad de utilizar materiales vírgenes y de esta manera mejorar la sostenibilidad de las prácticas de reciclaje. Por otra parte, este documento propone la técnica de extracción con fluido supercrítico, en la cual se utiliza la solubilización selectiva cerca del punto crítico para disolver el PVC. En ese caso en particular se utilizaron n-pentano y n-heptano a presiones supercríticas para disolver el PVC y luego recuperarlo mediante la eliminación del solvente. Finalmente, este documento presenta algunas razones por las cuales los métodos basados en la separación con solventes son medioambientalmente viables, esta información será expuesta más adelante en este documento.

J.Q.Lu et al. (2019) desarrollaron un estudio en el cual desarrollan un proceso de dechloración el cual se lleva a cabo en un reactor de molino de bolas. Durante el proceso se utilizó NaOH debido a que es una base fuerte la cual puede reaccionar con los átomos de cloro contenidos en el PVC. La reacción entre estas dos sustancias produce NaCl y algunos hidrocarburos dechlorados. Dado lo anterior, el NaOH actúa como un agente dechlorante, eliminando eficazmente el cloro de los residuos del PVC. El resultado de este proceso deja como resultado materias primas valiosas. Finalmente, las condiciones con las cuales se obtuvo el mayor grado de dechloración (99%) fueron NaOH con una concentración de 1 M y utilizando etilenglicol como solvente.

6.1.2 Despolimerización térmica

La despolimerización térmica es una técnica usada para el reciclaje químico del PVC. Este tipo de metodologías están enfocadas en llevar el compuesto químico a elevadas temperaturas, con el objetivo de generar la ruptura de los enlaces poliméricos de la molécula y poder recuperar los componentes básicos. En general, las técnicas más utilizadas en esta clasificación es la hidrogenación, pirolisis, co-pirolisis y la gasificación (Yu et al., 2016). Es importante destacar que estas metodologías buscan mantener la estructura orgánica básica (Lewandowski & Skórczewska, 2022). Se considera importante entender algunos aspectos clave de cada una de las técnicas, es por esta razón que se presentará una breve contextualización de cada una de ellas:

Hidrogenación: El proceso de hidrogenación de PVC consiste en aplicar un tratamiento térmico en presencia de dihidrógeno (Gala et al., 2021). En este caso el PVC es descompuesto térmicamente obteniendo productos líquidos y gaseosos. Durante el proceso se pueden producir reacciones secundarias con el dihidrógeno, en gran parte de los casos se llegan a producir hidrocarburos saturados y estables (L. Lu et al., 2023). El reto principal en esta práctica es poder generar una hidrogenación completa del PVC,



normalmente esto no sucede y, por el contrario, normalmente se obtienen hidrocarburos clorados.

Pirolisis y co-pirolisis: A lo largo de los años, la pirolisis de PVC ha sido bastante estudiada, de hecho, es una de las técnicas de reciclaje químico más utilizadas. A continuación, se presenta un esquema general de este proceso:

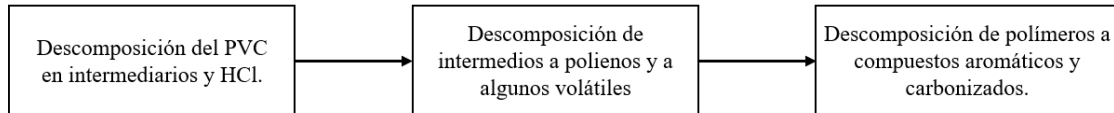


Ilustración 4. Descripción general del proceso de pirolisis.

El proceso termoquímico anteriormente ilustrado realiza la descomposición del PVC en ausencia de oxígeno. Generalmente, requiere gran cantidad de energía debido a que se debe operar en un rango de temperaturas de 300°C a 800°C (L. Lu et al., 2023), en algunos casos es posible que se requieran mayores temperaturas. Finalmente, la co-pirolisis es una variante del proceso anteriormente descrito. En este caso en particular se mezclan dos o más materiales orgánicos antes de someterlos a la descomposición térmica. Esta técnica ayuda a mejorar la eficiencia y la calidad de los productos obtenidos (Wu et al., 2014).

Gasificación: El principio de funcionamiento de esta técnica, consiste en someter a los residuos de PVC bajo una atmósfera de aire y vapor. El principal producto de la gasificación es energía por medio de gases de síntesis, como por ejemplo el dihidrógeno y monóxido de carbono (Lu et al., 2023). Sin embargo, al momento de aplicar este proceso con el PVC, hay que tener en cuenta que se puede generar una alta concentración de alquitranes, lo cual representa un reto. Al finalizar la descomposición del PVC se suele obtener productos tales como HCl, H₂ y CO. Es importante mencionar que la gasificación debe ir de la mano de diversos procesos tales como el secado, pirolisis, agrietamiento y reformación, lo anterior con el objetivo de que sea altamente eficiente.

Al igual que en la sección anterior, se presentará la Tabla 3, la cual expondrá los principales estudios, los cuales utilizan la despolimerización térmica como metodología de reciclaje del PVC.



Tabla 4. Resultados de estudios de despolimerización térmica para el reciclaje químico del PVC.

Referencia.	Origen del PVC.	Descripción de la técnica.	Condiciones de operación.	Resultados.	Posibles usos del PVC después del reciclaje.
<p>(Ye et al., 2021)</p> <p>Co-pyrolysis of Fe₃O₄-poly (vinyl chloride) (PVC) mixtures: mitigation of chlorine emissions during PVC recycling.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Waste Management.</p>	Mezcla del PVC con Fe ₃ O ₄ .	Técnica usada: Co-pirólisis.	Temperatura: mayor a 400.85 °C.	La presencia de Fe ₃ O ₄ ayuda a suprimir las emisiones gaseosas de HCl (solo fue liberado un 0,6% en masa), procedentes de la descomposición del PVC.	Se logra deshidroclorar la molécula del PVC y al finalizar las reacciones se obtiene una mezcla de Fe ₃ O ₄ con Fe ₂ O ₃ y polieno, componentes que pueden ser utilizados para la fabricación de hierro.
<p>(Yu et al., 2016)</p> <p>Thermal degradation of PVC: A review</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Waste Management.</p>	Desechos de PVC.	Técnica usada: Pirólisis.	Temperatura: Entre 250°C a 525°C.	La deshidrocloración ocurre en la primera etapa a una temperatura de 250 °C y 350 °C, en esta etapa se elimina casi todo el cloro. En la segunda etapa la descomposición y ciclación de los polienos lineales se producen entre 350 °C y 525 °C.	Al finalizar se obtuvieron monómeros de vinilo los cuales pueden ser utilizados para la producción de nuevos químicos o polímeros. Por otro lado, se obtuvo Alquitrán y subproductos orgánicos los cuales pueden ser utilizados en la obtención de combustibles.



<p>(Svadlenak et al., 2023)</p> <p>Upcycling of polyvinyl chloride to hydrocarbon waxes via dichlorination and catalytic hydrogenation.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Applied Catalysis B: Environmental.</p>	<p>Corrientes residuales de PVC.</p>	<p>Técnica usada: Hidrogenación.</p> <p>Caracterización: DSC</p>	<p>Temperatura: Entre 80°C a 100°C.</p>	<p>Las alquilaminas usadas como catalizadores homogéneos declaran exitosamente el PVC. Se lograron rendimientos de cera de hidrocarburos superiores al 79%. La caracterización demuestra una declaración completa.</p>	<p>Cera de polietileno en un sistema mixto de amina y agua. Producto apto para uso como adhesivos termofusibles.</p>
<p>(Adeniyi et al., 2022)</p> <p>Thermal recycling strategy of Coca-Cola PVC label films by its co-carbonization with <i>Terminalia ivorensis</i> laves.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Cleaner Engineering and Technology.</p>	<p>Películas de etiquetas de PVC de la marca Coca-Cola utilizadas para el embalaje de sus productos.</p>	<p>Técnica usada: Co-carbonización.</p> <p>Caracterización: FTIR, DTA/TGA.</p>	<p>Temperatura: Entre 205.6°C a 285.03°C.</p> <p>Tiempo de operación: 100 minutos.</p>	<p>Las películas de PVC de las etiquetas se carbonizaron con hojas de <i>Terminalia ivorensis</i> (TIL). El proceso dio un rendimiento del 42.50% y 45.60% para TIL-biochar y TIL-PVC-biochar. Se pudo determinar que este último contenía mayor concentración de carbono y cloro.</p>	<p>Producción de TIL-PVC-biochar. Este material puede ser destinado para la producción de compuestos conductores o puede ser usado como adsorbente para el secuestro de contaminantes del medio ambiente.</p>



<p>(Cho et al., 2015)</p> <p>Air gasification of PVC (polyvinyl chloride)-containing plastic waste in a two-stage gasifier using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for the production of clean and hydrogen-rich producer gas.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Energy.</p>	<p>Residuos plásticos los cuales contenían PVC (residuos compuestos).</p>	<p>Técnica usada: Gasificación</p> <p>Caracterización: FTIR, DTA/TGA.</p>	<p>Temperatura: Entre 450°C y 500°C.</p> <p>Tiempo de operación: 180 minutos.</p>	<p>Los aditivos calcinados a base de Ca y de carbon activado lograron reducir los contenidos de HCl en las corrientes gaseosas, dicha concentración fue inferior a 1 ppm. El estudio demuestra que las conchas de ostras son eficaces para la eliminación de alquitrán y HCl.</p>	<p>Gas rico en hidrógeno con bajos contenidos de alquitrán y HCl, con un rendimiento superior al 88%.</p>
<p>(Hong et al., 2022)</p> <p>A Comprehensive understanding of the synergistic effect during co-pyrolysis of polyvinyl chloride (PVC) and coal.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Journal of Energy.</p>	<p>Residuos de PVC.</p>	<p>Técnica usada: Co-pyrolysis (PVC/carbón).</p> <p>Caracterización: Simulaciones ReaxFF MD y análisis termogravimétricos.</p>	<p>Temperatura: Entre 900°C y 2726.85°C.</p>	<p>Los resultados demuestran que el carbón promueve la liberación de HCl debido a que proporcionan un H adicional a los radicales libres de HCl. Por lo cual se incrementó el rendimiento de C₂H₂.</p>	<p>Se obtienen los siguientes compuestos a partir de la descomposición del PVC: HCl, H₂, C₂H₂. Este último puede ser utilizado en aplicaciones de calentamiento de llama o soldaduras.</p>



<p>(Miandad et al., 2016)</p> <p>Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Process Safety and Environmental Protection.</p>	<p>Mezclas de residuos plásticos que contienen PVC (plásticos con alto contenido de PVC, superior a 5% wt).</p>	<p>Técnica usada: Pirólisis catalítica</p>	<p>Temperatura: inferiores a 500°C.</p>	<p>Técnica alternativa a la pirolisis térmica. Mediante el uso de catalizadores hace que el proceso sea más eficiente debido a que requiere menos temperatura.</p>	<p>Aceite líquido con características similares a las del combustible diésel convencional. Puede ser utilizado en aplicaciones relacionadas con energía. Durante el proceso se presentan subproductos como carbón vegetal el cual puede utilizarse como material adsorbente.</p>
---	---	---	--	--	--



A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los estudios, así como las consideraciones clave:

Ye et al. (2021) decidieron realizar la co-pirolisis de mezclas de Fe_3O_4 y el PVC (mezclas comunes en la industria de sensores y dispositivos electromagnéticos). La importancia de esta investigación radica en que se llega a la conclusión de que es posible descomponer el PVC mediante el proceso de cloración del Fe_3O_4 a temperaturas mayores a $400.85^\circ C$. Bajo estas condiciones se produce una descomposición de polímeros conjugados junto con la reducción de Fe_3O_4/Fe_2O_3 lo cual resulta en la liberación de $FeCl_2$. Este último es de gran interés en diversas industrias como en la farmacéutica o a escala de laboratorio ya que este es utilizado como agente reductor (Formulación Química, n.d.). Por otro lado, esta investigación resalta el hecho de que la alta temperatura que está involucrada en este proceso causa que se generen productos gaseosos como HCl , H_2 y otros volátiles, la cantidad liberada de estos compuestos depende directamente de la composición inicial del PVC. Finalmente, se menciona que existe un impacto ambiental debido a que parte del $FeCl_2$ es liberado al ambiente y por ende puede llegar a causar efectos en los suelos, ecosistemas acuáticos y en la calidad del aire, debido a su toxicidad.

Yu et al (2016) se encargaron de realizar un estudio relacionado con las diferentes técnicas de reciclaje químico del PVC. Cabe mencionar que se centran en la técnica de pirolisis. Esta investigación cobra gran importancia debido a que presenta las ventajas y desventajas de hacer uso de esta técnica. Entre las principales ventajas se encuentran que mediante la pirolisis se puede convertir el PVC en combustibles útiles e intermediarios químicos, lo cual deriva en que se reduce la necesidad de utilizar materias primas vírgenes. Adicionalmente, en este proceso se pueden reducir la producción de algunos gases ligeros como lo puede ser el óxido de nitrógeno, óxido de azufre y dioxinas. Cabe mencionar que el proceso de pirolisis es una de las pocas técnicas las cuales puede ser llevada fácilmente a escala industrial. En cuanto a las desventajas de este método, se conoce que requiere de altas temperaturas, lo cual deriva en el exceso de requerimiento energético. Por otro lado, uno de los principales productos de este método son los aceites que contienen una cantidad elevada de cloro, lo cual puede generar un daño ambiental. Finalmente, se destaca que caracterizar y tener una certeza de los rendimientos de los aceites o gases producidos durante este proceso puede llegar a ser complejo debido a la naturaleza de estos.

Svadlenak et al. (2023) proponen generar hidrocarburos con aspecto de cera, los cuales tienen aplicación en diferentes áreas de producción como la de muebles, velas, lubricantes sólidos, entre otros (Wang et al., 2011). Para producir este tipo de hidrocarburos se utilizan una serie de reacciones que involucran la



hidrodescloración mediante una base de aminas. Este estudio destaca que los tiempos de reacción afectan la composición de las ceras obtenidas. Es decir, cuando se tienen tiempos de reacción más largos se logran obtener ceras completamente descloradas, mientras que en el caso contrario se obtienen mezclas de cadenas de hidrocarburos clorados y no clorados. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario utilizar catalizadores, sin embargo, se demostró que si se reutiliza el catalizador en reacciones posteriores se disminuye la producción de cera, es decir, se presenta una desactivación del catalizador, lo cual hace que esta técnica sea poco viable a nivel industrial. Finalmente, el análisis de las muestras de cera (espectrometría de masas y espectroscopía) evidencia la presencia de polietileno en las ceras, estas son utilizadas para la producción de caucho, cables, pegamentos calientes o incluso puede ser usada como materia prima para la producción de un nuevo PVC (Evricom, 2020).

Adeniyi et al. (2022) realizaron un estudio el cual se centró en la producción y caracterización de biochar mediante la co-carbonización de películas de etiquetas de PVC utilizando hojas de *Terminalia ivorensis* (TIL). Su principal objetivo fue investigar el efecto de la impregnación del PVC en las propiedades de biochar resultante y compararlo con el biochar producido únicamente a partir de las hojas de TIL. El estudio demuestra que el proceso de impregnación fue exitoso dado que se presentó un aumento en la concentración de cloro y carbono en el biochar TIL-PVC, adicionalmente su rendimiento fue mayor (45.60%) comparado con el de biochar de TIL. En cuanto a las propiedades, se conoció que la impregnación de películas de PVC redujo las propiedades de superficie y porosidad de biochar. Los análisis termogravimétricos exhibieron una mayor estabilidad térmica para el TIL-PVC lo cual sugiere que es un material adecuado para ser usado en la producción de compuestos conductores y un adsorbente para capturar algunos contaminantes. En cuanto a los beneficios ambientales, el estudio demuestra el potencial que hay al momento de utilizar los residuos de PVC como materia prima para la producción de biochar, por lo cual, mediante esta investigación se demuestra que es posible adoptar un enfoque sostenible para reciclar residuos de PVC y convertirlos en materiales valiosos con diversas aplicaciones.

Cho et al. (2015) presentaron un estudio en el cual realiza la gasificación de residuos plásticos, los cuales tienen un porcentaje de PVC. El principal producto de este proceso consiste en un gas productor rico en hidrógeno, el cual se caracteriza por tener bajos contenidos de alquitrán y HCl, producto de un proceso de gasificación. Una de las principales características de esta investigación está relacionada con el uso de aditivos a base de calcio (Ca), los cuales lograron una disminución del contenido de alquitrán y de dióxido de carbono en el gas productor, pero provocaron un aumento en el contenido de hidrógeno y monóxido de carbono. Por otro lado, también se utiliza carbón activado, el cual funciona como adsorbente, capturando las moléculas de alquitrán que se escapan del



reactor lo cual garantiza un proceso más sostenible en términos ambientales. Cabe aclarar que con el tiempo el carbón activado se puede saturar, lo cual representa una desventaja para este proceso. El gas obtenido presentó un poder calorífico elevado superior a los 6.4 Mj/Nm^3 . Lo anterior sugiere que este gas es capaz de liberar una gran cantidad de energía térmica cuando se quema o se somete a alguna reacción de combustión, dado lo anterior puede ser usada como fuente de energía.

Hong et al. (2022) realizaron una investigación en la cual utilizan simulaciones de dinámica molecular reactiva para determinar cómo se comporta la co-pirolisis de PVC con carbón. Se encontró que este proceso tuvo impactos en la producción de gas inorgánico, gas orgánico y alquitrán. En cuanto al gas orgánico, se conoce que el carbón fomenta la liberación de HCl durante la co-pirolisis debido a que este proporciona un hidrógeno adicional para los radicales del cloro. Mientras que el PVC no influyó en la producción de gases inorgánicos durante la pirolisis del carbón. En cuanto a los gases orgánicos, los resultados permiten entender que durante la co-pirolisis el PVC se ve involucrado en la generación de dióxido de carbono y monóxido de carbono; adicionalmente, este tuvo un efecto positivo para la producción de etileno. En cuanto a la pirolisis del carbón se conoció que se obtuvieron gases como hidrogeno, formaldehído, acetileno y etileno. Finalmente, en cuanto a la obtención alquitrán, se determinó que el PVC tiene poco efecto en cuanto a este rendimiento, mientras que el sí carbón promueve la generación de alquitranes en la pirolisis de PVC a bajas temperaturas y también se generan reacciones secundarias de los alquitranes a altas temperaturas durante la co-pirolisis.

Miandad et al. (2016) presentaron un documento en el cual afirman que la pirolisis catalítica presenta ventajas medioambientalmente favorables con respecto a la pirolisis convencional ya que este proceso produce aceite líquido de mayor calidad debido a que convierte los heteroátomos en fase gaseosa, adicionalmente, requiere menor temperatura y tiempo de retención. Mediante los resultados es posible afirmar que los catalizadores también son capaces de disminuir la concentración de halógenos en el aceite líquido de la pirolisis. Se conoce que algunos factores que el proceso son, la temperatura, el tiempo de reacción, la composición de la materia prima y el uso del catalizador. Durante la investigación se comprueba que los catalizadores son un medio para mejorar la calidad del producto y el rendimiento general del proceso de pirolisis. Algunos catalizadores que han demostrado tener efectividad son: ZSM-5, HZSM-5, FCC, zeolita natural, alúmina activada y lodo rojo. Es importante considerar que durante esta técnica se pueden producir algunos gases tales como el CO , CO_2 , H_2 y CH_4 . Finalmente, se establece que los catalizadores también aumentan la concentración de hidrogeno y la isomerización de la estructura de carbono, lo cual deriva en un aumento de la concentración de i-butano en los gases producidos.



6.1.3 Despolimerización química

Al igual que los otros tipos de despolimerización, en la despolimerización química se descompone la cadena del polímero hasta sus monómeros. La diferencia de esta técnica con respecto a las otras ya mencionadas previamente es que la despolimerización química se realiza a partir de agentes hidrolíticos. Esta se basa en el principio de que los compuestos químicos contienen átomos de hidrógeno dispuestos para reaccionar con los grupos polares en las cadenas del polímero (Polímeros, 2016). Usualmente, la reacción que se lleva a cabo es conocida como una hidrólisis, ya sea ácida o básica, esta se suele dar gracias a la disposición de los enlaces en la amida, éster o uretano (Polímeros, 2016). Además de la hidrólisis, es importante destacar que en esta sección también se espera abordar investigaciones relacionadas con la modificación química del PVC, esta técnica se refiere al uso de grupos funcionales capaces de desplazar las moléculas del cloro y minimizar el uso de aditivos nocivos para el medio ambiente (Gama et al., 2019).

Consultando en la bibliografía es evidente que este tipo de técnicas de reciclaje químico del PVC son comúnmente utilizadas cuando el material se encuentra combinado con otro tipo de plásticos, usualmente es el PET. Si bien es cierto que existen otros tipos de técnicas que abarcan el reciclaje de plásticos compuestos, esta, en especial, es una de las más efectivas (Kumagai et al., 2018). Dado lo anterior, en este capítulo se incluirán investigaciones relacionadas con el tratamiento químico de residuos plásticos que contienen PVC y otro tipo de polímeros. Cabe aclarar que es común encontrar desechos de plásticos compuestos, por lo cual abordar este tipo de prácticas de reciclaje se hace fundamental (Osswald et al., 2013). En este tipo de casos la metodología a seleccionar deberá depender del contenido del PVC en el desecho de plástico compuesto. A continuación, en este capítulo, se presentarán algunas investigaciones relacionadas con las técnicas y las problemáticas anteriormente descritas. En la Tabla 4, se expondrán los principales estudios, los cuales utilizan la despolimerización química como metodología de reciclaje del PVC.



Tabla 5. Resultados de estudios de despolimerización química para el reciclaje químico del PVC.

Referencia.	Origen del PVC.	Descripción de la técnica.	Condiciones de operación.	Resultados.	Posibles usos del PVC después del reciclaje.
<p>(J. Lu et al., 2013)</p> <p>Study on the Pressurized Hydrolysis Dechlorination of PVC.</p> <p>ACSPublications.</p> <p>Energy & Fuels.</p>	Residuos de PVC.	Técnica usada: Hidrólisis presurizada	<p>Temperatura: Entre 127°C y 327°C.</p> <p>Tiempo de reacción: Entre 0.5 y 4 horas.</p> <p>Presión: 3.0 Mpa.</p>	Aproximadamente el 95% del cloro del PVC se puede eliminar mediante el proceso de hidrólisis a una temperatura de 240°C. Con el aumento de temperatura aumenta el rendimiento de HCl al igual que el aumento de del residuo.	Se logra deshidroclorar la molécula del PVC. Se concluye que la hidrólisis del PVC presenta ventajas sobre las técnicas de reciclaje térmico debido a que requiere de menos temperatura.
<p>(Kumagai et al., 2018)</p> <p>Alkaline hydrolysis of PVC-coated PET fibers for simultaneous recycling of PET and PVC.</p> <p>Springer Link.</p> <p>Material Cycles and Waste Management.</p>	Polietileno recubierto de PVC.	Técnica usada: Hidrólisis alcalina.	<p>Temperatura: Entre 120°C y 180°C.</p>	Los tejidos fueron recubiertos con NaOH, hidrolizando las fibras de PET en tereftalato de sodio soluble en agua, lo cual permitió que PVC fuera eliminado por filtración. A la temperatura de 120°C se presenta una tasa de dechloración del 1%	Se obtienen las moléculas PVC y PET por separado. La dechloración del PVC es mínima en este caso.



<p>(Choudhury et al., 2023)</p> <p>Mechanochemical degradation of Poly(vinyl chloride) into Nontoxic Water-Soluble Products via sequential dichlorination, Heterolytic Oxirane Ring-Opening, and Hydrolysis.</p> <p>CLARIVATE.</p> <p>Advanced Materials.</p>	Residuos de PVC.	<p>Técnica usada:</p> <p>Degradación mecanoquímica e hidrólisis.</p>	<p>Temperatura:</p> <p>230°C y 900°C.</p> <p>Entre</p>	<p>El proceso de degradación y epoxidación mecanoquímica es una alternativa de reciclaje exitosa sin necesidad de uso de disolventes. Se logra la apertura del anillo de oxirano heterolítico inducida por la fuerza que permite degradar el PVC en fragmentos pequeños. Se produce HY-PVC el cual es soluble en agua.</p>	<p>PVC degradado en productos solubles en agua no tóxicos. Se produce HY-PVC. Materiales de embalaje, Dispositivos biomédicos.</p>
<p>(Jia, Hu, et al., 2017)</p> <p>Self-Plasticization of PVC material via chemical codification of Manninch Base Cardanol Butyl Ether.</p> <p>ACS Sustainable Chemistry & Engineering.</p>	Residuos de PVC.	<p>Técnica usada:</p> <p>Modificación química del PVC.</p>	<p>Temperatura:</p> <p>90°C y 120°C.</p> <p>Entre</p>	<p>Se plastifica nuevamente, el PVC mediante el desplazamiento del cloro con base de cardanol butil éster. Se evita el uso de otros plastificantes que puede hacer más complejo el reciclaje del mismo a futuro.</p>	<p>El PVC reciclado y autoplastificado puede tener una aplicación en envases de alimentos, juguetes y dispositivos médicos.</p>



<p>(L. Lu et al., 2019)</p> <p>Degradation of PVC waste into a flexible polymer by chemical modification using DINP moieties</p> <p>Royal Society of Chemistry.</p>	<p>Residuos de PVC.</p>	<p>Técnica usada: Modificación química del PVC.</p>	<p>Temperatura: Entre 40°C y 110°C.</p> <p>Tiempo de calentamiento: 3 horas.</p>	<p>Algunos átomos de Cl fueron sustituidos con ftalato de diisononilo en presencia de carbonato de potasio y DINP. La tasa de sustitución máxima fue del 35.7%, la eliminación de HCl fue de 4.4%.</p>	<p>La estabilidad térmica del PVC puro y reciclado es similar a la del PVC convencional lo cual sugiere que sus aplicaciones pueden ser similares.</p>
<p>(Thanh Truc & Lee, 2019)</p> <p>Sustainable Hydrophilization to separate hazardous chlorine PVC from plastic wastes using H₂O₂ / ultrasonic irrigation.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Waste Management.</p>	<p>Mezclas de residuos plásticos que contienen PVC (plásticos con alto contenido de PVC, superior a 5% wt).</p>	<p>Técnica usada: Separación selectiva con irrigación ultrasónica</p>	<p>Concentración de H₂O₂: 3%</p> <p>Tiempo de riego ultrasónico: 30 minutos.</p>	<p>La solución de H₂O₂ junto con la técnica de irrigación ultrasónica permitió separar el PVC, el cual se asentó en el fondo del reactor de flotación. El resto de los desechos flotaban fácilmente debido a que mantenían su hidrofobicidad. Se obtuvo un 100% de pureza del PVC.</p>	<p>PVC puro y disponible para volver a usado en aplicaciones convencionales.</p>



A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los estudios, así como las consideraciones clave:

J. Lu et al. (2013) presentan un estudio en el cual aplican la técnica de reciclaje químico del PVC llamada hidrólisis presurizada. En este método, el PVC se trata en una solución alcalina, es decir, una solución con baja concentración de hidróxido de sodio. Algunas de las variables más importantes de este procedimiento son las elevadas temperaturas y presión, lo anterior es importante debido a que estos factores son fundamentales para llevar a cabo la reacción. El objetivo de este proceso es declorar el PVC en la solución alcalina. Los investigadores informan que el 95% del cloro es eficientemente removido después de 2 horas a una temperatura de 240°C. Por otro lado, este informe es realmente importante debido a que presenta una comparación entre la descomposición térmica y la hidrólisis presurizada. Lo anterior debido a que en el proceso de hidrólisis presenta una mayor eficiencia, ya que se demuestra que el rendimiento de HCl aumenta y el rendimiento del residuo disminuye al aumentar la temperatura. A diferencia la descomposición térmica, en este proceso no se producen compuestos cloro-orgánicos por lo cual la técnica ayuda a prevenir subproductos indeseables. Es importante mencionar que, los análisis de espectroscopia de masas demostraron que el contenido de carbón y oxígeno incrementan mientras el contenido de cloro disminuye, lo anterior se logra a medida que aumenta la temperatura de reacción. Finalmente, al medir el valor calorífico del material reciclado se demuestra que tiene un alto potencial para uso como combustible o materia prima de alta calidad para otros procesos.

Kumagai et al. (2018) mencionan una estrategia de reciclaje químico del PVC, cuando se encuentra mezclado con PET (una de las mezclas de plásticos más comunes). Estos investigadores desarrollan la técnica de hidrólisis alcalina, en el cual el material es tratado con una solución de hidróxido de sodio, este químico es el encargado de hidrolizar las fibras de PET y las descompone en tereftalato de sodio soluble en agua; mientras que el PVC se puede separar de la solución por medio de la filtración. Este tipo de proceso permite la recuperación simultánea tanto de PVC como PET. Como ya se mencionó, las fibras de PET se hidrolizan completamente a temperaturas entre 120°C y 180°C produciendo ácido tereftálico. En cuanto al PVC, se conoce que se declora durante el proceso, con una tasa mínima de decloración del 1% a la temperatura de 120°C. Esta metodología permite eliminar la necesidad de utilizar disolventes orgánicos, los cuales pueden llegar a plantear algunos desafíos medioambientales. Es importante recordar que este tipo de mezclas de plásticos representan diversos retos a la hora de llevar a cabo técnicas de reciclaje lo anterior debido a diversos factores tales como:

- Los dos materiales tienen densidades similares, lo cual dificulta su efectiva separación física por flotación.



- Para este tipo de mezclas, la técnica de pirólisis no es viable debido a que, a problemas como la corrosión, la obstrucción de los equipos utilizados y la producción de compuestos orgánicos clorados indeseables.
- Los métodos de reciclaje del PVC en altas temperaturas requieren un pretratamiento de deoloración.
- La separación de PET y PVC utilizando disolventes orgánicos, como los procesos de Vinyloop y Taxyloop mencionados previamente, requieren grandes volúmenes de disolventes, por lo cual representa desafíos en el tratamiento de los disolventes orgánicos.
- Por su parte, la hidrólisis alcalina de PET utilizando una solución de NaOH para el reciclaje de estos dos plásticos no deolora el PVC de manera eficiente, por lo cual la eficiencia del reciclaje de la resina del PVC se ve afectada.
- La cantidad de plastificante necesaria en el PVC depende de la reutilización deseada, de ser necesario la escasez de plastificante se puede corregir si el PVC recuperado está disponible directamente para otro producto.

Finalmente, los autores destacan que una vez que el material es separado, el PVC se encuentra en estado sólido, por lo cual puede llegar a ser fácilmente filtrado y recuperado, por lo cual puede procesarse para su reutilización u otras aplicaciones debido a que sus propiedades son similares a las del material virgen.

Choudhury et al. (2023) se encargaron de analizar la degradación mecanoquímica del PVC en productos solubles en agua y que sean biocompatibles, la técnica propuesta plantea una modificación química de la molécula del polímero. Estos investigadores se encargaron de introducir mecanóforos de oxirano en la cadena principal del PVC, los cuales sufren una reacción de apertura de anillo inducida por una fuerza para generar acetales. Posteriormente, se realiza un proceso de hidrólisis a dichos acetales, la cual causa que la cadena del PVC se rompa en diversos fragmentos de bajo peso molecular, los cuales son solubles en agua y además son productos de baja toxicidad. Los investigadores plantean algunas posibles aplicaciones de los productos obtenidos, entre las cuales destacan:

- Creación de materiales biodegradables, al ser solubles en agua pueden ser utilizados como materia prima para la producción de polímeros más amigables con el medio ambiente. Este tipo de productos se podrían abrir paso en la industria de embalaje, películas agrícolas y dispositivos biomédicos.
- Los productos solubles en agua son altamente llamativos para la industria de tratamiento de agua, ya que pueden actuar como floculantes o coagulantes para llevar a cabo los procesos de sedimentación y filtración.



- Es posible que sean utilizados como componentes básicos para síntesis de diversos productos químicos y compuestos. Es posible que sean precursores para la producción de productos farmacéuticos o tensioactivos.
- Los productos solubles en agua pueden utilizarse en procesos relacionados con la remediación ambiental, estos pueden ser útiles para eliminar PVC y sus derivados de sitios contaminados. Lo anterior previene la liberación de sustancias tóxicas al ambiente.

En general, los autores establecen que los productos solubles en agua y biocompatibles obtenidos a partir de la degradación mecanoquímica del PVC pueden ser utilizados en diversas industrias, por lo cual ayuda a fomentar un enfoque sostenible y medioambientalmente amigable. Lo anterior permite que la producción del PVC tenga un enfoque de economía circular.

Jia et al. (2017) discuten e investigan la técnica de modificación química de materiales elaborados a partir de PVC utilizando un plastificante interno a base de cardanol. La relevancia de este documento radica en que es una de las primeras investigaciones en las cuales se logra con éxito este tipo de auto plastificación. Cabe aclarar que uno de los principales propósitos de utilizar cardanol es mejorar la flexibilidad y las propiedades mecánicas del polímero puro. El cardanol, puede actuar como plastificante, ya que reduce la temperatura de transición vítrea del PVC y por ende permite que este material aumente la flexibilidad. Por otra parte, los investigadores logran demostrar que se mejora la resistencia al impacto y la estabilidad térmica del material. Este tipo de plastificantes a base de cardanol se consideran más ecológicos y sostenibles en comparación con los plastificantes tradicionales, comúnmente fabricados a base de ftalato, un químico altamente tóxico. Los autores mencionan que esta técnica es una estrategia para modificar materiales fabricados a partir del polímero en cuestión. Al finalizar, el material reciclado tiene características mecánicas diferentes a las del polímero original; sin embargo, está elaborado a partir de materiales poco nocivos para el medio ambiente.

L. Lu et al. (2019) realizaron una investigación en la cual emplearon una técnica de modificación química para el reciclaje del PVC. Para lograrlo, los investigadores sustituyeron los átomos de cloro de la molécula con reactivos nucleofílicos, como el tiofenol o los grupos de cadenas largas de carbono. Para llevar a cabo la reacción se requiere la presencia de una base inorgánica K_2CO_3 y una base orgánica (DIEA). Los investigadores encontraron que la relación de sustitución máxima alcanza hasta el 35.7% cuando se utilizó tiofenol como nucleófilo. La técnica implementada demuestra que es posible implementar la conversión de residuos de PVC en productos de valor añadido con plasticidad mejorada, por lo cual se obtienen materiales adecuados para el reciclaje de las materias primas. Cabe aclarar que, al finalizar los análisis de las propiedades del material, se encontró que la estabilidad térmica del PVC modificado era comparable con la del PVC puro. Aunque los autores señalan algunas aplicaciones para el PVC reciclado, señalan



que las aplicaciones específicas del PVC reciclado pueden variar dependiendo de la calidad y las propiedades del material. Algunas de las aplicaciones sugeridas basadas en los resultados obtenidos en el estudio son: fabricación de tuberías, materiales de construcción (ej. Marcos de ventanas), aislamiento de cables, materiales de embalaje, industria automotriz, materiales médicos, juguetes, mangueras y estructuras inflables.

Thanh Truc & Lee. (2019) plantearon una metodología de reciclaje químico para separar selectivamente el PVC de los desechos plásticos. Lo anterior es posible gracias al uso de una solución de peróxido de hidrógeno e irrigación ultrasónica al 3%. Uno de los principales objetivos de llevar a cabo esta práctica es mejorar la hidrofobicidad de la superficie del polímero de interés, ya que de esta forma se facilita la separación de los otros residuos plásticos. Otro de los resultados más importantes, es que se determinó que el tratamiento incorporado reduce las burbujas de aire en la superficie del PVC, lo cual hace que se mejore su humectabilidad. Lo anterior se logra debido a que la energía ultrasónica generada durante el tratamiento fomenta la formación de radicales hidroxilos, los cuales reaccionan con la superficie del PVC, provocando la oxidación y la deshidrocloración de los grupos de carbono. Al finalizar, los espectros infrarrojos indican la presencia de grupos funcionales hidrófilos. Los autores logran un desarrollo selectivo de la hidrofobicidad en la superficie del PVC lo cual facilita su separación de la mezcla de residuos plásticos. Finalmente, uno de los aspectos más importantes mostrados en este estudio es el papel de la irrigación ultrasónica en la separación del PVC, la cual permite disminuir las burbujas de aire que se encuentran sobre la superficie del material al aumentar su humectabilidad. La metodología antes descrita es realmente relevante al momento de considerar el reciclaje de mezclas de desechos plásticos, lo anterior debido a que en estos casos se presentan retos significativos debido a que suelen tener superficie hidrófoba similar, densidades similares.

6.1.4 Reciclaje enzimático

La técnica del reciclaje enzimático utilizada para el reciclaje del PVC se caracteriza por utilizar enzimas que se encargan de descomponer el polímero en sus componentes básicos, para permitir que sean reutilizados en nuevas aplicaciones. La degradación microbiológica del PVC abre las puertas a un mundo altamente atractivo en términos de metodologías ambientalmente amigables, además de económicamente viables. Cabe aclarar que a pesar de todas las ventajas que pueda llegar a incluir este tipo de prácticas, es pertinente mencionar que son extremadamente retadoras debido a que suelen ser difícil de comprender a nivel molecular cómo funcionan las cepas y las enzimas degradantes (Zhe et al., 2021). Lo anterior causa que existan una cantidad limitada de investigaciones centradas en esta área.



En definitiva, el tratamiento biológico y el reciclaje de desechos plásticos es uno de los enfoques más prometedores para el desarrollo futuro de una economía circular (Acosta, 2017). Sin embargo, el PVC se encuentra muy por detrás en esta área con respecto a otros tipos de plásticos como lo pueden ser los PE, PET y PS. Lo anterior es causado gracias a que el PVC no contiene un enlace éster que pueda hidrolizarse, y por ende su degradación es mucho más desafiante (Zhe et al., 2021).

A pesar de que este tipo de prácticas representan todo un reto gracias a las características moleculares del PVC, se conoce que se han presentado diversos estudios que proponen la biodegradación del PVC por medio de varios taxones de hongos tales como *Basidiomycotina*, *Deuteromycota* o *Ascomycota*, así como algunas bacterias tales como *Pseudomonas*, *Mycobacterium* o *Acinetobacter* (Khatoon et al., 2019). Generalmente, los resultados obtenidos demuestran cambios morfológicos o fisicoquímicos en la molécula, como daño superficial o disminución del peso molecular del material, lo que da a entender que con esta metodología se puede degradar plástica. Como se mencionó antes, hay pocos estudios relacionados con esta metodología de reciclaje, por lo que es una de las técnicas que requiere profundizar en la búsqueda de microorganismos y recursos enzimáticos.

Dado que esta metodología, varía en gran magnitud comparado con las anteriores prácticas mencionadas anteriormente. Se presenta el siguiente diagrama que esquematiza de manera general el mecanismo para la degradación biológica de los plásticos bajo condiciones aeróbicas:

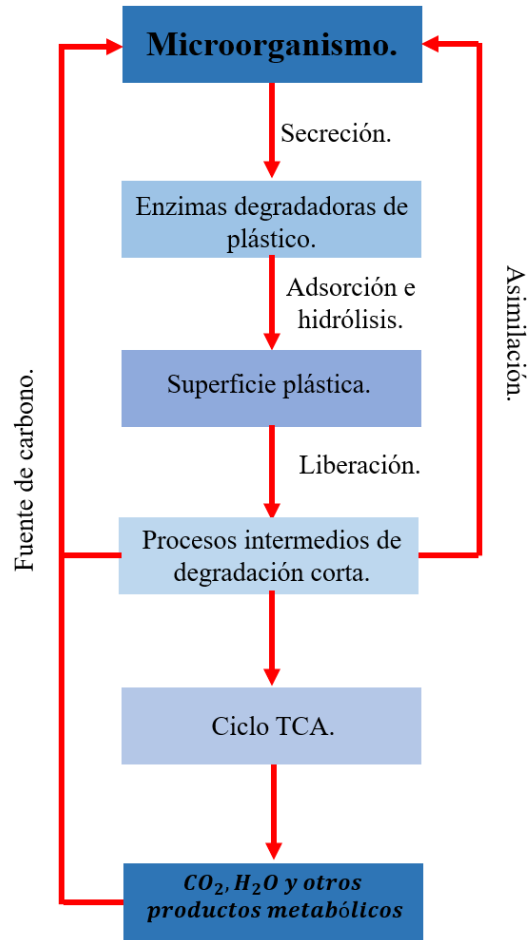


Ilustración 5. Esquema general del mecanismo de degradación microbiana de los plásticos bajo condiciones aerobias (Mohan et al., 2020).

Al igual que en la sección anterior, se presentará la Tabla 5, la cual expondrá los principales estudios, los cuales utilizan técnicas de reciclaje enzimático como metodología de reciclaje del PVC.



Tabla 6. Resultados de estudios relacionados con el reciclaje enzimático como una técnica de reciclaje químico del PVC.

Referencia.	Origen del PVC.	Descripción de la técnica.	Condiciones de operación.	Resultados.	Posibles usos del PVC después del reciclaje.
<p>(Y. Y. Qi et al., 2023)</p> <p>PVC dichlorination residues as new peroxidase-mimicking nanozyme and chemiluminescence sensing probe with high activity glucose and ascorbic acid detection.</p> <p>ELSERVIER.</p> <p>Waste Management.</p>	Residuos de PVC.	<p>Técnica usada: Decloración del PVC utilizando enzimas.</p>	<p>Condiciones de operación relacionadas con la colección de los residuos del proceso de decloración:</p> <p>Técnica: Utilizando agua como fluido supercrítico.</p> <p>Temperatura: reacción hidrotérmica a 200°C</p> <p>Tiempo de reacción: 1 hora.</p>	<p>La investigación evidencia la posibilidad del uso de residuos de la decloración de PVC como nanozima que imita la peroxidasa. La investigación cinética demostró que la reacción enzimática simulada de los residuos es mucho más fuerte que la de los nanocompuestos enzimáticos. Los resultados muestran que los residuos son un buen material colorimétrico y de detección de Cl.</p>	<p>Uso de los residuos de la decloración del PVC para la colorimetría visual y la detección de quimioluminiscencia.</p>



<p>(Zhe et al., 2021)</p> <p>Polyvinyl chloride degradation by intestinal <i>Klebsiella</i> of Pest larvae.</p> <p>CSH (Cold Spring Harbor Laboratory)</p> <p>BioRxiv.</p>	<p>Residuos de PVC.</p>	<p>Técnica usada: Degradación del PVC por bacterias intestinales en larvas de plagas.</p>	<p>Recolección de muestras: Se recolectaron en campos de maíz y fueron cultivadas en el laboratorio. Fueron alimentadas con películas de PVC.</p> <p>Preparación de la muestra: Se recolectaron fragmentos de PVC, de las muestras intestinales y fecales de las larvas.</p> <p>Análisis de la degradación del PVC: Se evalúa la pérdida de peso de la película de PVC.</p>	<p>La investigación demuestra que las larvas (<i>Spodoptera frugiperda</i>) tienen la capacidad de degradar el PVC. Las larvas sufrieron cambios intestinales significativos, sin embargo, no provocó su muerte.</p>	<p>Se logra degradar el PVC utilizando larvas.</p>
<p>(Mohan et al., 2020)</p> <p>Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics.</p> <p>Frontiers in Microbiology.</p>	<p>Residuos de PVC.</p>	<p>Técnica usada: Degradación del PVC utilizando microorganismos.</p>	<p>Las condiciones del microorganismo, en general son:</p> <p>Temperatura: entre 20°C y 30°C.</p> <p>Condiciones in vitro: de 15 a 180 días.</p>	<p>Se reporta que algunos microorganismos tales como <i>Trichocladium sp.</i>, <i>Chaetomium sp.</i>, <i>Pseudomonas cintronellolis</i> y <i>Bacillus flexus</i>, son capaces de degradar el PVC</p>	<p>Se logra degradar el PVC utilizando microorganismos tales como bacterias y hongos.</p>



<p>(RaziyaFathima et al., 2016)</p> <p>Microbial degradation of plastic waste: A Review</p> <p>Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences.</p>	<p>Residuos de PVC.</p>	<p>Técnica usada: Degradación del PVC utilizando microorganismos.</p>	<p>En el documento no se explican datos importantes relacionados con las condiciones de operación, debido a que se tratada de una revisión de varios documentos solo se presentan los principales resultados obtenidos.</p>	<p>El artículo permite evidenciar que la eficiencia de degradación depende del microorganismo utilizado. Usualmente se encuentran eficiencias que oscilan entre el 10% y el 40%. Por otro lado, este porcentaje también se encuentra relacionado con el origen de los microorganismos.</p>	<p>Se logra degradar el PVC utilizando microorganismos tales como bacterias y hongos.</p>
--	-------------------------	---	---	--	---



A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los estudios, así como las consideraciones clave:

Qi et al. (2023) consideran en su estudio el uso de los desechos producto de la decloración del PVC como suplentes a algunas enzimas tales como la peroxidasa, la cual es una nanoenzima que es utilizada en procesos de colorimetría visual y la detección de quimioluminiscencia. Si bien es cierto que en esta investigación los autores no utilizan alguna metodológica biológica o enzimática para reciclar el PVC, se considera importante exponer esta investigación en esta sección debido a que la metodología expuesta puede ser utilizada como una segunda parte de técnicas de reciclaje previamente mencionadas. Adicionalmente, este estudio presenta una metodología innovadora para encontrar aplicaciones realmente útiles de los desechos generados al completar otras técnicas de reciclaje del PVC. Ahora bien, resaltando lo que los investigadores proponen, se menciona que el uso de residuos de decloración del PVC como nanozima que imita la peroxidasa tiene varias ventajas, a continuación, son presentadas:

- Los residuos de la decloración del PVC demostraron tener una excelente actividad imitadora de la peroxidasa, por lo cual lograron catalizar la oxidación del sustrato enzimático. La investigación cinética de la reacción enzimática confirmó que la actividad enzimática simulada de los residuos era más fuerte que la del nanocompuesto sintetizado.
- La actividad de los residuos para la detección simulada de enzimas y Cl aún podría alcanzar el 66.3% y el 85.6% respectivamente, estos resultados se obtienen después de tres procesos de reciclaje. Lo anterior demuestra que el proceso de reciclaje es exitoso y viable.
- El uso de los residuos de la decloración presenta una alternativa ecológica y eficiente para la detección de glucosa y ácido ascórbico. Además de ayudar a mejorar la eficiencia de los procesos de reciclaje del PVC.

Zhe et al. (2021) proponen en su estudio diversos hallazgos bastante valiosos. Esta investigación es una de las pocas las cuales se centran exclusivamente en el reciclaje enzimático del PVC y además proponen varios hallazgos interesantes. A continuación, se presentan algunas de las conclusiones más relevantes obtenidas en este estudio:

- Se demuestra que las larvas de la plaga de insectos invasores agrícolas, *Spodoptera Frugiperda*, pueden sobrevivir eficazmente alimentándose exclusivamente de películas de PVC, lo cual demuestra que tienen la capacidad para degradar el polímero.
- La alimentación de las larvas con las biopelículas de PVC causó que estas sufrieran cambios significativos en la microbiota intestinal de las larvas. Principalmente, se presentó un enriquecimiento selectivo de algunas bacterias



tales como *Enterococcus*, *Ochrobactum*, *Falsochrobactum*, *Microbacterium*, *Sphingobacterium* y *Klebsiella*. Se sugiere evaluar las aplicaciones de este tipo de microorganismo con el objetivo de establecer una mayor productividad de este tipo de procedimientos.

- Durante la investigación se determinó que la bacteria *Klebsiella* obtenido del intestino larvario, es capaz de degradar efectivamente y utiliza el PVC como única fuente de energía.
- A partir de lo anterior, el estudio propuso una vía de biodegradación para el PVC basada en los genes funcionales, las enzimas y las vías metabólicas identificadas, que implican la decloración, despolimerización y mayor degradación a la reportada.

Mohan et al. (2020) realizan una revisión bibliográfica de las investigaciones relacionadas con la degradación microbiológica de diversos plásticos, en los cuales está incluido el PVC. En ella afirman que las investigaciones reportan que algunos microorganismos tales como *Trichocladium sp.*, *Chaetomium sp.*, *Pseudomonas cintronellolis* y *Bacillus flexus*, son capaces de biodegradar el PVC. Se informa que los microorganismos anteriormente mencionados tienen la habilidad de degradar los aditivos del PVC y, por lo tanto, logran disminuir el peso molecular del polímero, lo cual indica una degradación de la cadena principal del mismo. Ahora bien, para el caso del PVC de bajo peso molecular se conoce que puede ser degradado por hongos de pudrición blanca en Basidiomycotina, si este es sometido a condiciones limitantes de nutrientes tales como nitrógeno, carbono y azufre. Por lo cual este hongo tiene la capacidad de degradar los organocontaminantes en dióxido de carbono. Además, se ha demostrado que los plastificantes del PVC pueden contribuir como nutrientes para el crecimiento de los hongos. En cuanto a las *Pseudomonas cintronellolis* y *Bacillus flexus* logran degradar la película del PVC, debido a que desarrollan una alta actividad despolimerizante hacia los aditivos del PVC. Estas cepas forman una biopelícula en la superficie del plástico y causan una disminución en el peso molecular. Las disminuciones en el peso molecular pueden estar relacionadas con la acción de las enzimas exocelulares, lo que provoca la hidrólisis de los polímeros en las cadenas principales.

Raziyafathima et al. (2016). Se encargaron de hacer una revisión relacionada con la degradación de microbiológica de plásticos. La importancia de esta investigación radica en que además de mencionar algunos microorganismos capaces de degradar el PVC, establece que la eficiencia de degradación está relacionada con el microorganismo utilizado y su procedencia, por ejemplo, los microorganismos con mayor capacidad de degradación usualmente se extraen de la tierra de los jardines o de los basureros lo cual es algo conveniente cuando los residuos plásticos llegan a los sitios de disposición final. Para este tipo de prácticas la eficiencia de degradación oscila en promedio entre el 10%



y el 40%. Finalmente, se mencionan algunas de las debilidades de este tipo de prácticas, entre ellas se encuentran la disponibilidad del microorganismo de degradación, el tiempo para degradar completamente las piezas de desechos y la escalabilidad del proceso a nivel industrial ya que este tipo de prácticas suelen ser llevadas a cabo a escala laboratorio por lo cual la aplicabilidad puede llegar a ser compleja. Finalmente, es importante mencionar que se establece que uno de los microorganismos más efectivos para este tratamiento es *Aspergillus niger*.

7. VIABILIDAD ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL

7.1.1 Viabilidad medioambiental

Como ya se demostró en el capítulo anterior, el reciclaje químico del PVC representa una técnica alternativa a las de reciclaje tradicionales, como lo puede ser el reciclaje mecánico. Este tipo de prácticas permiten reducir la cantidad de residuos que terminan impactando en el medio ambiente. En el capítulo anterior se abordaron una gran cantidad de técnicas de reciclaje químico del PVC, sus procesos, así como los resultados obtenidos a partir de cada una de ellas. Muchas de las investigaciones presentadas afirman que los tratamientos químicos aplicados son altamente efectivos al momento de tratar dicho polímero. Sin embargo, en algunos casos estos procedimientos pueden llegar a ser medioambientalmente inviables debido a diversos factores, ya sea por el gran gasto energético o por los subproductos generados en el proceso. Dado lo anterior es importante evaluar la viabilidad medioambiental de cada una de las técnicas expuestas anteriormente, ya que esto permitirá determinar si es posible llevar a cabo la implementación de este tipo de procesos a gran escala. En este capítulo, se espera exponer los impactos ambientales asociados a este tipo de prácticas para lograrlo, se considerarán factores como la eficiencia energética, la emisión de gases tóxicos o de efecto invernadero y la generación de residuos durante el procedimiento. Lo anterior permitirá determinar si realmente son una solución sostenible para el manejo de residuos del PVC.

Para empezar, se presenta la tabla 6 la cual las aplicaciones, ventajas y desventajas de los principales tratamientos químicos abordados en la parte superior de este documento.



Tabla 7. Técnicas de reciclaje químico del PVC, con sus respectivas formas de reciclaje, ventajas, desventajas e investigaciones que reportan aspectos medioambientales de cada una de ellas (L. Lu et al., 2023).

Técnica de reciclaje químico del PVC.	Metodología de reciclaje.	Ventajas.	Desventajas.	Bibliografía.
Glucólisis.	Degradación.	<p>Proceso de despolimerización altamente eficiente (90%-95%).</p> <p>Permite separar otros componentes del PVC.</p> <p>Degradación mínima por lo cual se conservan las propiedades del material y puede ser reutilizado.</p> <p>Ayuda a promover la economía circular.</p>	<p>El proceso requiere una cantidad significativa de energía.</p> <p>Se requiere de catalizadores los cuales son difíciles de recuperar al igual que los reactivos. Por lo cual se generan desechos químicos al ambiente,</p>	<p>(Calosi et al., 2022)</p> <p>(Shirazimoghaddam et al., 2023)</p> <p>(Lalmangaihzuala et al., 2020)</p>
Líquidos iónicos.	Degradación y deoloración.	<p>Comparado con los tratamientos térmicos, reduce la emisión de gases de efecto invernadero (se disminuye la emisión de cloro).</p> <p>Mantiene las propiedades del PVC, por lo cual permite reducir la producción de materiales vírgenes.</p>	<p>Se requiere altos requerimientos energéticos para el calentamiento.</p> <p>Altas pérdidas de los solventes (líquidos iónicos).</p> <p>Generación y liberación de subproductos tales como HCl.</p>	<p>(Tomatis et al., 2023)</p> <p>(Glas et al., 2014)</p>



		Proceso flexible, es decir se puede adaptar a varios tipos de materiales compuestos.		
Soluciones con NaOH / solventes	Degradación y decoloración.	Se puede conseguir porcentajes altos de decoloración del PVC. Residuos de alcoholes polivinílicos.	Se requiere altos consumos de energía.	(J. Q. Lu et al., 2019) (J. Lu et al., 2020)
Fluidos supercríticos y fluidos subcríticos	Degradación y decoloración.	Se puede conseguir porcentajes altos de decoloración del PVC. Residuos de alcoholes polivinílicos. Se obtienen pequeñas moléculas. Se logra recuperar algunos aditivos como los plastificantes.	Se requiere altos consumos de energía.	(L. Lu et al., 2020) (Y. Qi, He, Xiu, et al., 2018) (Y. Qi, He, Li, et al., 2018)
Pirólisis y co-pirólisis.	Degradación.	Se logra transformar el residuo en pequeñas moléculas. Es posible obtener materias primas para otros procedimientos. Se obtienen productos que pueden ser utilizados como combustibles.	Se requiere altos consumos de energía. Es posible que se presente producción de subproductos como el HCl, compuestos orgánicos clorados y compuestos de carbono. No son técnicas adecuadas para ser usado con residuos mezclados.	(Li et al., 2021) (Huang et al., 2018) (Yu et al., 2016)
Hidrogenación.	Degradación.	Es posible convertir los residuos en hidrocarburos saturados y estables. Por	Se requiere altos consumos de energía.	(Gala et al., 2021)



		otra parte, se logra obtener combustibles y materia prima.	Se produce una hidrogenación incompleta. Se producen algunos subproductos como el HCl, compuestos orgánicos clorados y bitumen.	(Stadler et al., 2019)
Gasificación.	Degradación.	Los residuos son transformados en gases de síntesis. Es posible implementar procesos de recuperación de energía.	Se requiere altos consumos de energía. Se producen algunos subproductos como el HCl, alquitrán y compuestos carbonizantes.	(Lopez et al., 2018) (Arena & Di Gregorio, 2014) (Pinto et al., 2016)
Degradación catalítica.	Degradación y dechloración.	Es posible que se acelere la dechloración y la degradación del PVC. Se disminuye el punto de ebullición (reducción de energía) además se reduce el contenido de cloro del aceite de pirólisis. Se fija el HCl. Se incrementa la formación de gases y petróleo.	Se requiere altos consumos de energía. Baja selectividad del producto. Se puede presentar una desactivación del catalizador.	(Zakharyan et al., 2020) (Nishibata et al., 2020) (Altarawneh et al., 2022)
Modificación química.	Dechloración parcial.	Bajo consumo de energético. Conversión de los residuos a polímeros de valor agregado.	Es necesario utilizar solventes orgánicos que pueden llegar a ser nocivos para el medio ambiente, como por ejemplo lo puede ser: ciclohexanona.	(Jia, Hu, et al., 2017) (Jia, Zhang, et al., 2017)



				(Jia et al., 2018)
Degradación microbiológica.	Degradación.	<p>Se logra descomponer el PVC en compuestos más simples, los cuales pueden ser utilizados como nutrientes de carbono.</p> <p>Disminución de la huella de carbono ya que no tiene un alto requerimiento energético.</p> <p>Es un proceso que ocurre de manera natural por lo cual es amigable con el medio ambiente.</p>	<p>Es un proceso que requiere una gran cantidad de tiempo y por ende en algunos casos no se completa la degradación.</p> <p>Depende de las condiciones medioambientales que en algunos casos suelen ser muy específicas.</p> <p>Los microorganismos capaces de degradar el PVC son muy específicos y limitados.</p> <p>Se pueden producir subproductos no deseados como ácidos orgánicos y gases.</p> <p>Es difícil llevar a cabo el este proceso a escala industrial.</p>	<p>(Ru et al., 2020)</p> <p>(Zeenat et al., 2021)</p> <p>(Webb et al., 2012)</p> <p>(Shilpa et al., 2022)</p>



De la tabla 6 es posible observar que un factor común entre las diversas técnicas expuestas a lo largo de este documento está relacionado con el alto gasto energético que cada una de ellas requiere. En la mayoría de los casos el consumo energético es un problema medioambiental debido a que en la actualidad la mayoría de la energía que se utiliza proviene de fuentes no renovables como lo son los combustibles fósiles, los cuales emiten gases efecto invernadero que terminan contribuyendo de manera significativa al cambio climático. De hecho, se conoce que el consumo de energía es la principal fuente de aumento del nivel de emisiones de carbono a nivel mundial (AIZgool et al., 2020). Derivado de lo anterior, la producción de energía a partir de estas fuentes también puede causar efectos negativos en diversos aspectos, como lo es la calidad del aire y del agua y, por ende, en la biodiversidad del planeta.

A pesar de lo mencionado anteriormente, un análisis elaborado por Closed Loop Patners demuestra que las emisiones de carbono del reciclaje químico oscilan entre un 22% y 45% menos que la producción de plásticos vírgenes (Partners, 2020). Por lo cual se puede considerar como tecnología prometedora, teniendo en cuenta que permitirá adquirir los materiales originales de la molécula, lo cual fomenta la recuperación de materiales vírgenes sin tener que recurrir a generar una producción excesiva de estos compuestos, es decir, se estaría promoviendo una economía circular. Ahora bien, un estudio de evaluación de ciclo de vida preparado por una empresa británica demostró que las técnicas de reciclaje químico tienen un impacto climático significativamente menor a la incineración de residuos (Quantis, 2020). Lo anterior demuestra que utilizar estas técnicas de reciclaje pueden ser una alternativa medioambientalmente viable con respecto a la constante producción de materiales vírgenes.

Retomando el informe de Closed Loop Patners es importante mencionar que en este se evaluó la viabilidad medioambiental de las técnicas de reciclaje químico del PVC con respecto la producción de materiales vírgenes. Los aspectos medioambientales tenidos en cuenta para este caso fueron el gasto total de energía, el potencial impacto en el cambio climático y el gasto de agua dentro de los procesos. En dicho informe se encontró que las mayores reducciones en las emisiones de energía, agua y gases de efecto invernadero se presenta cuando se requiere de una “ruta” más grande de regreso al polímero, por lo cual las técnicas que requieren diversas etapas dentro del proceso de reciclaje pueden ser altamente viables y ser escaladas a nivel industrial (Partners, 2020). Adicionalmente, el estudio comprueba que las tecnologías de purificación, despolimerización y conversión, en promedio requieren menos energía y emiten menos gases de efecto invernadero, en comparación con las cadenas de suministro de plásticos vírgenes (Partners, 2020). A continuación, se presentan los impactos ambientales de cada una de las técnicas evaluadas con respecto a la producción de los materiales vírgenes.



Tabla 8. Resumen de resultados de impacto ambiental: sistemas de reciclaje químico frente a sistema virgen, análisis al pellet de plástico (Partners, 2020).

	Energía total proveniente de recursos naturales.		Potencial de impacto climático (CO ₂).		Gasto de agua.	
	MJ/kg Pellet de plástico.	% de cambio Vs. producción de materiales vírgenes.	kg CO ₂ /kg Pellet de plástico.	% de cambio Vs. producción de materiales vírgenes.	kg CO ₂ /kg Pellet de plástico.	% de cambio Vs. producción de materiales vírgenes.
Purificación.	Promedio.	28.8 ↓59%	1.6 ↓20%		2.8 ↓43%	
	Rango.	22.0-35.6 ↓47% al ↓70%	1.2-2.0 ↑7% al ↓45%		2.0-3.6 ↓7% al ↓45%	
Despolimerización.	Promedio.	46.7 ↓38%	2.5 ↓12%		5.9 ↓17%	
	Rango.	18.0-68.1 ↓17% al ↓72%	1.1-3.5 0% al ↓36%		2.8-8.9 ↑4% al ↓34%	
Conversión.	Promedio.	35.8 ↓47%	2.8 ↓7%		5.0 ↑1%	
	Rango.	12.6-59.1 ↓14% al ↓80%	1.2-4.4 ↑22% al ↓26%		2.1-7.0 ↑23% al ↓38%	

De la tabla 7 es posible observar que se demuestra que las técnicas de reciclaje químico son altamente viables comparado con la alternativa de producción de materiales vírgenes. De dicha tabla es posible confirmar que las técnicas de reciclaje que llevan a cabo procesos de purificación son las que representan mayor viabilidad en cuanto a las medidas ambientales evaluadas. Ahora bien, en el informe adicionalmente, se establece que los ahorros de energía, agua y emisiones de carbono demostrados en la anterior tabla se pueden magnificar si se integran fuentes de energía renovable, por lo cual es una estrategia crítica para los operadores de plantas de reciclaje químico (Partners, 2020).

Por otra parte, es importante recalcar que otra de las preocupaciones medioambientales asociadas con las técnicas de reciclaje químico del PVC, está relacionada con las emisiones y subproductos que puedan generarse durante el proceso, tales como dioxinas, compuestos orgánicos volátiles y PCB. En este caso particular, la mayor preocupación se encuentra al momento de retirar el cloro de la molécula, pues en esta etapa es en la cual se pueden liberar compuestos clorados al medio ambiente. Este tipo de emisiones contribuye al deterioro de los ecosistemas y al cambio climático global. Por lo general, uno de los subproductos más comunes es el ácido clorhídrico, el cual es liberado usualmente en estado gaseoso a la atmósfera en donde se vuelve uno de los compuestos críticos debido a su participación en la formación de lluvia ácida (Australian Government, 2023). Ahora bien, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) señala que este tipo de prácticas son viables si junto con el proceso de reciclaje se instalan sistemas de limpieza de gases de combustión y plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales permitirían limitar las emisiones (Gribkoff, 2022). En el caso del PVC se hace



fundamental, implementar operaciones unitarias que permitan la condensación y posterior captación del ácido clorhídrico con el objetivo de que no sea liberado al medio ambiente y, por el contrario, pueda ser utilizado como químico en otras aplicaciones (Zakharyan et al., 2020). Finalmente, es importante mencionar que el Consejo de Química Estadounidense (ACC) junto con la consultoría Good Company realizaron un informe en el cual establecen que las plantas de reciclaje químico producen la misma cantidad de emisiones a las que puede producir un hospital o una planta de fabricación de alimentos (Gribkoff, 2022). Lo anterior demuestra que este tipo de prácticas no generan un daño mayor comparado con el de otras industrias.

Las técnicas de reciclaje que son llevadas a cabo utilizando solventes tienen una preocupación ambiental asociada con la toxicidad de los químicos que se requieren, además de que el reciclaje del PVC mediante determinados disolventes o procesos puede provocar la liberación de sustancias químicas nocivas y la generación de residuos (Glas et al., 2014). Dado lo anterior, al llevar a cabo este tipo de prácticas es de vital importancia evaluar la naturaleza del solvente que se esté utilizando. Estudios como los presentados por Sherwood (2020) y Grause et al. (2017) demuestran que es posible reciclar este polímero haciendo uso de diversos disolventes, los cuales no se encuentran asociados con implicaciones ambientales graves como, por ejemplo, el metil etil cetona el cual es un compuesto fácilmente biodegradable y no genera emisiones medioambientales considerables (MERCK, 2023). Dado lo anterior, la viabilidad ambiental al momento de utilizar técnicas que requieran solventes dependerá de la selección del químico, así como la implementación de tecnologías verdes que permitan separar los halógenos de la fracción de carbono en el PVC para reciclar la materia prima de una manera medioambientalmente responsable (Glas et al., 2014), así mismo fomentar la recuperación del solvente para que este pueda ser utilizado en diversos procesos de reciclaje.

Al momento de analizar la viabilidad medioambiental también es importante considerar no solo los impactos asociados con cada una de las técnicas, sino también con la naturaleza del polímero. El PVC suele contener plastificantes, los cuales tienen riesgos medioambientales asociados. El reciclaje del PVC resulta en la presencia continua de estos aditivos peligrosos en los materiales reciclados, por lo cual se pueden generar emisiones de contaminantes al aire y al agua (Brignon, 2021). Investigaciones que han estudiado el costo y los beneficios de reciclar PVC contaminado con plastificantes peligrosos han revelado que, si bien los impactos a corto plazo de los aditivos pueden dominar la balanza y potencialmente tener efectos negativos debido a la emisión de estos materiales al ambiente, el estudio encuentra que a largo plazo aumentar el reciclaje químico de estos materiales es positivo a pesar de la presencia de los aditivos peligrosos (Brignon, 2021). Lo anterior se establece debido a que presenta una mayor ventaja reciclar este tipo de materiales que realizar continuamente una producción de materiales vírgenes,



debido a que el reciclaje reduce la necesidad de recursos no renovables y evita el uso de los procesos que requiere de una cantidad mayor de energía para la producción continua de nuevos materiales. Finalmente es el modelo utilizado en el estudio de Brignon sugiere que a medida que se acumulan los beneficios ambientales recurrentes del reciclaje, eventualmente se compensan los impactos negativos del reciclaje de los aditivos (Brignon, 2021).

En las secciones anteriores de este documento se presentaron diversas técnicas de reciclaje químico del PVC. La viabilidad técnica y medioambiental de cada una de ellas depende de diversos factores tales como la naturaleza del residuo, la cantidad energética y la naturaleza de los reactivos requeridos. Sin duda alguna una de las prácticas más cuestionadas a nivel medioambiental son las de despolimerización térmica debido a los altos requerimientos energéticos y a la susceptibilidad de liberación de compuestos nocivos al medio ambiente. Sin embargo, la información anteriormente expuesta permite comprender que este tipo de prácticas son viables ambientalmente teniendo en cuenta algunas consideraciones. De hecho, es importante mencionar que se ha demostrado que algunas prácticas como la del reciclaje haciendo uso de líquidos iónicos representan un mayor impacto ambiental. Informes demuestran que los impactos del proceso que utiliza líquidos iónicos eran entre un 22% y un 819% mayores que a los de técnicas como la pirólisis (Tomatis et al., 2023). En general, las técnicas de reciclaje térmico han sido cuestionadas, sin embargo, es fundamental reconsiderarlas, como se demostró, en comparación con otras prácticas, las técnicas de reciclaje térmico pueden ser mayormente viables.

Se considera importante profundizar en las emisiones que se pueden generar al momento de llevar a cabo prácticas térmicas. Para empezar, es importante mencionar que este tipo de procesos no suele ser recomendado cuando se quiere tratar mezclas de plásticos debido a la complejidad de sustancias que pueden ser liberadas al medio ambiente. Sin embargo, a partir de este tipo de metodologías es posible recuperar algunas sustancias químicas las cuales pueden ser utilizadas en otras aplicaciones. Cabe aclarar que si estas son liberadas al medio ambiente pueden llegar a causar daños significativos y promover la contaminación con gases de efecto invernadero.

Tabla 9. Composición de los productos gaseosos generados en el proceso de pirólisis de una mezcla de residuos plásticos que contienen PVC (Ragaert et al., 2020). Los valores presentados se presentan en unidades de porcentaje en peso (wt%).

Productos/Temperaturas	680°C	735°C	790°C
Hidrógeno.	0.667	0.683	1.868
Monóxido de carbono.	8.376	14.155	6.316



Dióxido de carbono.	20.418	20.807	3.380
Metano.	16.734	22.661	46.491
Eteno.	18.383	20.690	25.994
Etano.	10.118	7.189	7.765
Propano.	13.758	7.797	3.311
Hidrocarburos C ₃ – C ₉ .	11.546	6.504	4.875

La tabla 7 presenta la composición de los productos gaseosos que se pueden generar en el proceso de pirólisis de una mezcla de residuos plásticos que contienen PVC, a diferentes temperaturas. Es importante notar algunos de estos productos pueden causar afectaciones ambientales, por lo cual es pertinente presentar un análisis del potencial medioambiental de cada uno de ellos:

- Hidrógeno: Este gas no es considerado nocivo para el medio ambiente y tampoco lo es para la salud humana.
- Monóxido de carbono: Este es considerado como un gas tóxico que puede causar problemas de salud en los humanos y posibles afectaciones en algunos ecosistemas. Es uno de los productos más dañinos de la combustión incompleta, por lo cual contribuye para deteriorar la contaminación del aire.
- Dióxido de carbono: Si bien es cierto que es un componente natural en la atmósfera, en cantidades excesivas puede contribuir al cambio climático y a la acidificación de los océanos.
- Metano: Es considerado como un gas de efecto invernadero el cual contribuye significativamente al cambio climático.
- Etileno: Este gas no es considerado nocivo para el medio ambiente y tampoco lo es para la salud humana.
- Etano: Este gas no es considerado nocivo para el medio ambiente y tampoco lo es para la salud humana.
- Propano: Es un gas inflamable que contribuye a la contaminación del aire y por ende al cambio climático. Comúnmente se utiliza como combustible.
- Hidrocarburos C₃ – C₉: Son un grupo de compuestos orgánicos volátiles, sustancias que son altamente nocivas para el medioambiente, las cuales pueden contribuir al cambio climático.

Partiendo de las consideraciones anteriormente presentadas, se puede decir que, a pesar de los gastos energético-inherentes a cada método evaluado, es crucial destacar que estos

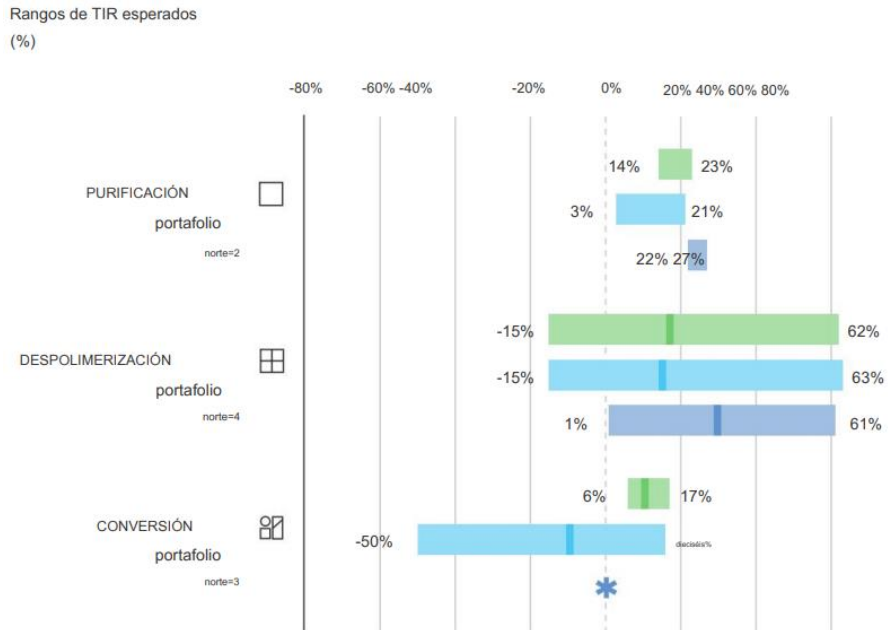


no superan a los gastos requeridos en la producción de materiales vírgenes. Por lo cual la mayoría de las técnicas expuestas a lo largo del documento aparentan tener una viabilidad medioambiental, por lo cual evaluándolas desde este ámbito se posicionan como alternativas sostenibles en la gestión de residuos del PVC. Adicionalmente, es esencial notar que las emisiones generadas por estas prácticas no sobrepasan las emitidas por otras industrias, consolidando aún más su posición favorable en términos de impacto ambiental. Cabe destacar que, para potenciar aún más la viabilidad medioambiental de estas prácticas, es imperativo desarrollar procesos que implementen estrategias de reducción de residuos y captación de sustancias volátiles nocivas. Lo anterior permitirá consolidar el compromiso con el enfoque verdaderamente sostenible en la industria del reciclaje químico del PVC.

7.1.2 Viabilidad económica

A diferencia de la sección anterior, la viabilidad económica no se abordará teniendo en cuenta cada una de las prácticas expuestas en el capítulo seis de este documento. Lo anterior debido a que evaluar cada una de ellas puede ser bastante extenso y complejo, por lo cual se sale del alcance de este documento. Es por lo que durante este capítulo se abordará una perspectiva general de la viabilidad económica de las prácticas de reciclaje químico del PVC. La información que se presentará a continuación está basada en el informe “Transición a un sistema circular para plásticos, evaluando el reciclaje molecular” realizado por Closed Loop Partners.

Para empezar, uno de los retos más grandes al momento de proponer llevar a cabo este tipo de proyecto a escala industrial es poder cumplir con las expectativas de rentabilidad debido a que esta se encuentra en riesgo si se espera que la producción de materiales a partir de reciclaje químico compita directamente con los precios del mercado virgen (Partners, 2020). A continuación, se presenta un gráfico en el cual se evalúan la tasa de rendimiento esperada para tres casos de reciclaje químico (purificación, despolimerización y conversión). Cada uno de dichos casos es evaluado a partir de tres diferentes escenarios, como se evidencia a continuación:



Gráfica 3. Tasa de rendimiento interno (TIR) esperada del reciclaje molecular en tres escenarios de mercado. El primer escenario (barras verdes) evidencia la fijación de precios de mercado para el 2021, el segundo escenario (barras azules) evidencia los precios del mercado para el 2019 y finalmente el tercer escenario (barras moradas) evidencian el precio de producción esperado por las propias empresas de tecnología (Partners, 2020).

La gráfica 1 demuestra que con respecto al año 2019 las empresas han reportado un incremento en el porcentaje de TIR. El estudio atribuye esta situación debido a que algunas empresas de reciclaje químico se encuentran creando nuevos productos con beneficios ambientales, por lo cual surgen nuevos precios de productos básicos donde las empresas no necesariamente tienen que competir con los precios de los materiales vírgenes (Partners, 2020). Lo anterior es posible gracias a la versatilidad de materiales que se pueden obtener a partir de este tipo de técnicas.

Es importante destacar que las tecnologías de purificación y despolimerización pueden ser tildadas como las más rentables y generar mejores rendimientos que las tecnologías de conversión, a pesar de involucrar mayores gastos de capital y mayores gastos operativos por tonelada métrica (Partners, 2020). Por lo cual, considerar prácticas que se clasifiquen en estas categorías generar una propuesta de valor a nivel económico. Ahora bien, se establece que las condiciones actuales del mercado, los plásticos y materiales reciclados tienen precios más altos que los plásticos vírgenes (Partners, 2020).

Al momento de evaluar la viabilidad económica de las prácticas de reciclaje químico de PVC, se deben considerar diversos factores, entre ellos las diferentes alternativas que pueden tener los plásticos a lo largo de su ciclo de vida. Por ejemplo, enviar a vertederos o incineradores a este tipo de materiales suele ser costoso y cuando se consideran las técnicas de reciclaje químico como una alternativa, estas representan un beneficio en cuanto a costos. Las tecnologías que utilizan métodos de purificación generan un



beneficio neto entre 800 y 1000 dólares por tonelada métrica de material gestionado, las tecnologías de despolimerización generan entre 50 y 1000 dólares por tonelada métrica de material procesado, mientras que las tecnologías de conversión pueden generar entre 10 y 133 dólares por tonelada métrica de material procesado (Partners, 2020). Si bien es cierto que esta última ofrece el más bajo beneficio entre las tres categorías, esta práctica permite eliminar los residuos mixtos, por lo cual, propone un ahorro adicional en los costos de clasificación y separación de la materia prima.

Para finalizar con los datos reportados en el estudio acerca de la viabilidad económica de las técnicas de reciclaje químico, se establece que proporcionar nuevas tecnologías en los sistemas de reciclaje de plásticos, en el caso de Estados Unidos y Canadá, podría duplicar la cantidad de envases plásticos que fueron reciclados para el año 2019 y generar hasta 970 millones de dólares al año (Partners, 2020).

Ahora bien, es importante mencionar que otro aspecto de interés al momento de hablar de la viabilidad económica está relacionado con los beneficios e incentivos tributarios que se suelen ofrecer a las grandes empresas que implementan estrategias para favorecer el medio ambiente. En el caso específico de Colombia, “el Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, entre otras entidades, promueve beneficios tributarios para organizaciones interesadas en proteger el ambiente y avanzar hacia una economía baja en carbono” (Gobierno Nacional, 2022). Este tipo de incentivos permite mejorar la viabilidad económica de las prácticas de reciclaje químico.

Otra de las formas de evaluar la viabilidad económica es determinar los costos asociados a las implicaciones ambientales y de salud humana. En la sección anterior se expuso una lista de los compuestos que forman parte de las emisiones en los procesos de reciclaje del PVC. Para continuar evaluando la viabilidad económica de este tipo de prácticas, se expondrán los costos externos de los contaminantes, estos costos económicos están asociados con los impactos negativos al medio ambiente y la salud humana. Estos costos incluyen los gastos incurridos por atención médica, remediación ambiental y daños a los ecosistemas. Los valores específicos reportados se expresan en euros por kilogramo de contaminante emitido, estos varían dependiendo del contaminante y se determinan con base en evaluaciones realizadas según la regulación de productos químicos de UE y revisiones de literatura. En este caso particular se presentan los costos externos evaluados en la investigación elaborada por Jean Marc Bringnon en la cual realiza una evaluación del costo beneficio de reciclar PVC. A continuación, se presenta dicha información:



Tabla 10. Costos externos de los contaminantes generados en los procesos de reciclaje del PVC (Brignon, 2021).

Contaminantes	Costo externo (euros/kg)
<i>CO₂</i>	0.059
<i>PM₁₀</i>	21.2
<i>SO₂</i>	15.9
<i>NO_x</i>	5.5
<i>Pb</i>	965
<i>Cd</i>	31
<i>Dioxinas</i>	27×10^7
<i>DEHP</i>	0.62

De la tabla 8 es importante notar que una de las sustancias con menor costo externo es el DEHP el cual hace referencia a los plastificantes involucrados en el proceso de producción del PVC. La anterior información confirma el hecho de que a largo plazo aumentar el reciclaje químico de estos materiales es positivo a pesar de la presencia de los aditivos peligrosos. Las dioxinas son uno de los compuestos que mayor costo externo generan, lo cual sugiere que es necesario buscar formas de capturar este tipo de sustancias al momento de realizar los procesos de reciclaje químico del PVC. Como ya se mencionó, el gasto energético está relacionado con las emisiones de dióxido de carbono, las cuales son las que tienen un menor costo externo asociado comparado con los demás contaminantes. La tabla 8 permite entender cuál es la relación entre los costos asociados a los mayores contaminantes generados durante el proceso de reciclaje del PVC.

Para concluir, con lo presentado anteriormente, es posible afirmar que las prácticas de reciclaje químico han demostrado tener un crecimiento económico en la industria lo anterior debido a que los precios de los materiales reciclados han adquirido valores competitivos con respecto al precio de los materiales vírgenes. Además, también representa una ventaja el hecho que generar materiales reciclados promueve una propuesta de valor en el mercado. Es importante mencionar estas técnicas proporcionan una forma alternativa a la disposición de residuos, evitando que estos lleguen a vertederos, situación la cual es genera más costos de los cuales puede llegar a generar prácticas de reciclaje químico. En este punto, es importante traer a colación que los gastos energéticos (como ya se mencionó en secciones previas de este documento) en las técnicas de



reciclaje químico no superan los gastos energéticos al momento de producir materiales vírgenes, lo cual es una confirmación de la viabilidad económica de este tipo de prácticas. Finalmente, los valores de costos externos, expuestos, demuestran que los compuestos que comúnmente se encuentran incorporados en los plásticos (plastificantes), son lo que menor costo externo reportan, lo cual demuestra que no representa un daño considerable con respecto a otras sustancias que generan mayores impactos.

8. CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo de investigación se logró realizar una revisión bibliográfica para establecer el estado del arte del reciclaje químico del PVC, para de tal forma establecer un punto de partida para futuros estudios relacionados con el tema en cuestión. A su vez, se presentó un análisis de la viabilidad medioambiental y económica de este tipo de prácticas en el cual se evaluó la posibilidad de llevar a cabo las técnicas propuestas a escala industrial. Lo anterior permitió cumplir con todos los objetivos propuestos al inicio de este documento. De acuerdo con lo anterior se pudo concluir que:

VOSviewer:

- El tema del reciclaje químico del PVC ha sido mayormente investigado en el continente asiático. Además, es evidente que el interés investigativo ha mostrado una creciente tendencia a lo largo de los años, siendo este último año el más productivo en cuanto a la generación de conocimiento con respecto a este tipo de prácticas.
- Las palabras clave demuestran un interés investigativo en las prácticas clásicas térmicas de reciclaje, como por ejemplo prácticas de pirolisis.

Técnicas de reciclaje químico:

- Existe una amplia variedad de técnicas de reciclaje químico del PVC, las cuales representan una alternativa a las técnicas de reciclaje convencionales como lo es el reciclaje mecánico. El reciclaje químico permite descomponer la molécula y por ende poder obtener materiales sin necesidad de recurrir a la producción de materias primas vírgenes.
- Las técnicas que permiten obtener los monómeros de la molécula suelen ser complejas y requieren de equipos y catalizadores específicos, por lo cual dificulta su aplicación.
- Se demostró la existencia de una gran variedad de técnicas de reciclaje químico para el PVC, cada una depende del origen de los residuos y su estado. Por ende,



se establece que la selección de la técnica más apropiada depende del estado inicial del material que se quiere tratar, es decir dependerá si el PVC tiene o no plastificantes, si se encuentra mezclado con otros plásticos, entre otros. Una buena selección determinará la eficiencia del proceso y la reducción de los impactos ambientales.

- Las técnicas más apropiadas cuando se desea tratar PVC que esté mezclado con otros polímeros son las de despolimerización con solventes o técnicas de filtración y de separación aprovechando la diferencia de densidades. En este tipo de casos es necesario evitar las técnicas de despolimerización térmicas debido a las graves emisiones que se pueden causar.
- El reciclaje enzimático es de las alternativas que mayor beneficio ambiental representa, sin embargo, cuenta con algunas limitaciones asociadas con la especificidad de los microorganismos requeridos, además de requerir condiciones específicas que pueden llegar a ser difíciles de mantener. De todas las técnicas presentadas es la que representa un mayor nivel de complejidad al momento de intentar escalarla a nivel industrial. Finalmente, este tipo de prácticas requieren mucho tiempo para obtener los resultados deseados y además no se obtienen materiales que puedan ser nuevamente utilizados.
- Si se desea obtener un material manteniendo las mismas propiedades del PVC, se sugiere implementar la técnica de glucólisis o líquidos iónicos.
- Las técnicas de despolimerización química requieren de un bajo consumo energético y permiten una conversión de residuos a polímeros de valor agregado.
- Implementar metodologías de reciclaje químico permite obtener combustibles, materia prima, gases, solventes, hidrocarburos y demás materiales con valor agregado. Por lo cual, es posible aprovechar de diversas formas los residuos plásticos. Lo anterior permite la reducción de la producción de materias primas vírgenes.
- Las técnicas de despolimerización por solventes representan una buena alternativa para el reciclaje del PVC, dado que el requerimiento energético es menor y es posible implementar estrategias para recuperar y reutilizar los solventes.

Viabilidad medioambiental:

- Una de las metodologías con mayor impacto ambiental son las de líquidos iónicos, se sugiere no hacer uso de ellas, por el contrario, se recomienda aplicar metodologías como la de pirolisis.
- Según la bibliografía, las técnicas más comunes y viables debido a su escalabilidad industrial, además de que son técnicas que representan una alta eficiencia y que permiten que sean a justadas a otro tipo de procesos para que se disminuyan los impactos medioambientales, son las de despolimerización térmica



y de solventes. En este tipo de prácticas es posible generar un recuperación energético y productos de valor (ej. biochar).

- Las mayores preocupaciones ambientales de este tipo de prácticas están asociadas al alto requerimiento energético, a las posibles emisiones de gases al medio ambiente, el uso de sustancias nocivas y la generación de residuos durante el proceso.
- Con el objetivo de llevar prácticas ambientalmente sostenibles es pertinente llevar a cabo prácticas que permitan la dechloración de la molécula. Es importante implementar estrategias para el manejo de los compuestos clorados y sus derivados.
- Las técnicas de despolimerización térmica son las más investigadas y aplicadas a nivel industrial, la gran preocupación en este caso son los gastos energéticos y la liberación de compuestos clorados al medio ambiente. Sin embargo, en la sección de viabilidad medioambiental de este documento se estableció que estas técnicas pueden llegar a ser viables medioambientalmente hablando, implementando algunas estrategias adicionales en el proceso, como por ejemplo filtros o sistema de captación para las emisiones.
- Las auditorías internacionales, específicamente la de Closed Loop Partners demuestran que las técnicas de reciclaje químico generan entre el 22% y 45% menor cantidad de emisiones de carbono con respecto a las plantas de producción de materiales vírgenes. Por lo cual se concluye que es pertinente llevar a cabo este tipo de prácticas.
- Las emisiones generadas por las industrias de reciclaje químico son comparables con las emisiones generadas en otros sectores como los de alimentos o de salud. Lo cual demuestra que este tipo de prácticas no representan un daño superior al medio ambiente, por el contrario, permite generar un beneficio ambiental significativo.
- Los impactos medioambientales de las técnicas de reciclaje químico del PVC pueden ser manejadas y controladas haciendo uso de energías renovables y aplicando otras operaciones unitarias adicionales al proceso de reciclaje, como por ejemplo sistemas de condensación de gases y filtros para las fuentes de emisiones.
- En cuanto a la preocupación asociada con los plastificantes contenidos dentro de los materiales de PVC, se especificó que su reciclaje representa ventajas medioambientales y de salud a largo plazo. Además de que el costo externo generado por estos químicos bastante bajos con respecto a los de otros compuestos.

Viabilidad económica:



- La perspectiva económica de las prácticas de reciclaje químico del PVC es favorable, ya que las empresas que han apostado por este sector han presentado un aumento en la tasa de rendimiento interno a lo largo de los años.
- Los materiales reciclados han adquirido un mayor valor económico comparado con respecto al costo de los materiales vírgenes, lo cual deriva en un panorama favorable para la industria interesada en aplicar este tipo de prácticas.
- Llevar a cabo estrategias de reciclaje en las grandes industrias puede representar un beneficio tributario otorgado por el gobierno, mejorando la viabilidad económica de este tipo de prácticas.
- Representa un mayor ahorro de dinero, implementar técnicas de reciclaje químico de PVC que disponer de los residuos en rellenos sanitarios.
- Reciclar el material suele ser más económico que producir materiales vírgenes.
- Las técnicas de reciclaje químico del PVC son viables, medioambiental y económicamente hablando. Sin embargo, para asegurar dicha viabilidad es pertinente evaluar el tipo de material que se desea tratar y además diseñar el proceso, optimizando las condiciones de operación e implementando metodologías adicionales que disminuyan los impactos medioambientales.

9. RECOMENDACIONES

A partir de lo planteado a lo largo de esta investigación es posible realizar algunas recomendaciones para futuros trabajos relacionados con el tema en cuestión. A continuación, se presentan una serie de sugerencias:

- Es pertinente centrar futuras investigaciones a un tipo específico de residuo, ya que sus condiciones determinaran la técnica más adecuada. Por ende, las fuerzas de investigación estarán centradas en un objetivo específico.
- Es importante proponer estudios experimentales para obtener información de primera mano. Nuevamente centrados en un tipo específico de residuos para poder optimizar las condiciones de operación de cada técnica. Es importante diseñar procesos basados en la materia prima.
- Se propone realizar análisis económico más detallado para cada una de las técnicas expuestas en este documento. Es importante especificar los costos asociados a los equipos, reactivos, consumo de energía, entre otros, para cada una de las metodologías de reciclaje químico planteadas. Lo anterior debido a que en este documento la viabilidad económica se evaluó de manera general a las metodologías de reciclaje químico de plásticos.
- En este documento se estudió la viabilidad económica con informes y auditorias de Canadá y Estados Unidos, por lo cual la información presentada puede tener



algunas limitaciones debido a la diferencia social y económica de la región. Dado lo anterior se considera realizar un estudio económico para el caso específico de Colombia.

- Para realizar el análisis económico de este tipo de prácticas es pertinente implementar conocimientos de otros expertos en la materia como economistas, administradores o ingenieros industriales.
- Es pertinente llevar a cabo un análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental de cada método de reciclaje químico del PVC. Este análisis debe estar centrado en Colombia y debe evaluar diferentes aspectos del ciclo de vida del material, como por ejemplo en la etapa de producción, de transporte, entre otros. Esta sugerencia se realiza dado que consultando en la bibliografía se evidencia que para el caso de Colombia no se ha reportado este análisis de manera detallada, la única fuente de conocimiento que se conoce al respecto, es la investigación realizada por Andrés Ariza “*Estado del arte de los costos de toneladas de carbono equivalente para ser incluidos en diseños multiobjetivo de sistemas hidráulicos urbanos*” en la cual se considera una pequeña parte del ciclo de vida del PVC. Se sugiere realizar un estudio de investigación completo con este tema, esto permitirá evaluar de manera completa los impactos medioambientales.
- Se sugiere realizar una comparación detallada entre los métodos de reciclaje químico del PVC con otras metodologías de reciclaje.
- Se recomienda considerar aspectos sociales y regulatorios que puedan afectar la implementación de las técnicas de reciclaje químico.
- Con el objetivo de entender a fondo cada una de las técnicas presentadas, es pertinente ahondar en la naturaleza de las reacciones, en la metodología y en los equipos utilizados en las investigaciones con el objetivo de comprender a mayor profundidad que técnica se adapta de la mejor manera según sea el caso.
- Esta investigación recopiló la información disponible hasta la fecha, sin embargo, se sugiere realizar una investigación continua y una constante actualización sobre los avances tecnológicos y científicos en el campo del reciclaje químico del PVC.
- Es pertinente dar continuidad de la investigación para adaptarse a los cambios en la tecnología y las demandas del mercado.

10. REFERENCIAS

Achilias, D. S., Giannoulis, A., & Papageorgiou, G. Z. (2013). Recycling of polymers from plastic packaging materials using the dissolution–precipitation technique. *Polymer Bulletin*, 63, 449–465.

Acosta, A. (2017). Aplicaciones biotecnológicas a la degradación de residuos plásticos.



Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad Pablo de Olavide, 1, 1–4.
<https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero35/Destacado-2.pdf>

- Adeniyi, A. G., Amusa, V. T., Iwuozor, K. O., & Emenike, E. C. (2022). Thermal recycling strategy of Coca-Cola PVC label films by its co-carbonization with Terminalia ivorensis leaves. *Cleaner Engineering and Technology, 11*, 100564. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100564>
- Adeola, F. O. (2018). WEEE generation and the consequences of its improper disposal. In *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling* (pp. 13–31). Elsevier.
- Agarski, B., Vukelic, D., Micunovic, M. I., & Budak, I. (2019). Evaluation of the environmental impact of plastic cap production, packaging, and disposal. *Journal of Environmental Management, 245*, 55–65.
- Altarawneh, S., Al-Harashseh, M., Dodds, C., Buttress, A., & Kingman, S. (2022). Thermal degradation kinetics of polyvinyl chloride in presence of zinc oxide. *Thermochimica Acta, 707*, 179105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.179105>
- AlZgool, M. R. H., Shah, S. M. M., & Ahmed, U. (2020). IMPACT OF ENERGY CONSUMPTION AND ECONOMIC GROWTH ON ENVIRONMENTAL PERFORMANCE: IMPLICATIONS FOR GREEN POLICY PRACTITIONERS. *International Journal of Energy Economics and Policy, 10*(5), 655–662. <https://doi.org/10.32479/ijeep.10222>
- Arena, U., & Di Gregorio, F. (2014). Energy generation by air gasification of two industrial plastic wastes in a pilot scale fluidized bed reactor. *Energy, 68*, 735–743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.084>
- Australian Government. (2023). *Hydrochloric acid*. Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/npi/substances/factsheets/hydrochloric-acid#:~:text=Hydrogen chloride released into the,processes that cause photochemical smog.>
- Berenguer, J. M., & Corraliza, J. A. (2000). Preocupación ambiental y comportamientos ecológicos. *Psicothema, 325–329*.
- Brignon, J.-M. (2021). Costs and benefits of recycling PVC contaminated with the legacy hazardous plasticizer DEHP. *Waste Management & Research, 39*(9), 1185–1192. <https://doi.org/10.1177/0734242X211006755>
- Calosi, M., Renon, M., Belletti, G., Mazzanti, V., Mollica, F., Massi, A., & Bertoldo, M. (2022). Glycolysis of semi-interpenetrated polymer network foam based on poly(vinyl chloride) for recovery and reuse of the individual components. *WASTE MANAGEMENT, 153*, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.001>
- Cho, M.-H., Choi, Y.-K., & Kim, J.-S. (2015). Air gasification of PVC (polyvinyl



- chloride)-containing plastic waste in a two-stage gasifier using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for the production of clean and hydrogen-rich producer gas. *Energy (Oxford)*, 87, 586–593. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.026>
- Choudhury, N., Kim, A., Kim, M., & Kim, B. S. (2023). Mechanochemical Degradation of Poly(vinyl chloride) into Nontoxic Water-Soluble Products via Sequential Dechlorination, Heterolytic Oxirane Ring-Opening, and Hydrolysis. *ADVANCED MATERIALS*. <https://doi.org/10.1002/adma.202304113>
- Clarivate. (2023). *Scientific & Academic Research - Web of Science platform*. <https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/>
- De Jong, R., & Bus, D. (2023). VOSviewer: putting research into context. *Research Software Community Leiden - Universiteit Leiden*, 0–7. <https://doi.org/10.21428/a1847950.acdc99d6>
- Elgegren, M., Tiravanti, G. J., Ortiz, B. A., Otero, M. E., Wagner, F., Cerrón, D. A., & Nakamatsu, J. (2012). Reciclaje químico de desechos plásticos. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 78(2), 105–119.
- Elsevier. (2022). *About Scopus*. <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>
- Evricom. (2020). *Cera de polietileno*. <https://evricom.bg/es/tipos-de-cera/ceras-sinteticas/cera-de-polietileno/>
- Formulación Química. (n.d.). *Cloruro de hierro (II)*. Retrieved September 18, 2023, from <https://www.formulacionquimica.com/FeCl2/>
- Gala, A., Catalán-Martínez, D., Guerrero, M., & Serra, J. M. (2021). Simulation-assisted design of a catalytic hydrogenation reactor for plastic pyrolysis fuels. *Fuel*, 287, 119400. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119400>
- Gama, N. V., Santos, R., Godinho, B., Silva, R., & Ferreira, A. (2019). Methyl Acetyl Ricinoleate as Polyvinyl Chloride Plasticizer. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(4), 703–709. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01383-5>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*.
- Glas, D., Hulsbosch, J., Dubois, P., Binnemans, K., & De Vos, D. E. (2014). End-of-Life Treatment of Poly (Vinyl Chloride) and Chlorinated Polyethylene by Dehydrochlorination in Ionic Liquids. *ChemSusChem*, 7(2), 610–617.
- Gobierno Nacional. (2022). *Conozca los beneficios tributarios para empresas que ayuden a proteger el medio ambiente*. <https://www.minambiente.gov.co/conozca-los-beneficios-tributarios-para-empresas-que-ayuden-a-proteger-el-medio-ambiente/>
- Grause, G., Hirahashi, S., Toyoda, H., Kameda, T., & Yoshioka, T. (2017). Solubility



- parameters for determining optimal solvents for separating PVC from PVC-coated PET fibers. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 612–622.
- Greenpeace. (2019). Plásticos en los océanos. *INCyTU Oficina de Información Científica y Tecnología Para El Congreso de La Unión*, 34, 5. file:///C:/Users/HP/Downloads/COFOPRI/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf
- Gribkoff, E. (2022). *Chemical recycling grows — along with concerns about its environmental impacts*. Environmental Health News. <https://www.ehn.org/chemical-recycling-2658348681.html>
- Hong, D., Gao, P., & Wang, C. (2022). A comprehensive understanding of the synergistic effect during co-pyrolysis of polyvinyl chloride (PVC) and coal. *Energy*, 239, 122258.
- Huang, J., Li, X., Zeng, G., Cheng, X., Tong, H., & Wang, D. (2018). Thermal decomposition mechanisms of poly(vinyl chloride): A computational study. *Waste Management*, 76, 483–496. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.033>
- Interempresas. (2023). *Delta Tecnic transforma los productos de PVC reciclados con su línea de masterbatch de color*. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/467658-Delta-Tecnic-transforma-productos-de-PvC-reciclados-con-su-linea-de-masterbatch-de-color.html>
- Jia, P., Hu, L., Shang, Q., Wang, R., Zhang, M., & Zhou, Y. (2017). Self-Plasticization of PVC Materials via Chemical Modification of Mannich Base of Cardanol Butyl Ether. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(8), 6665–6673. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00900>
- Jia, P., Zhang, M., Hu, L., Song, F., Feng, G., & Zhou, Y. (2018). A strategy for nonmigrating plasticized PVC modified with mannich base of waste cooking oil methyl ester. *Scientific Reports*, 8(1), 1589.
- Jia, P., Zhang, M., Hu, L., Wang, R., Sun, C., & Zhou, Y. (2017). Cardanol groups grafted on poly (vinyl chloride)—synthesis, performance and plasticization mechanism. *Polymers*, 9(11), 621.
- Khatoun, N., Jamal, A., & Ali, M. I. (2019). Lignin peroxidase isoenzyme: a novel approach to biodegrade the toxic synthetic polymer waste. *Environmental Technology*, 40(11), 1366–1375.
- Kumagai, S., Hirahashi, S., Grause, G., Kameda, T., Toyoda, H., & Yoshioka, T. (2018). Alkaline hydrolysis of PVC-coated PET fibers for simultaneous recycling of PET and PVC. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(1), 439–449. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0614-4>
- Lalmangaihzuala, S., Laldinpuii, Z., Lalmuanpuia, C., & Vanlaldinpuiia, K. (2020). Glycolysis of poly (ethylene terephthalate) using biomass-waste derived recyclable



- heterogeneous catalyst. *Polymers*, 13(1), 37.
- Lewandowski, K., & Skórczewska, K. (2022). A Brief Review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Recycling. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/polym14153035>
- Li, D., Lei, S., Wang, P., Zhong, L., Ma, W., & Chen, G. (2021). Study on the pyrolysis behaviors of mixed waste plastics. *Renewable Energy*, 173, 662–674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.035>
- Loa Olivia. (2022, June 14). *Can chemical recycling close the plastic loop? | Wood Mackenzie*. Wood Mackenzie. https://www.woodmac.com/news/opinion/can-chemical-recycling-close-the-plastic-loop/?utm_source=chems-nurture-2023&utm_medium=email&utm_content=chems-insight-chems-recycling-email&utm_campaign=chems-2023-sustainability
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Alvarez, J., Bilbao, J., & Olazar, M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 576–596. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>
- Lu, J., Borjigin, S., Kumagai, S., Kameda, T., Saito, Y., & Yoshioka, T. (2020). Machine learning-based discrete element reaction model for predicting the dechlorination of poly (vinyl chloride) in NaOH/ethylene glycol solvent with ball milling. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3, 100025. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100025>
- Lu, J., Ma, S., & Gao, J. (2013). Study on the Pressurized Hydrolysis Dechlorination of PVC. *Energy & Fuels*, 16(5), 1251–1255. <https://doi.org/10.1021/ef020048t>
- Lu, J. Q., Borjigin, S., Kumagai, S., Kameda, T., Saito, Y., & Yoshioka, T. (2019). Practical dechlorination of polyvinyl chloride wastes in NaOH/ethylene glycol using an up-scale ball mill reactor and validation by discrete element method simulations. *WASTE MANAGEMENT*, 99, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.034>
- Lu, L., Kumagai, S., Kameda, T., Luo, L., & Yoshioka, T. (2019). Degradation of PVC waste into a flexible polymer by chemical modification using DINP moieties. *RSC Advances*, 9(49), 28870–28875.
- Lu, L., Li, W., Cheng, Y., & Liu, M. (2023). Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review. *Waste Management (Elmsford)*, 166, 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.012>
- Lu, L., Zhong, H., Wang, T., Wu, J., Jin, F., & Yoshioka, T. (2020). A new strategy for CO₂ utilization with waste plastics: conversion of hydrogen carbonate into formate using polyvinyl chloride in water. *Green Chemistry*, 22(2), 352–358.
- MERCK. (2023). *Etilmetilcetona* SDS. https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-109708?Origin=PDP



- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. (2020). Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology*, 11, 580709.
- Mulder, K., & Knot, M. (2001). PVC plastic: a history of systems development and entrenchment. *Technology in Society*, 23(2), 265–286.
- Nishibata, H., Uddin, M. A., & Kato, Y. (2020). Simultaneous degradation and dechlorination of poly (vinyl chloride) by a combination of superheated steam and CaO catalyst/adsorbent. *Polymer Degradation and Stability*, 179, 109225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109225>
- Osswald, T. A., Aquite, W., Ramírez, D., López, L., Puentes, J., Pérez, C., & RODRÍGUEZ, S. G. (2013). Retos en la Industria de procesamiento de plásticos y compuestos. *Dyna*, 79(175), 20–28.
- Parlamento Europeo. (2021). *Plásticos en el océano: datos, consecuencias y nuevas normas europeas*. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20181005STO15110/plasticos-en-el-oceano-datos-efectos-y-nuevas-normas-europeas-infografia>
- Partners, C. L. (2020). *Transitioning to a Circular System for Plastics*.
- Petrović, E., & Hamer, L. (2018). Improving the Healthiness of Sustainable Construction: Example of Polyvinyl Chloride (PVC). *Buildings (Basel)*, 8(2), 28. <https://doi.org/10.3390/buildings8020028>
- Pinto, F., André, R., Miranda, M., Neves, D., Varela, F., & Santos, J. (2016). Effect of gasification agent on co-gasification of rice production wastes mixtures. *Fuel*, 180, 407–416. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.048>
- Polímeros. (2016). *DEGRADACIÓN Y DESPOLIMERIZACIÓN*. <https://todoenpolimeros.com/2016/11/23/degradacion-y-despolimerizacion/>
- Qi, Y., He, J., Li, Y., Yu, X., Xiu, F.-R., Deng, Y., & Gao, X. (2018). A novel treatment method of PVC-medical waste by near-critical methanol: Dechlorination and additives recovery. *Waste Management*, 80, 1–9.
- Qi, Y., He, J., Xiu, F.-R., Nie, W., & Chen, M. (2018). Partial oxidation treatment of waste polyvinyl chloride in critical water: Preparation of benzaldehyde/acetophenone and dechlorination. *Journal of Cleaner Production*, 196, 331–339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.074>
- Qi, Y. Y., Sun, Y. W., Song, D. D., Wang, Y., & Xiu, F. R. (2023). PVC dechlorination residues as new peroxidase-mimicking nanozyme and chemiluminescence sensing probe with high activity for glucose and ascorbic acid detection. *TALANTA*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.124039>



- Quantis. (2020). *Life Cycle Assessment of Plastic Energy Technology for the Chemical Recycling of Mixed Plastic Waste*. 9. <https://plasticenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Plastic-Energy-LCA-Executive-Summary.pdf>
- Ragaert, K., Huysveld, S., Vyncke, G., Hubo, S., Veelaert, L., Dewulf, J., & Du Bois, E. (2020). Design from recycling: A complex mixed plastic waste case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104646.
- Raziyafathima, M., Praseetha, P. K., & Rimal, I. R. S. (2016). Microbial degradation of plastic waste: a review. *Chemical and Biological Sciences*, 4, 231–242.
- REHAU. (2022). *¿Cuánto tiempo duran las ventanas de PVC?* <https://www.rehau.com/es-es/cuanto-tiempo-duran-ventanas-pvc#:~:text=En líneas generales%2C podemos decir,durante una vida tan prolongada>.
- Rojo-Nieto, E., & Montoto Martínez, T. (2017). *Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global*. Ecologistas en acción.
- Ru, J., Huo, Y., & Yang, Y. (2020). Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 442.
- Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3), 2000415.
- Sharma, S., Sharma, V., & Chatterjee, S. (2023). Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment-A review. *Science of The Total Environment*, 875, 162627.
- Sherwood, J. (2020). Closed-loop recycling of polymers using solvents: Remaking plastics for a circular economy. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(1), 4–15.
- Shilpa, Basak, N., & Meena, S. S. (2022). Microbial biodegradation of plastics: challenges, opportunities, and a critical perspective. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 16(12), 161.
- Shirazimoghaddam, S., Amin, I., Faria Albanese, J. A., & Shiju, N. R. (2023). Chemical Recycling of Used PET by Glycolysis Using Niobia-Based Catalysts. *ACS Engineering Au*, 3(1), 37–44. <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.2c00029>
- Soyemi, A., & Szilvasi, T. (2023). Calculated Physicochemical Properties of Glycerol-Derived Solvents to Drive Plastic Waste Recycling. *INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH*, 62(15), 6322–6337. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04567> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Stadler, B. M., Hinze, S., Tin, S., & de Vries, J. G. (2019). Hydrogenation of polyesters to polyether polyols. *ChemSusChem*, 12(17), 4082–4087.
- Svadlenak, S., Wojcik, S., Ogunlalu, O., Vu, M., Dor, M., Boudouris, B. W.,



- Wildenschild, D., & Goulas, K. A. (2023). Upcycling of polyvinyl chloride to hydrocarbon waxes via dechlorination and catalytic hydrogenation. *Applied Catalysis, B, Environmental*, 338, 123065. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123065>
- Thanh Truc, N. T., & Lee, B.-K. (2019). Sustainable hydrophilization to separate hazardous chlorine PVC from plastic wastes using H₂O₂/ultrasonic irrigation. *Waste Management (Elmsford)*, 88, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.033>
- Tomatis, M., Greer, A. J., Oster, K., Tedstone, A., Cuéllar-Franca, R. M., Garforth, A., Hardacre, C., & Azapagic, A. (2023). Environmental assessment of a novel ionic-liquid based method for recycling of PVC in composite materials. *Science of The Total Environment*, 163999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163999>
- VOSviewer. (2023). *VOSviewer*. <https://www.vosviewer.com/>
- Wang, C., Shen, M., Huo, H., Ren, H., & Johnson, M. (2011). Using metal nanostructures to form hydrocarbons from carbon dioxide, water and sunlight. *AIP Advances*, 1(4).
- Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J., & Ivanova, E. P. (2012). Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly (ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1–18.
- Wu, J., Chen, T., Luo, X., Han, D., Wang, Z., & Wu, J. (2014). TG/FTIR analysis on co-pyrolysis behavior of PE, PVC and PS. *Waste Management*, 34(3), 676–682.
- Ye, L. H., Li, T. L., & Hong, L. (2021). Co-pyrolysis of Fe₃O₄-poly(vinyl chloride) (PVC) mixtures: Mitigation of chlorine emissions during PVC recycling. *WASTE MANAGEMENT*, 126, 832–842. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.021>
- Yu, J., Sun, L., Ma, C., Qiao, Y., & Yao, H. (2016). Thermal degradation of PVC: A review. *Waste Management*, 48, 300–314.
- Zakharyan, E. M., Petrukhina, N. N., & Maksimov, A. L. (2020). Pathways of Chemical Recycling of Polyvinyl Chloride: Part 1. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 93(9), 1271–1313.
- Zeenat, Elahi, A., Bukhari, D. A., Shamim, S., & Rehman, A. (2021). Plastics degradation by microbes: A sustainable approach. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101538>
- Zhao, Y. B., Lv, X. D., & Ni, H. G. (2018). Solvent-based separation and recycling of waste plastics: A review. *CHEMOSPHERE*, 209, 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.095> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Zhe, Z., Peng, H., Yang, D., Zhang, G., Zhang, J., & Ju, F. (2021). Polyvinyl Chloride Degradation by Intestinal Klebsiella of Pest larvae. *BioRxiv*, 2010–2021.

