

Sustainability in the Chemical Recycling of Polyolefins: A Comprehensive Approach to the Plastic Industry

Verónica Tordecilla-Acevedo, Magister¹, Sergio Andres Alvarez Monterrosa, Undergraduate², and Ana Susana Cantillo, Ph.D.³

^{1,3}Universidad Tecnológica de Bolivar, Colombia, vtordecilla@utb.edu.co; ascantillo@utb.edu.co

² universidad Tecnológica de Bolivar, Colombia, salvarez@utb.edu.co

Abstract– *This research addresses the environmental problems derived from the incorrect disposal of plastics, highlighting the chemical recycling of polyolefins via pyrolysis as a potential alternative. In Colombia, recent policies to regulate the plastics market have created a favorable context for the transition towards sustainable practices. The paper performs a conceptual and literature review, analyzing world leaders in chemical recycling, with the objective of providing a perspective for the implementation of similar practices in Colombia and other emerging countries.*

Keywords-- *Sustainability, Recycling, polyolefins, pyrolysis, plastic, sustainable development, Colombia.*

Resumen– *La investigación aborda la problemática ambiental derivada de la incorrecta disposición de plásticos, destacando el reciclaje químico (RQ) de poliolefinas vía pirólisis como una alternativa potencial. En Colombia, las recientes políticas de regulación del mercado de plásticos han creado un contexto propicio para la transición hacia prácticas sostenibles. El documento realiza una revisión conceptual y literaria, analizando líderes mundiales en reciclaje químico, con el objetivo de proporcionar una perspectiva para la implementación de prácticas similares en Colombia y otros países emergentes.*

Palabras clave-- *Sostenibilidad, Reciclaje, poliolefinas, pirolisis, plástico, desarrollo sostenible, Colombia.*

I. INTRODUCCION

La creciente conciencia ambiental por parte de la sociedad y el gobierno están dando un giro a la forma como los países producen y consumen los bienes y servicios [1]. En Colombia, en junio del 2022 fue sancionada la ley que restringe la producción de plásticos de un solo uso [2], con el objetivo de fortalecer las prácticas de circularidad establecidas en iniciativas como la Responsabilidad Extendida del Productor, normativa por medio de la cual las marcas finales se ven obligadas a reciclar parte de los materiales colocados en el mercado para la producción de nuevos empaques y productos [3].

Ante estos cambios y políticas se hace evidente la necesidad de instrumentos que permitan el cumplimiento y convergencia hacia una producción sostenible. El RQ es el proceso por el cual los residuos plásticos se descomponen para la obtención de productos de interés industrial, que se utilizan como materia prima en la fabricación de nuevos bienes, permitiendo realizar un cierre de ciclo completo [4].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

De acuerdo con lo anterior, éste es un proceso de transformación que se convierte en alternativa complementaria al reciclaje mecánico, ya que su principal objetivo se centra en aprovechar los residuos que le son de difícil procesamiento, y su fuente de materia prima tal como las poliolefinas, focalizado en desechos plásticos que llegan a los rellenos sanitarios, convirtiéndolos en una fuente potencial para la generación de productos con alto valor agregado [5]. No obstante, dado su reciente implementación en el mercado global, surgen interrogantes sobre la viabilidad de desarrollar este tipo de negocios y modelos eficientes para su ejecución.

Por tal razón el presente documento expone elementos para considerar al RQ vía pirólisis como una alternativa sostenible a partir de las condiciones del mercado, potencial económico y ambiental que podrían representar este tipo de reciclaje para los países donde se incorpore.

II. MATERIALES Y METODOS

La investigación se enfoca en un análisis cualitativo y explicativo del reciclaje químico de poliolefinas mediante pirólisis. Se realiza una revisión de la literatura utilizando la base de datos Scopus y explorando bases de datos sectoriales. La estrategia de búsqueda se basa en operadores booleanos y criterios de precisión como las comillas (“”), el signo asterisco (*) para el criterio de amplitud de la información y los operadores booleanos “OR” y “AND”, como criterio de exclusión para especificar la búsqueda de información y concretar la unión entre los términos, como se presentan en la Tabla 1, allí se muestran las ecuaciones de búsqueda empleadas. El estudio proporciona una comprensión detallada de las estrategias implementadas en la industria plástica para abordar los desafíos ambientales actuales [6].

TABLA I
 ECUACIONES DE BÚSQUEDA

#	Ecuación de búsqueda	Scopus
1	(TITLE-ABS-KEY (plastic) AND TITLE-ABS-KEY (sustainability)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	2,699
2	TITLE-ABS-KEY ("chemical recycling") AND TITLE-ABS-KEY (plastic)	1.115

3	(TITLE-ABS-KEY ("chemical recycling") AND TITLE-ABS-KEY (plastic) AND TITLE-ABS-KEY (sustainability)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	64
4	(TITLE-ABS-KEY (plastic) AND TITLE-ABS-KEY (sustainability) AND TITLE-ABS-KEY (polyolefins)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "CHEM") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI"))	46

Nota: Elaboración propia. Tabla1. Describe la ecuación de búsqueda empleada en la estrategia para elegir el número de documentos de la investigación

El sector de la industria química, centrado en el RQ vía pirólisis, amplía los usos del plástico en procesos industriales [7] al modificar su estructura y regresarlo a su materia prima (monómero), ampliando sus alternativas de uso en diversos sectores y productos tales como la elaboración de pinturas, cauchos sintéticos, revestimientos, protectores y resinas plásticas, entre otros [8]. La pirólisis catalítica, según Michael Blanke, es una tecnología prometedora de RQ que convierte los residuos plásticos en olefinas y aromáticos, que pueden utilizarse como opciones a los productos químicos derivados del petróleo y suscitar el ciclo del carbono contribuyendo así a una visión más sostenible de la industria [9]. Esta visión es un sustento clave de las orientaciones de la presente investigación.

En la selección de documentos, se aplicaron criterios específicos, lo que arrojó 46 artículos, los cuales fueron analizados para respaldar esta investigación. Aunque se limitó la búsqueda a publicaciones entre 2015 y 2023, se incluyeron contribuciones teóricas anteriores por su relevancia [10]. A pesar de que algunos datos provienen de la industria plástica y petroquímica de Colombia, se considera que las buenas prácticas identificadas y el análisis podrían replicarse en otros países con características similares.

A. Industria Plástica

La industria plástica, uno de los sectores más grandes a nivel mundial, alcanzó una producción de casi 370 millones de toneladas en 2019 [11]. En Colombia, entre 2017 y 2019, se registraron 3,350 establecimientos dedicados a la producción de plásticos, empleando a 205,312 personas. Las sustancias y productos químicos representaron el 7,8% del empleo industrial en 2018, con un valor de producción bruta de 27.7 billones de pesos corrientes (equivalentes a 9.369 millones de dólares) y su valor agregado fue de 11.1 billones de pesos corrientes (3.754 millones de dólares, demostrando a través de de estos valores de producción, un valor agregado significativos [12]. Las poliolefinas, al formar parte sustancial de una variedad de productos plásticos de uso cotidiano, presentan una resistencia a la descomposición natural que es, en muchos casos, asombrosa [13]. Este atributo las convierte en contribuyentes destacados a la contaminación ambiental por su resistencia a la descomposición natural.

B. Objetivos de desarrollo sostenible

La visión de sostenibilidad de esta investigación se apoya en la orientación planteada con [14], dado que el uso y disposición adecuados de plásticos se alinean con el Objetivo 12 el cual se refiere a la "Producción y Consumo Responsables" pues el aprovechamiento de material plástico [15] se centra en la meta 12.4 de "Lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, y reducir de manera significativa su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de reducir al mínimo sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente". Así mismo, la implementación de prácticas sostenibles contribuye al Objetivo 11 relacionado con "Ciudades y Comunidades Sostenibles", en su meta 11.3 de "reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo" [14]. De esta manera, la reestructuración del modelo actual para la disposición de residuos plásticos representa una necesidad esencial para abordar la crisis ambiental generada por su producción y uso desmedido [5].

C. Tipos de reciclaje

El reciclaje, según el Plan de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el reciclaje proceso sistemático mediante el cual materiales y productos descartados, generalmente considerados como residuos, son recolectados, clasificados y sometidos a procesos físicos, químicos o biológicos para ser transformados en materiales secundarios o materias primas, que pueden ser utilizados en la fabricación de nuevos productos, Cimpan et al [16].



Nota: Elaboración propia

Fig. 1. La figura muestra la Jerarquía de residuos de la Unión Europea, la cual permite identificar la clasificación de los niveles de prioridad de residuos.

Aunque el reciclaje es esencial, debe distinguirse del Reúso o Reutilización, una alternativa que precede al reciclaje según la jerarquía de residuos propuesta por la Unión Europea, la cual establece un orden de prioridad para las opciones de tratamiento de desechos en términos del menor impacto ambiental posible y la minimización de los desechos finales.

En esencia, la diferencia entre Reúso y Reciclaje radica que en este último el producto o materia debe pasar por una transformación, generalmente física o química, otorgándole un nuevo ciclo de vida e inclusive, una nueva aplicación. Con el fin de clarificar mejor este tema, en la tabla a continuación se presentan las definiciones de la Real Academia Española (RAE).

TABLA II
TABLA DE CONCEPTOS

Término	Autor	Concepto
Reutilizar	[17]	Volver a utilizar algo, bien con la función que desempeñaba anteriormente o con otros fines.
Reciclar	[18]	Someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar.

Nota: elaboración propia. La Tabla II evidencia las diferencias conceptuales entre dos términos claves. Reutilizar y Reciclar

De esta manera, el consumidor final podría hacer reúso de una botella plástica al decidir llenarla nuevamente de agua, o en su defecto, podría participar en el proceso previo del reciclaje al hacer separación en la fuente al momento de desecharla.

Aunque se presentan como una opción con menor impacto ambiental, lo cierto es que no todos los residuos son reutilizados por el consumidor final; tal es el caso de los plásticos de un solo uso como los desechables, los cuales, según, Singh et al [15], en 2019 sumaron al menos 38.500 toneladas dispuestas en el país [19]. Además, el ejercicio de reúso cuenta con ciclos limitados, para lo cual el reciclaje surge como una opción de aprovechamiento de aquellos plásticos posconsumos desechados.

Por su parte, la economía circular plantea que se deben crear círculos virtuosos donde todos los artículos de plástico que se utilicen sean mantenidos en el mercado y, por ende, estén fuera del medio ambiente. En otras palabras, la economía circular, presentada como una de las soluciones más eficaces para la mitigación del daño ambiental, establece que los modelos de negocios deben pasar de una estructura lineal (en donde un producto es creado, usado y desechado), a una circular, en la que los productos finales permanecen como insumos en alguna de las etapas de la cadena productiva [20].

D. Reciclaje químico: Perspectiva de las 3R

El reciclaje de plástico puede reducir los impactos ambientales negativos, como las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la producción de plástico y la incineración de residuos [21], sin duda, el sistema de economía circular (EC) para el reciclado de plásticos involucra el proceso de recuperación y reelaboración de los residuos plásticos en un producto nuevo o secundario [22].

Cabe señalar que las dinámicas de la economía son amplias actualmente, en ese contexto aparece la economía circular que propone mantener todos los artículos de plástico en el mercado, pasando de una estructura lineal a una circular. El reciclaje mecánico y químico son alternativas que permiten reintegrar residuos en la producción de nuevos productos, alineándose con el concepto de economía circular. El RQ en particular, posibilita la modificación de la estructura química del plástico, contribuyendo a la producción de nuevos productos petroquímicos [20].

El RQ, según el Directorio Colombiano de Reciclaje 2019-2020 [3], implica la descomposición de polímeros en monómeros. Estos monómeros son esenciales en la industria, utilizándose como combustible o materia prima para procesos industriales, incluyendo la producción de plásticos, pinturas, cauchos sintéticos, y resinas plásticas [9].

En este orden de ideas, el reciclaje químico es un proceso por medio del cual la estructura química del plástico es modificada [23], pudiendo regresar a su materia prima (monómero). Lo relevante respecto a éste reciclaje es que el monómero es un insumo necesario en varios de los procesos industriales realizados en las refinerías, pudiendo ser usado como combustible o teniendo versatilidad en sus aplicaciones tal como la elaboración de plásticos, pinturas, cauchos sintéticos, revestimientos protectores y resinas plásticas [9] (Dow). De esta manera, un plástico posconsumo o posindustrial podría pasar por una planta de reciclaje químico, regresar a su materia prima, y hacer uso de esta para producir... nuevamente plástico, con las mismas propiedades de uno virgen [23].

La principal diferencia entre los procesos de reciclaje mecánico y químico es que, el reciclaje mecánico es realizado a través de modificaciones físicas del residuo [9], mientras que en el reciclaje químico el plástico sufre una modificación en su estructura química, normalmente producto a la exposición de altas temperaturas [24].

En cuanto a sus ventajas y complementando lo presentado en el apartado anterior, el reciclaje químico puede ser aplicado a diferentes tipos de residuos plásticos, incluso aquellos con mezclas de polímeros o resinas, caso contrario al reciclaje mecánico, donde generalmente el pretratamiento consiste en clasificar y separar los residuos por tipo de resina [9]. Además, el reciclaje químico permite constituir ciclos infinitos de aprovechamiento, eliminando los costos de disposición, a diferencia del reciclaje mecánico que solo se puede hacer de 2 a 3 veces porque, después de cada ciclo de reciclaje, la resistencia del material plástico se reduce gradualmente debido a la degradación térmica, Singh et al [15].

Según [25], en 2021 “los materiales más demandados en Colombia fueron los polietilenos (39%), los polímeros de propileno (19,5%), los policloruros de vinilo (16%), las resinas de polietilentereftalat PET (12,5%) y los poliestirenos (6%), los cuales representan, en conjunto, el 92% del total nacional.” Debido a que el reciclaje químico permite procesar y valorar poliolefinas [24] como lo son los polietilenos y el polipropileno, y siendo estas las resinas más consumidas en el

país, la implementación de una planta de reciclaje químico se presenta como una gran oportunidad para incorporar residuos que ocasionan serias problemáticas al medio ambiente y lograr suministrarlos a la industria como productos circulares en el sector productivo, fomentando el crecimiento económico y social, y generando nuevos modelos de negocio.

A pesar de enfoques variados en RQ, actualmente la pirólisis se destaca como el método más utilizado en este ámbito, gracias a su amplia tolerancia y versatilidad con materias primas [26]. Esta perspectiva ofrece no solo beneficios medioambientales, sino también oportunidades significativas para el desarrollo económico sostenible en Colombia.

E. Reciclaje químico via pirolisis (P)

La tecnología de Pirólisis (P) emerge como una solución eficaz para procesar desechos plásticos difíciles de reciclar mecánicamente, como polietilenos y envases multicapa [27]. Según [28], se destacan la atracción y sostenibilidad de la P para reciclar residuos plásticos, incluyendo compuestos reforzados con fibras, envases multicapa, residuos de demolición y poliuretano.

Conviene subrayar que la P es un proceso químico que opera de temperaturas moderadas a altas (500 °C, 1–2 atm) sin oxígeno, descomponiendo polímeros en moléculas más pequeñas [29]. Puede dividirse en térmica, catalítica y copirólisis según el uso de catalizadores durante el tratamiento [26].

El producto resultante incluye bio-oil, gas de síntesis (CO y H₂), y biochar con propiedades similares al carbón [10]. El aceite pirolítico, también llamado biocrudo o biocombustibles, es de especial interés. Puede ser utilizado directamente como combustible de calderas o refinado para obtener otros combustibles y productos químicos, Marda et al, [30]. En el RQ de poliolefinas, el aceite de pirólisis se emplea para producir polímeros circulares, cerrando el ciclo en la industria del plástico [31].

Algunas de las ventajas del proceso de reciclaje químico via Pirolisis son:

- ✓ Ofrece una alternativa eficiente y limpia para el tratamiento de los residuos plásticos, que además de reducir la contaminación directa, tiene el beneficio adicional de producir combustibles [32].
- ✓ Se puede tratar los desechos plásticos que de otra manera son difíciles de reciclar y producir monómeros a través de su integración con refinerías, los cuales se usan para producir polímeros de la misma calidad del material virgen [33].
- ✓ Capacidad para manejar plástico sin lavar y sin clasificar. Esto significa que los plásticos muy contaminados pueden procesarse sin dificultad [34].
- ✓ El reciclaje químico a través de P de desechos plásticos ya se ha logrado a escala comercial, aunque de manera limitada, sin embargo, el desarrollo y la mejora de las tecnologías de reciclaje de plásticos de

P en los últimos años tiene un gran potencial comercial [35].

- ✓ El proceso es autosuficiente en el consumo de la energía [13].

F. Casos de Reciclaje químico (RQ) en el mundo

La implementación de tecnologías de RQ es una práctica en aumento en el mercado global. Aunque es una tendencia reciente, se proyecta un potencial de inversión entre 30 y 40 millones de toneladas anuales hasta 2025 [4], con una inversión de 7.2 billones de euros prevista para 2030 solo por parte de la Unión Europea [11]. La Tabla 3 proporciona ejemplos de tecnologías actuales enfocadas en este proceso.

TABLA III
LISTA DE TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE QUÍMICO EN EL MUNDO

Tecnología	Compañía
Pirólisis catalítica por microondas	Pyrowave
Pirólisis	Regenyx
	Arkema
	Biofabrik
	OMV
	Lummus New Hope
	Plastic Energy
	Recycling Technologies (Plaxx)
Pirólisis de microondas	Fuenix (Ecogy Technology)
	Agylyx
	Brightmark Energy
Despolimerización catalítica	Fuenix Ecogy Grou
Proceso temocatalítico	Enval
Gasificación	Re New ELP (Cat-HTR technology)
	Anellotech
	Carbon Renewal Technology
	Enerkem

Nota: Elaboración propia. La tabla III muestra resumidamente las empresas y tecnologías de Pirolisis más empleadas actualmente en el mundo

A la fecha, [36], ha identificado casi 40 recicladores químicos en América del Norte, de los cuales se espera que solo la mitad tenga una capacidad a escala comercial de al menos 15000 toneladas anuales en los próximos 5 años. Por su parte, un estudio reciente de [37] identificó al menos un 120 plantas y proyectos de RQ en todo el mundo.

En este apartado se enuncian 3 casos mundiales de tecnologías, dos en Europa y uno en Estados Unidos, estos ya han sido comprobadas a escala comercial, contando con plantas operativas hoy.

G. Organizaciones principales en la aplicación de la pirolisis como método de reciclaje

Diversas empresas se destacan como líderes en la aplicación de tecnologías sostenibles para hacer frente al

problema de los residuos plásticos. Tres ejemplos notables se incluyen a continuación: Plastic Energy en el Reino Unido, reconocida por su tecnología anaeróbica térmica (TAC) que transforma desechos plásticos en plástico virgen de calidad alimentaria. La eficiencia del proceso es del 85%, generando aceite de pirólisis o TACOIL. Este aceite, anteriormente destinado a empresas petroquímicas, ahora se dirige al 100% hacia la producción de nuevos plásticos. Marcas como Unilever, Tupperware y REN Clean Skincare han adoptado estos polímeros circulares en sus empaques, evidenciando una transición hacia prácticas más sostenibles [38]. Por su parte Biofabrik, con sede en Alemania, presenta soluciones circulares a través de su planta de reciclaje químico WASTX Plastic, que convierte eficientemente residuos plásticos en aceite de pirólisis [39]. El modularidad de su tecnología permite la portabilidad y la escalabilidad. La expansión de esta compañía y el aprovechamiento de estas tecnologías se evidenció en el montaje de plantas piloto en asocio con PlastOil en Reino Unido y en Australia, en el año 2022. Por otro lado, la alianza Lummus New Hope fusiona la experiencia tecnológica de Lummus con la experiencia en conversión de desechos plásticos de New Hope Energy. Su planta en Texas, Trinity Oaks Tyler, es una de las instalaciones de RQ más grandes del hemisferio occidental, con una capacidad de 150 toneladas por día. La colaboración con Phigenesis busca establecer una nueva planta de reciclaje químico en el Reino Unido con una capacidad de 150.000 toneladas por año. Este enfoque refleja un compromiso con la producción sostenible de plásticos y la promoción de la economía circular. [40].

H. Perspectiva sostenible BRICS-Colombia: Recursos naturales, mano de obra y otros aspectos

Desde una perspectiva sostenible, bajo una estrategia que integre una alianza entre los países emergentes de primera generación, los llamados BRICS integrados por Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica, con Colombia, que hace parte los emergentes posteriores, se identifican con oportunidades basadas en la riqueza de sus recursos naturales y mano de obra [41]. La abundancia de estos factores de producción en los países antes mencionados sugiere posibilidades y eventuales intercambios sostenibles en áreas clave como energía, agricultura y minería. Sin embargo, es crucial abordar cuestiones como los derechos laborales y la igualdad de género para garantizar una colaboración equitativa. [42].

Otro aspecto pertinente para analizar es la postura del [43] referente a la clasificación mundial de países de Statista, quienes analizan en función de su PIB por paridad del poder adquisitivo en tres momentos 1992, 2010 y 2028, a partir de allí elaboran el ranking de las 10 naciones que conformarán dentro de cuatro años, es decir al 2028, el grupo de las principales economías mundiales, a saber : China, Estados Unidos, India, Japón, Alemania, Indonesia, Rusia, Brasil, Francia y Reino Unido. Puede observarse que cuatro de los

actuales cinco BRICS actuales hacen parte de dicha proyección, por lo que es conveniente proyectar escenarios hacia y con dichas economías.

También se considera la postura de [44] quien señala que el espíritu empresarial en las economías emergentes tiene un papel crucial en el desarrollo económico, pero la literatura actual es limitada y las necesidades futuras de investigación son cruciales para comprender este tema.

En el caso específico de Colombia, a pesar de la abundancia de factores mencionados en los párrafos anteriores, Colombia aún no se han implementado procesos de pirólisis a nivel comercial para obtener combustibles o aceites pirolíticos que sirvan como materia prima para polímeros circulares. También la falta de instalaciones a gran escala de RQ de poliolefinas contrasta con casos estudiados en Europa y Estados Unidos. Por otro lado, dado el volumen de uso de los polietilenos y el polipropileno como las resinas plásticas más consumidas en el país [25], estas traen como resultado un alto índice de disposición en los rellenos sanitarios de este tipo de plásticos que no son procesables por el reciclaje mecánico y que se pueden aprovechar convenientemente.

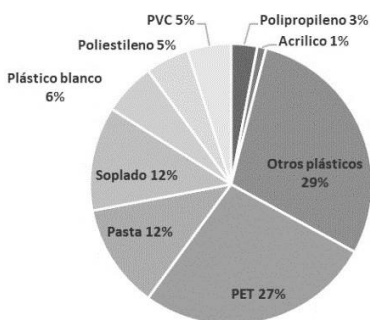
También es importante señalar que Colombia cuenta con una empresa petrolera [45] la cual está dentro de las 40 más grandes del mundo, cuenta con dos refinerías, una en el interior del país, la otra está ubicada en Cartagena de Indias; también se señala que en dicho grupo empresarial se encuentra Esentia, una empresa productora y comercializadora de resinas plástica de polipropileno, polietileno y masterbatch [45], esta última también posee su planta de producción en la misma ciudad, lo que conviene como elemento adicional a los expuestos para hacer de Colombia, un escenario promisorio para la implementación de tecnologías y una planta de reciclaje químico.

En los más recientes años el gobierno colombiano ha implementado estrategias normativas con el objetivo de impulsar la movilización a prácticas productivas y de consumo, teniendo como objetivo la inclusión de los negocios circulares. Dentro de estos instrumentos encontramos regulaciones gubernamentales que buscan promover la responsabilidad extendida del productor y los consumidores, de acuerdo con la primera [43], ésta expresa que busca promover una gestión integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), con el fin de minimizar los riesgos sobre la salud humana y el medio ambiente. La segunda es la Resolución [46][47], a través de la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones, y el ultimo decreto que se considera por ahora se emitió el año anterior, por medio de éste reglamentan las medidas orientadas a la reducción de la producción y consumo de plásticos de un solo uso en el

territorio nacional, de Colombia, las cuales ofrecen oportunidades para el desarrollo de la cadena de valor del plástico [48].

I. Materia química para el Reciclaje químico

A pesar del crecimiento en el oficio del reciclaje en Colombia, reflejando un aumento del 500% en estaciones de clasificación y aprovechamiento desde 2016, los polietilenos de alta, media y baja densidad no se clasifican como materiales valorizables, resultando en un bajo porcentaje de reciclaje. En 2019, se reportaron más de 1.9 millones de toneladas de materiales aprovechadas, pero los polietilenos representan solo el 5% de las corrientes de plástico, mientras que el polipropileno contribuye con un 3% [49].



Nota. Elaboración propia

Fig. 2 Participación de las corrientes aprovechadas dentro de la familia de los plásticos, durante el año 2020 (Colombia).

Ante esta realidad, el RQ de poliolefinas surge como una solución para los plásticos actualmente no valorizados, ofreciendo una alternativa que no compite con la materia prima de los recicladores, preservando sus ingresos y evitando riesgos sociales.

Una estrategia sostenible con los BRICS podría incluir colaboraciones que aprovechen las fortalezas específicas de cada país. Brasil, por ejemplo, podría compartir su experiencia en energías renovables, China podría ofrecer inversiones en infraestructura sostenible y Rusia podría contribuir con tecnologías avanzadas [6]. Con otros países emergentes de segunda y tercera generación podrían explorarse posibilidades de interés mutuos.

No obstante, para abordar los desafíos, como la gestión sostenible de los recursos naturales, se requiere una atención cuidadosa para evitar la sobreexplotación y la degradación ambiental. Además, la colaboración deber alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, abordando cuestiones como la erradicación de la pobreza, la igualdad de género y el acceso a una educación de calidad [14]. De igual forma, se invita a que, desde los países emergentes, se empiecen a poner en práctica aspectos como reciclaje químico via pirolisis, como una alternativa real para implementar mejores usos de los residuos del plástico, para contribuir a mitigar los desechos finales y adicionalmente

contribuir a la generación de nuevos y sostenibles usos de los mismos .

III. CONCLUSIONES

El RQ de poliolefinas emerge como una solución vital para abordar la problemática ambiental derivada de la incorrecta disposición de plásticos, especialmente aquellas corrientes con bajos índices de aprovechamiento. Desde una perspectiva normativa, las políticas existentes y proyectadas impulsan a los productores y empresas colocadoras de plásticos en Colombia hacia una transición de sus estructuras comerciales actuales. Este proceso se vislumbra como una opción para lograr un cierre de ciclo completo en la industria.

La creciente conciencia ambiental entre los consumidores finales ha generado una demanda de productos, embalajes y empaquetados más sostenibles, influyendo en toda la cadena productiva [1]. En particular Colombia, posee en la actualidad un escenario propicio para la producción de polímeros circulares a partir del aceite de pirolisis dado que existen compañías dedicadas a la producción de polímeros (Esentia), la cual opera en Cartagena y hace parte del grupo petrolero que integra grandes empresas de refinación en América Latina.

Pensando en la viabilidad de este proyecto conviene pensar en lo estratégico de la ubicación física del mismo, por lo que Cartagena de Indias sería una ciudad promisoría para liderar el RQ dado que en ella existe una refinería con plantas industriales y un desarrollo de las cadenas productivas asociadas a esas industrias, las cuales permitirían disponibilidad de desechos plásticos, así como la cercanía de la refinería a un relleno sanitario que favorecería la obtención cercana de materia prima [50]. Además, es una ciudad costera, posicionamiento ideal como centro para la exportación, ya que, durante el 2021, el 48% de las exportaciones totales del país se hicieron a través de los puertos de Cartagena [51], por lo que acarrea una gran oportunidad para los productos derivados de la transformación del reciclaje químico vía pirolisis, para obtener aceite de pirolisis, aportar a uso más sostenible de los productos derivados de la industria pl.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Bolívar por brindar el tiempo necesario para la elaboración del presente estudio, cuyo propósito es proporcionar información que pueda servir de base para investigadores o grupos de interés que busquen utilizarla en la toma de decisiones o análisis posteriores.

REFERENCIAS

- [1] M. Shafi, C. S Ramos-Meza, V. Jain, A. Salman, M. Kamal, M. S Shabbir & M. Rehman, "The dynamic relationship between green tax incentives and environmental protection," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no 12, pp. 32184-32192, 2023. [En línea]. Disponible en: doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25482-y>

- [2] Acoplásticos, 2022. “ABC: Ley de plásticos de un solo uso”, [En línea]. Disponible en: <https://www.acoplásticos.org/index.php/mnu-noti/412-boletines-2022-abc-ley-de-plasticos-hd-pdf>
- [3] “Directorio colombiano de reciclaje de residuos plásticos” Acoplásticos, 2019.
- [4] McKinsey, “Chemical Recycling” - ERTC, Madrid, España.
- [5] “New Hope Energy Signs Advanced Recycling Agreement with Chevron Phillips Chemical”. PR Newswire: press release distribution, targeting, monitoring and marketing. [En línea]. Disponible: <https://www.prnewswire.com/news-releases/new-hope-energy-signs-advanced-recycling-agreement-with-chevron-phillips-chemical-301266245.html>.
- [6] Wang, H. 2020. China and Brazil’s Renewable Energy Cooperation. China Dialogue. [En línea]. Disponible: <https://www.chinadialogue.net/en/energy/11845-china-and-brazil-s-renewable-energy-cooperation>
- [7] A. Reznichenko y A. Harlin, “Next generation of polyolefin plastics: improving sustainability with existing and novel feedstock base”, SN Appl. Sci., vol. 4, n.º 4, marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04991-4>
- [8] “Plastic Recycling: TotalEnergies and New Hope Energy partner on U.S. Advanced Recycling Project”. TotalEnergies.com. [En línea]. Disponible: <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/plastic-recycling-totalenergies-and-new-hope-energy-partner-us-advanced>
- [9] M. M. Blanke, “Advances in the Sustainable Use of Plastics in Horticulture—Perspectives, Innovations, Opportunities, and Limitations”, Sustainability, vol. 15, n.º 15, p. 11629, julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/su15151162>
- [10] . J. Suffo Aguilar, “Estado del arte de la integración del aceite de pirólisis en refinerías petrolíferas convencionales”, Trabajo de grado, Univ. Sevilla, Sevilla, 2015.
- [11] “THE CIRCULAR ECONOMY”. Plastics Europe, 2019 [En línea]. Disponible: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/20191206->
- [12] “Plásticos en Colombia 2019-2020”. Acoplásticos, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.acoplásticos.org/index.php/mnu-nos/mnu-pyr/mnu-pyr-pi/308>
- [13] K. Montoya Camargo, K. L. Roncancio Cardona, “Análisis de alternativas tecnológicas para la valorización y disposición final de residuos plásticos en la ciudad de Manizales”, Trabajo de grado, Univ. Catol. Manizales, Manizales, 2016.
- [14] Organización de Naciones Unidas, 2015. “Objetivos de Desarrollo Sostenibles”. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [15] N. Singh, D. Hui, R. Singh, I. P. S. Ahuja, L. Feo y F. Fraternali, “Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications”, Composites Part B: Eng., vol. 115, pp. 409–422, abril de 2017. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>
- [16] C. Cimpan, A. Maul, H. Wenzel y A. Damgaard, “Evaluación ambiental y económica de los sistemas de recolección de residuos separados en origen: un enfoque de estudio de caso.” Gestión de residuos, pp. 172–182, 2019.
- [17] “reutilizar | Diccionario de la lengua española”. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. [En línea]. Disponible: <https://dle.rae.es/reutilizar>
- [18] “reciclar | Diccionario de la lengua española”. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. [En línea]. Disponible: <https://dle.rae.es/reciclar?m=form>
- [19] “En Colombia se recicla menos del 17% de la basura que se genera”. Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo. [En línea]. Disponible: <https://www.semana.com/en-colombia-se-recicla-menos-del-17-de-los-residuos-que-se-generan/59739/>
- [20] S. Paleari, “The EU policy on climate change, biodiversity and circular economy: Moving towards a Nexus approach”, Environmental Sci. & Policy, vol. 151, p. 103603, enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103603>
- [21] M. Klotz, C. Oberschelp, C. Salah, L. Subal y S. Hellweg, “The role of chemical and solvent-based recycling within a sustainable circular economy for plastics”, Sci. Total Environ., p. 167586, octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167586>
- [22] C. Darko, P. W. S. Yung, A. Chen y A. Acquaye, “Review and recommendations for sustainable pathways of recycling commodity plastic waste across different economic regions”, Resour., Environ. Sustainability, p. 100134, agosto de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100134>
- [23] V. Thakur, B. K. Satapathy, C. Sarkar y S. Saha, “Biodegradable Polymers for Food Packaging Applications”, en Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Singapore: Springer Nature Singap., 2023, pp. 169–189. [En línea]. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3307-5_8
- [24] D. Frączak, “Chemical Recycling of Polyolefins (PE, PP): Modern Technologies and Products”, en Current Topics in Recycling [Working Title]. IntechOpen, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99084>.
- [25] “Plásticos en Colombia 2021-2022.” Acoplásticos, 2021.
- [26] J. Jiang et al., “From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review”, J. Environmental Chem. Eng., vol. 10, n.º 1, p. 106867, febrero de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.
- [27] K. Ragaert, L. Delva y K. Van Geem, “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste”, Waste Manage., vol. 69, pp. 24–58, noviembre de 2017. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.
- [28] A. Bohre, P. R. Jadhao, K. Tripathi, K. K. Pant, B. Likozar y B. Saha, “Chemical recycling processes of waste polyethylene terephthalate using solid catalysts”, ChemSusChem, marzo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/cssc.202300142>
- [29] A. Angyal, N. Miskolczi y L. Bartha, “Petrochemical feedstock by thermal cracking of plastic waste”, J. Analytical Appl. Pyrolysis, vol. 79, n.º 1-2, pp. 409–414, mayo de 2007. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.12.031>.
- [30] J. R. Marda et al., “Non-catalytic partial oxidation of bio-oil to synthesis gas for distributed hydrogen production”, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 34, n.º 20, pp. 8519–8534, octubre de 2009. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.099>
- [31] W. Pfeiffer. “Chemical recycling via pyrolysis – Closing the loop in the plastics industry”. Roland Berger. [En línea]. Disponible:

- <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Chemical-recycling-via-pyrolysis-Closing-the-loop-in-the-plastics-industry.html>
- [32] L. Rejas y otros, "Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos," *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, pp. 635-642, 2015.
- [33] M. S. Abbas-Abadi et al., "Thermochemical Recycling of End-of-life and Virgin HDPE: A Pilot-Scale Study", *J. Analytical Appl. Pyrolysis*, p. 105614, julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105614>.
- [34] "Gasificación y pirolisis de residuos." *EncEnergy*. 2020 [En línea]. Disponible: <https://www.encenergy.com/es/tecnologias-y-soluciones/gasificacion-y-pirolisis-de-residuos/>
- [35] C. Donoso, "Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno reciclado, mediante pirólisis catalítica". Trabajo de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2020.
- [36] "INSIGHT: Supply and demand for chemical recycling in North America polymers markets". *ICIS Explore*. [En línea]. Disponible: <https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/09/24/10688533/insight-supply-and-demand-for-chemical-recycling-in-north-america-polymers-markets/>
- [37] Ecoprog, "Extract Trend Study Chemical Recycling", 2022.
- [38] "2021 Sustainability Report - Plastic Energy". *Plastic Energy*. [En línea]. Disponible: <https://plasticenergy.com/2021-sustainability-report/>.
- [39] "First series plant commissioned in Australia". *Biofabrik*, 2022
- [40] Lummus Technology, LLC. "Lummus Announces Agreement with New Hope Technologies to License Waste Plastics Conversion Technology". [En línea]. Disponible: <https://www.prnewswire.com/news-releases/lummus-announces-agreement-with-new-hope-technologies-to-license-waste-plastics-conversion-technology-301152408.html>
- [41] Global Economic Paper N.099: Dreaming with BRICs: The Path to 2025 : disponible en <https://web.archive.org/web/20060305114725/http://www.gs.com/insight/research/reports/99.pdf>
- [42] E. Sychenko, M. Laruccia, D. Cusciano, Rupa Korde, K. Nagadia, I. Chikireva, J. Wang and N. Carrim. "Gender Discrimination in Employment: BRICS Countries Overview." *BRICS Law Journal* 2022. Disponible
- [43] "Los mercados emergentes ganarán peso en el mercado bursátil global, según Goldman Sachs". *eleconomista* <https://doi.org/10.21684/2412-2343-2022-9-2-30-71>. Disponible <https://www.eleconomista.es/economia/noticias/12578082/12/23/estas-seran-las-principales-potencias-economicas-del-mundo-en-2050-que-pasara-con-espana.html>
- [44] Bruton, G. D., Ahlstrom, D., & Obloj, K. (2008). Entrepreneurship in Emerging Economies: Where Are We Today and Where Should the Research Go in the Future. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 32(1), 1-14. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6520.2007.00213.x>
- [45] Ecopetrol. Nuestras empresas. Disponible en línea <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/grupoEcopetrolPagina/NuestrasEmpresas>
- [46] Ministerio del Medio ambiente y Desarrollo Sostenible. Ley 1672 de 2013. Disponible en <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1672-2013.pdf>
- [47] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Resolución 1407 de 2018, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [En línea]. Disponible: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=80429>
- [48] Ministerio del Medio ambiente y Desarrollo Sostenible.. Decreto 2192 del 2023. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2023/12/DECRETO-2192-DEL-18-DE-DICIEMBRE-DE-2023.pdf>
- [49] Superservicios. Informe sectorial de la actividad de aprovechamiento 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-Aprovechamiento-de-2021..pdf>
- [50] Ecopetrol. "Colombia, pionera en reciclaje químico avanzado en Suramérica". [En línea]. Disponible: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/colombia-pionera-reciclaje-quimico-avanzado-suramerica>
- [51] "Casi la mitad de exportaciones del país salen por el Puerto de Cartagena". *Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo*. [En línea]. Disponible: <https://www.semana.com/hablan-las-marcas/articulo/casi-la-mitad-de-exportaciones-del-pais-salen-por-el-puerto-de-cartagena/202200/>