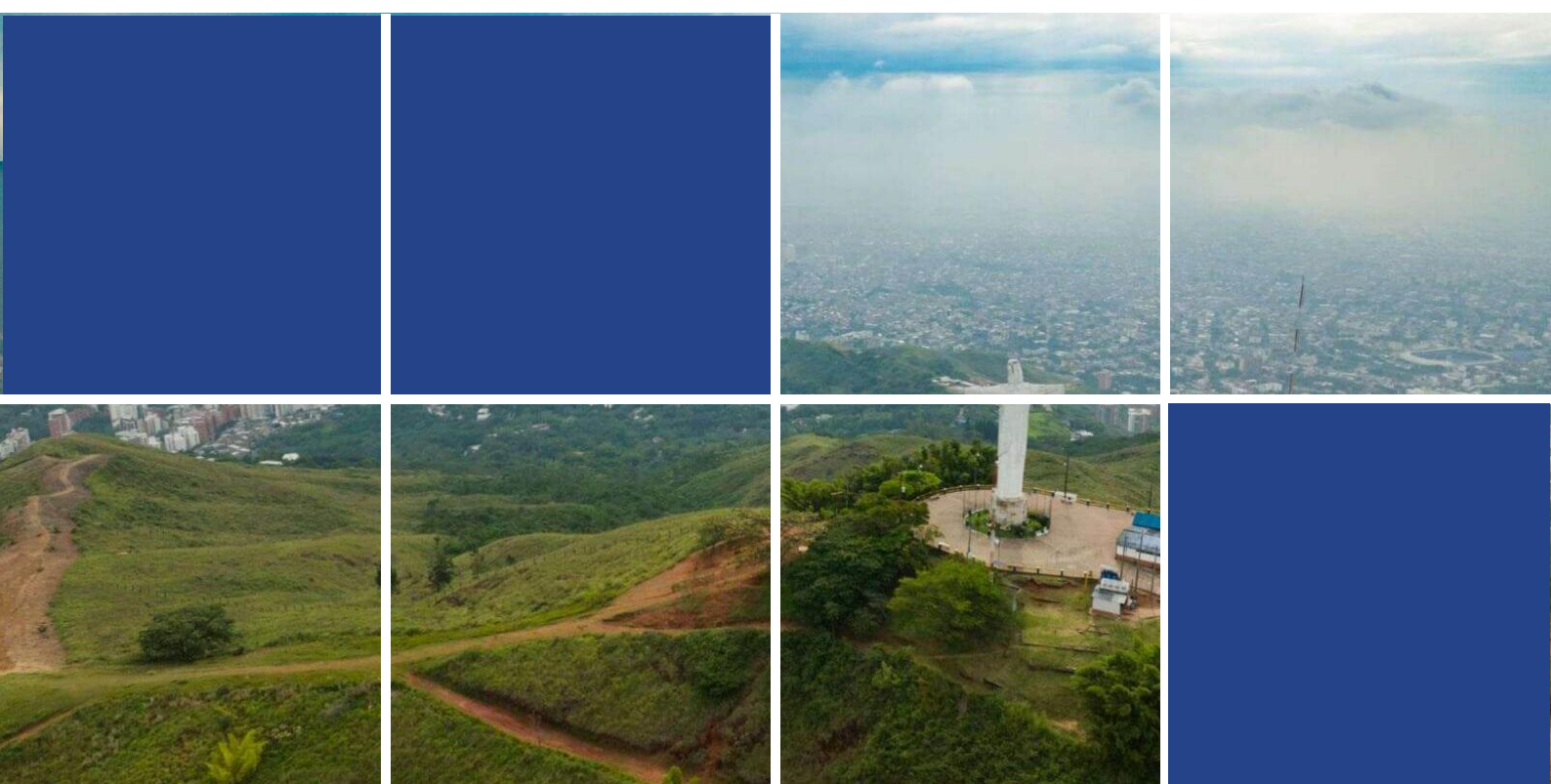


# Elaboración de estudios de dimensionamiento y proyección sobre el uso de energías renovables y circularidad en el Valle del Cauca

Informe final de resultados del producto 2.5 – Determinación de la factibilidad preliminar de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca



Elaborado para:

**Consultoría:**

Elaboración de estudios de dimensionamiento y proyección sobre el uso de energías renovables y circularidad en el Valle del Cauca

**Cliente:**

Invest Pacific

Dirección: Cl. 3 #9-08, Cali, Valle del Cauca

Teléfono: +57 602 893 7882

[www.investpacific.org](http://www.investpacific.org)

**Elaborado por:**

DEUMAN

Dirección: Av. Príncipe de Gales 5921 Of. 1310, La Reina, Santiago, Chile

Teléfono: +56 2 32247478

[www.deuman.com](http://www.deuman.com)

**Dato de contacto:**

Luis Costa

[lcosta@deuman.com](mailto:lcosta@deuman.com)

Daniel Contreras

[dcontreras@deuman.com](mailto:dcontreras@deuman.com)

Mariana Ruiz Fajardo

[mrui@deuman.com](mailto:mrui@deuman.com)

**Lugar y fecha de presentación:**

Bogotá, 16 de julio de 2026

## Índice

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Índice.....                                                                                     | 2  |
| Índice de tablas .....                                                                          | 4  |
| Índice de figuras .....                                                                         | 5  |
| Siglas y acrónimos .....                                                                        | 6  |
| Introducción .....                                                                              | 7  |
| 1. Marco conceptual.....                                                                        | 8  |
| 2. Marco normativo y señales de política pública .....                                          | 9  |
| 3. Metodología .....                                                                            | 11 |
| 3.1. Identificación de flujos de residuos susceptibles .....                                    | 11 |
| 3.2. Desarrollo de un modelo de operación para la planta de reciclaje químico.....              | 11 |
| 3.3. Dimensionamiento de instalaciones proyectadas .....                                        | 12 |
| 3.4. Estimación de capital de inversión y operación .....                                       | 12 |
| 4. Identificación de flujos de residuos plásticos .....                                         | 14 |
| 4.1. Generación de residuos sólidos y composición plástica .....                                | 14 |
| 4.2. Disposición actual de residuos sólidos y brechas de aprovechamiento.....                   | 15 |
| 4.3. Estimación del flujo de plásticos en el Valle del Cauca .....                              | 18 |
| 5. Experiencias internacionales en la implementación de plantas de reciclaje químico .....      | 19 |
| 6. Modelo de operación de una planta de reciclaje químico.....                                  | 21 |
| 6.1. Flujograma de procesos.....                                                                | 21 |
| 6.2. Productos y subproductos .....                                                             | 24 |
| 6.3. Infraestructura y dimensionamiento industrial .....                                        | 28 |
| 6.4. Análisis financiero y de capital humano .....                                              | 28 |
| 6.4.1. Inversión inicial (CAPEX) .....                                                          | 28 |
| 6.4.2. Costos de operación (OPEX) .....                                                         | 30 |
| 6.4.3. Estructura de capital humano.....                                                        | 32 |
| 7. Análisis de prefactibilidad de una planta de reciclaje químico para el Valle del Cauca ..... | 34 |
| 7.1. Condiciones logísticas y territoriales .....                                               | 34 |
| 7.2. Adaptación tecnológica de la planta.....                                                   | 36 |
| 7.3. Consideraciones para la implementación .....                                               | 39 |
| 7.4. Impacto en emisiones de GEI .....                                                          | 41 |
| 8. Conclusiones .....                                                                           | 43 |
| 9. Recomendaciones .....                                                                        | 45 |
| Referencias bibliográficas.....                                                                 | 47 |



## Índice de tablas

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Benchmarking de plantas de reciclaje químico.....                                            | 19 |
| Tabla 2. Principales productos y subproductos del reciclaje químico y sus precios en el mercado ..... | 24 |
| Tabla 3. Comparación de precios de combustible.....                                                   | 25 |
| Tabla 4. Estimación referencial de CAPEX para una planta de reciclaje químico .....                   | 29 |
| Tabla 5. Estimación referencial de OPEX para una planta de reciclaje químico .....                    | 31 |
| Tabla 6. Estimación referencial del CAPEX de una planta de pirólisis de 50 toneladas por día .....    | 37 |
| Tabla 7. Estimación referencial del OPEX de una planta de pirólisis de 50 toneladas por día .....     | 37 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Pasos metodológicos de la Fase 5 .....                                                                                      | 11 |
| Figura 2. Evolución de la generación de residuos sólidos en Colombia (2012-2023) .....                                                | 14 |
| Figura 3. Evolución de la generación de residuos sólidos en Valle del Cauca (2018-2023) .....                                         | 15 |
| Figura 4. Disposición de residuos sólidos en Colombia .....                                                                           | 16 |
| Figura 5. Disposición de residuos sólidos del sector Industrial con el resto de los sectores en el Valle del Cauca (2018 – 2023)..... | 17 |
| Figura 6. Tasa de reciclaje y nueva utilización, y tasa de aprovechamiento total nacional .....                                       | 17 |
| Figura 7. Flujograma del proceso de reciclaje químico en una planta .....                                                             | 22 |
| Figura 8. Condiciones logísticas y de terreno para la planta de reciclaje químico .....                                               | 34 |
| Figura 9. Barreras y oportunidades para la implementación de la planta de reciclaje químico .....                                     | 39 |

## Siglas y acrónimos

|               |                                                                |
|---------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>CAPEX</b>  | Capital Expenditure (Gastos de capital)                        |
| <b>CVC</b>    | Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca              |
| <b>DANE</b>   | Departamento Administrativo Nacional de Estadística            |
| <b>MADS</b>   | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible                 |
| <b>MIO</b>    | Masivo Integrado de Occidente                                  |
| <b>OCDE</b>   | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos    |
| <b>OPEX</b>   | Operating Expenses (Gastos operativos)                         |
| <b>PET</b>    | Tereftalato de polietileno                                     |
| <b>PGIRS</b>  | Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos                 |
| <b>PNGIRS</b> | Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos |
| <b>POT</b>    | Planes de Ordenamiento Territorial                             |
| <b>PVC</b>    | Policloruro de vinilo                                          |
| <b>PE</b>     | Polietileno                                                    |
| <b>PP</b>     | Polipropileno                                                  |
| <b>REP</b>    | Responsabilidad extendida del productor                        |

## Introducción

Colombia ha avanzado de manera sostenida en la formulación de un marco normativo orientado a la gestión responsable de los residuos plásticos. La Resolución 1407 de 2018, modificada por la Resolución 1342 de 2020, establece que los productores deben formular e implementar planes de gestión ambiental para los residuos de envases y empaques, incluidos aquellos fabricados con plástico, y cumplir metas progresivas de aprovechamiento que aumentan del 10 % en 2021 al 30 % en 2030. Asimismo, la Ley 2232 de 2022 y la Resolución 0803 de 2024 fortalecen las disposiciones orientadas a reducir la generación y mejorar la gestión posconsumo de determinados productos plásticos de un solo uso.

La experiencia en el aprovechamiento de residuos plásticos ha permitido identificar que una parte importante de estos residuos generados, en particular los compuestos por polipropileno (PP) y polietileno (PE), no puede ser gestionado de manera eficiente mediante métodos de reciclaje mecánico convencionales. En vista de lo anterior, una planta de reciclaje químico permitiría ampliar las alternativas de valorización para corrientes plásticas que, por su composición, contaminación o mezcla de polímeros, presentan dificultades para ser procesadas mediante reciclaje mecánico, configurándose como una solución alternativa para contribuir al cumplimiento del marco regulatorio vigente en Colombia.

En este contexto, el Valle del Cauca reúne condiciones particulares que lo posicionan como un territorio con alto potencial para el desarrollo de una iniciativa de este tipo. Por un lado, conforme a los datos de generación de residuos sólidos, para el departamento se estima una generación de PP y PE posconsumo que oscila entre las 16.000 y 27.000 toneladas anuales, volumen que es comparable con la demanda anual de una planta de reciclaje químico. Además, el Valle cuenta con una base institucional activa en materia de recuperación en la que operan más de 3.000 recicladores de oficio que se ordenan en organizaciones y cuentan con rutas de reciclaje establecido, además de la existencia de colectivos REP en el territorio, lo que favorece la recuperación efectiva de los plásticos susceptibles de aprovechamiento y reduce el volumen que actualmente termina en sitios de disposición final.

En vista de la necesidad de fortalecer la gestión integral de residuos en el departamento, promover la transición hacia esquemas de economía circular que permitan reducir la disposición final, optimizar el uso de recursos y generar valor a partir de residuos que actualmente no son aprovechados, el presente informe tiene como objetivo evaluar la factibilidad preliminar para la implementación de soluciones de valorización de residuos en el Valle del Cauca, específicamente a través de iniciativas de reciclaje químico de residuos plásticos, particularmente polietileno (PE) y polipropileno (PP).

Metodológicamente, el análisis desarrollado consideró, en una primera etapa, la identificación de los flujos de residuos plásticos del PP y PE disponibles en el Valle del Cauca. Posteriormente, se realizó un benchmarking de experiencias relevantes a nivel internacional, permitiendo identificar modelos de operación, procesos tecnológicos, principales productos y subproductos, así como los requerimientos de infraestructura asociados. Asimismo, se llevó a cabo un análisis preliminar de inversión (CAPEX) y costos operativos (OPEX), junto con una estimación de capital humano necesario para la operación de las plantas.

A partir de esta revisión general, se realizó una adaptación de los principales elementos técnicos, operativos y económicos para la habilitación de una planta de reciclaje químico en el contexto del Valle del Cauca, incorporando consideraciones específicas relacionadas con la disponibilidad de residuos, condiciones logísticas, entorno normativo y viabilidad de implementación para cada una de las iniciativas analizadas.

Cabe señalar que el análisis presentado corresponde a un nivel de prefactibilidad, basado en información secundaria, supuestos técnicos y referencias de benchmarking nacional e internacional. En este sentido, los resultados deben ser entendidos como una aproximación inicial para la toma de decisiones, la cual podrá ser profundizada en etapas posteriores mediante estudios de ingeniería de mayor detalle, validaciones en terreno y análisis financieros más específicos.

## 1. Marco conceptual

En el contexto de gestión de residuos plásticos destacan dos grandes rutas de valorización del material, las cuales se describen a continuación:

El reciclaje mecánico constituye actualmente la ruta más extendida para el aprovechamiento de residuos plásticos, debido a su mayor grado de madurez tecnológica, menores requerimientos energéticos relativos y costos de inversión comparativamente más bajos. Este proceso consiste en la recolección, clasificación, trituración, lavado y reprocesamiento del plástico para transformarlo en nuevos productos y es particularmente efectivo con los plásticos como el PET y el PVC. Entre sus principales ventajas se encuentran la reducción directa del consumo de resinas vírgenes, menores emisiones asociadas frente a la producción primaria y la posibilidad de integrarse fácilmente en cadenas de valor existentes. No obstante, presenta limitaciones técnicas relevantes: requiere flujos relativamente homogéneos y limpios, es sensible a la contaminación y a la degradación del polímero, y suele implicar una pérdida progresiva de propiedades mecánicas (downcycling), lo que restringe el número de ciclos de reciclaje y las aplicaciones finales [1], [2].

Por otro lado, el reciclaje químico se basa en la descomposición de residuos plásticos mediante calor, presión o catalizadores en sus componentes moleculares básicos, permitiendo convertirlos de nuevo en plásticos vírgenes de alta calidad. Entre sus ventajas se destaca su capacidad para tratar fracciones que no son técnicamente viables en el reciclaje mecánico, así como su potencial para cerrar ciclos materiales en aplicaciones de alto valor (incluyendo grado alimentario, bajo ciertas condiciones regulatorias). Sin embargo, estas tecnologías presentan mayores requerimientos de inversión y consumo energético, complejidad operativa y desafíos en términos de viabilidad económica a escala comercial. Además, su desempeño ambiental depende significativamente de la eficiencia del proceso y de la fuente energética utilizada, lo que exige evaluaciones de ciclo de vida para determinar su contribución neta a la sostenibilidad [1], [2].

Dentro de los principales plásticos susceptibles a ser valorizados mediante reciclaje químico están el polipropileno (PP) y el polietileno (PE), así como sus derivados. Estos representan el 36% y el 25% de la producción mundial de plástico, respectivamente [3], lo que implica que poco más del 60% del plástico producido es susceptible a ser reciclado químicamente. En contraste, el PET y el PVC, ambos plásticos mejor aprovechados mecánicamente, solo representan cerca del 25% de la producción [3].

Para el caso de Colombia, un estudio de la ANDI muestra que el 80% de los plásticos flexibles puestos en el mercado colombiano son PE o PP, mientras que entre los plásticos no flexibles el 39% corresponde a estos dos tipos [4]. Estos datos muestran que la mayoría de los residuos plásticos que se generan podrían ser reciclados químicamente, agregando la ventaja de poder reciclar plásticos contaminados o mezclados, lo que facilita el aprovechamiento.

## 2. Marco normativo y señales de política pública

En Colombia, el marco normativo en materia de residuos sólidos se estructura, en primer lugar, a partir de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PNGIRS), la cual establece los lineamientos estratégicos para prevenir la generación de residuos, promover su aprovechamiento y reducir la disposición final en rellenos sanitarios. Esta política adopta la jerarquía de gestión (prevención, reutilización, reciclaje, valorización y disposición) como principio rector y asigna responsabilidades diferenciadas a entidades territoriales, sector privado y ciudadanía. Entre sus principales implicancias se encuentra la necesidad de fortalecer la infraestructura de separación en la fuente, formalizar a los recicladores de oficio y mejorar los sistemas de información para la toma de decisiones, lo que incide directamente en la viabilidad técnica y económica de proyectos de valorización.

Complementariamente, la Estrategia Nacional de Economía Circular amplía el enfoque más allá de la gestión de residuos, promoviendo la reincorporación de materiales en los ciclos productivos, el ecodiseño y la innovación tecnológica. Esta estrategia introduce señales de política orientadas a transformar los modelos lineales de “producir-usar-desechar” hacia esquemas circulares, fomentando la simbiosis industrial, la eficiencia en el uso de recursos y la creación de nuevos mercados para materiales secundarios. En términos prácticos, esto implica incentivos regulatorios y programáticos para aumentar las tasas de aprovechamiento y reducir la presión sobre materias primas vírgenes, generando un entorno favorable para inversiones en tecnologías de reciclaje.

En el caso específico de envases y empaques, la Resolución 1407 de 2018 reglamenta el esquema de responsabilidad extendida del productor (REP), obligando a fabricantes e importadores a organizar y financiar sistemas de recolección y aprovechamiento de los residuos que ponen en el mercado [5]. La norma establece metas obligatorias, progresivas y verificables de aprovechamiento crecientes (10% en 2021, con un crecimiento de 2-3% anual para llegar al 30% en 2030), cuyo incumplimiento puede acarrear sanciones administrativas (hasta 5.000 SMMLV). Estas metas generan una demanda asegurada de material recuperado y promueven la articulación entre productores, gestores y recicladores, al tiempo que incentivan mejoras en diseño para facilitar la reciclabilidad.

En el Valle del Cauca operan varios planes colectivos relevantes. Por ejemplo, el plan RELIC, liderado por la Asociación Colombiana de Empresas Licoreras (ACIL), agrupa a las industrias licoreras de Cundinamarca, Boyacá, Meta, Cauca y del Valle del Cauca, gestionando los envases del sector de licores [17]. Además, la empresa Ecocircular promueve el plan ConexiónREP, con presencia en el Valle (tiene un “hub” en Yumbo), orientado a pequeñas industrias con estrategias de reciclaje y reuso [7]. A nivel nacional, Red Reciclo también cubre el Valle como parte de su operación. En la práctica, esto significa que en el departamento hay centros de acopio, cooperativas y gestores que canalizan plástico de envases hacia plantas de reciclaje o transformación.

Una planta de pirolisis puede incorporarse a estos sistemas aliándose con gestores locales. Al ser una “empresa transformadora” (art.15 de la Res.1407), debe inscribirse ante la autoridad ambiental correspondiente y reportar su capacidad de procesamiento. Con esa formalidad, puede suscribir convenios con planes colectivos o con las empresas de aseo municipales para recibir plástico posconsumo separado por fuente. De este modo, la planta contribuiría al cumplimiento de las metas REP: por un lado, compraría el plástico reciclable recolectado (asegurando su suministro continuo de 50 ton/día); por el otro, incrementaría el aprovechamiento reportado por los productores asociados. En síntesis, la planta puede articularse con los sistemas REP locales (p.ej. unirse como transformadora a planes como ConexiónREP o RELIC y coordinar con los gestores locales) para asegurar un flujo estable de materia prima plástica postconsumo.

En términos de demanda, la Ley 2232 de 2022 genera dos efectos relevantes para una planta de pirolisis. Por un lado, reduce la aceptación regulatoria y social de los plásticos de vida útil corta que no cuentan con rutas claras de aprovechamiento, lo que obliga a las empresas a demostrar mejores prácticas de gestión posconsumo. Por otro lado, incentiva la búsqueda de materiales reciclados nacionales y soluciones de reincorporación de residuos plásticos a cadenas productivas. En ese contexto, una planta de reciclaje químico puede contribuir a cerrar

brechas para materiales de PP y PE que no logran insertarse en cadenas de reciclaje mecánico, siempre que el proceso demuestre beneficios ambientales, trazabilidad del origen de los residuos y un destino verificable para los productos resultantes, como aceites pirolíticos, ceras u otros insumos con potencial de reincorporación industrial.

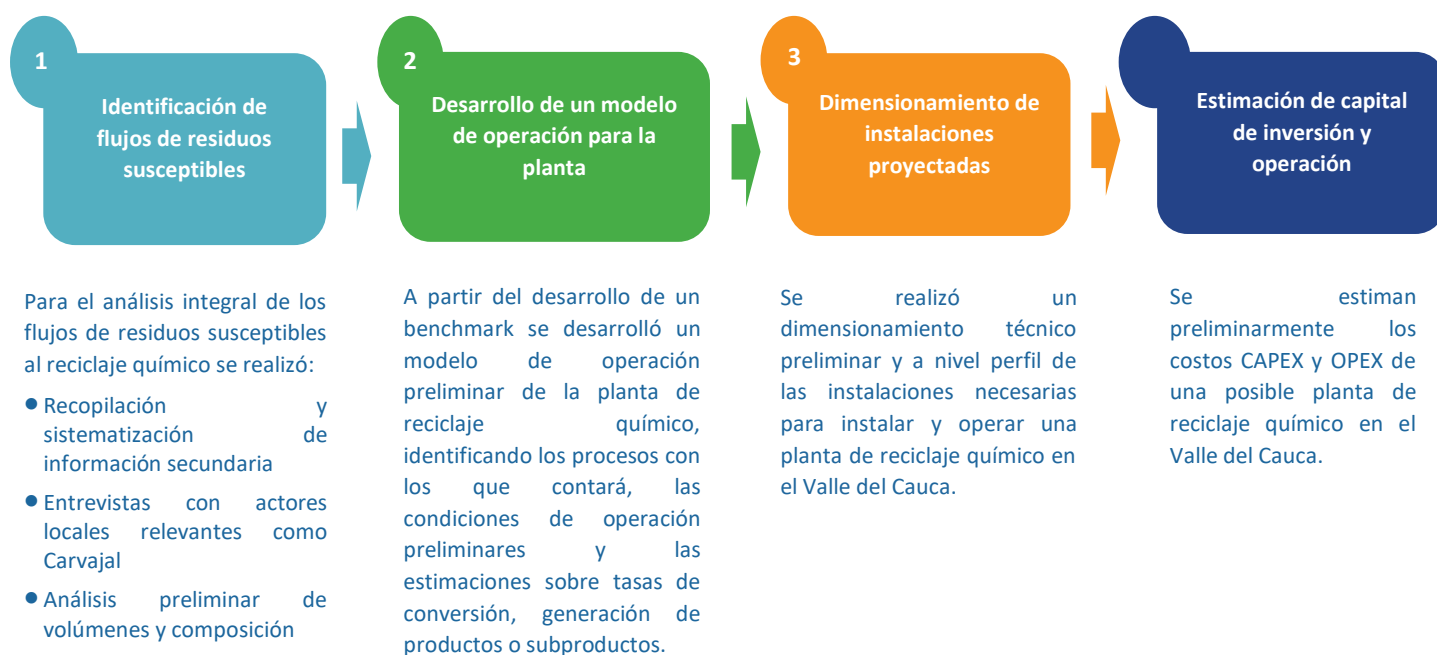
Además, el CONPES 3874 de 2016, que establece la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, constituye un marco de política pública que promueve la transición desde un modelo centrado en disposición final hacia uno basado en prevención, aprovechamiento, tratamiento, innovación tecnológica y economía circular. Este instrumento reconoce la necesidad de fortalecer mercados para materiales aprovechables, mejorar la separación en la fuente, aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios, formalizar cadenas de reciclaje y promover infraestructuras regionales de tratamiento y valorización. En consecuencia, una planta de pirolisis se alinea con los objetivos de política pública nacional al ofrecer una alternativa tecnológica para reducir la presión sobre rellenos sanitarios y ampliar la capacidad regional de aprovechamiento de residuos plásticos.

En conjunto, este entramado normativo configura señales claras de política pública. Por un lado, impone obligaciones cuantificables al sector productivo, y, por otro, crea condiciones para el desarrollo de infraestructura y tecnologías de aprovechamiento. Las metas obligatorias asociadas a la ley REP, sumadas a los lineamientos del PNGIRS y a la visión sistémica de la Estrategia de Economía Circular, incrementan la presión regulatoria para valorizar mayores volúmenes de residuos, lo que puede favorecer tanto el fortalecimiento del reciclaje mecánico como la incorporación complementaria de soluciones tecnológicas, incluido el reciclaje químico, cuando estas contribuyan al cumplimiento eficiente y ambientalmente sostenible de los objetivos nacionales.

### 3. Metodología

Para evaluar la factibilidad preliminar de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca se consideraron los siguientes pasos metodológicos:

Figura 1. Pasos metodológicos de la Fase 5



Fuente: Elaboración propia

#### 3.1. Identificación de flujos de residuos susceptibles

Esta etapa metodológica se orientó a la estimación técnica de la generación y disposición de residuos sólidos en el Valle del Cauca, con el fin de determinar la fracción plástica con potencial para ser integrada en procesos de reciclaje químico. Para ello, se desarrolló un proceso de recopilación, contraste y sistematización de información secundaria proveniente de diversas fuentes institucionales y técnicas. Se revisaron estudios académicos y artículos científicos sobre gestión de residuos y economía circular, informes internacionales como los de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), así como comunicados y documentos técnicos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

A nivel territorial, el análisis se nutrió de los diagnósticos de caracterización física contenidos en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de los municipios del departamento, así como de los reportes de sostenibilidad de actores industriales estratégicos con presencia regional, tales como Ecopetrol. Adicionalmente, se hizo uso de los reportes de la Superintendencia de Servicios Públicos (Superservicios) para dimensionar el flujo de plásticos aptos para reciclaje químico en Valle del Cauca.

#### 3.2. Desarrollo de un modelo de operación para la planta de reciclaje químico

El desarrollo del modelo técnico partió del análisis de experiencias internacionales de plantas de reciclaje químico en los países considerados en el benchmarking. Esta revisión permitió identificar las configuraciones operativas más utilizadas, los requerimientos de acondicionamiento de los residuos plásticos, las tecnologías de conversión

aplicadas según la naturaleza de los polímeros y las capacidades de procesamiento implementadas en instalaciones de referencia.

A partir de estos antecedentes, se determinaron los componentes y criterios técnicos necesarios para el funcionamiento de una planta de reciclaje químico, incluyendo las etapas de preparación de la materia prima, estabilización de la carga y selección de rutas de conversión mediante pirólisis o gasificación. Estos aprendizajes constituyeron el principal insumo para formular un modelo adaptado a las características de los residuos disponibles, las condiciones operativas y el contexto territorial del Valle del Cauca.

### **3.3. Dimensionamiento de instalaciones proyectadas**

En esta etapa se desarrolló un dimensionamiento conceptual preliminar de la infraestructura requerida para la puesta en marcha de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca, con el fin de establecer los requerimientos espaciales y operativos necesarios para un funcionamiento seguro y eficiente. Tomando como insumos los volúmenes de residuos priorizados estimados en el primer paso metodológico.

Este ejercicio no corresponde a un diseño de ingeniería de detalle, sino a una aproximación técnica de orden de magnitud, construida a partir de referencias bibliográficas, estudios técnicos y experiencias comparables de plantas de pirólisis y tecnologías asociadas. Con base en los rangos de capacidad típicamente observados en instalaciones similares, se identificaron escalas operativas coherentes con el potencial regional de residuos.

Finalmente, estos resultados constituyen un dimensionamiento conceptual y de perfil que orienta la pre-factibilidad de la planta, proporcionando estimaciones iniciales de capacidad y esquemas funcionales. Este nivel de análisis permite identificar requerimientos tecnológicos y espaciales preliminares, pero deberá complementarse posteriormente con un estudio de factibilidad más robusto, que considere información detallada sobre flujos de residuos, disponibilidad tecnológica, modelo de negocio, permisos ambientales y ordenamiento territorial, antes de avanzar a la ingeniería de detalle y la definición final de costos e infraestructura.

### **3.4. Estimación de capital de inversión y operación**

Esta actividad tuvo como objetivo realizar una estimación económica preliminar para una eventual planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca, proporcionando una referencia financiera inicial que permita evaluar su viabilidad conceptual.

La estimación se estructuró a partir de los rangos de capacidad definidos en el dimensionamiento preliminar y se apoyó en información secundaria proveniente de literatura técnica, reportes sectoriales, estudios comparables y referencias de mercado para tecnologías de reciclaje químico (por ejemplo, pirólisis). El ejercicio no corresponde a un modelo financiero de ingeniería de detalle, sino a una aproximación de orden de magnitud orientada a comprender la escala económica del proyecto.

Para la estimación del CAPEX se consideran, de manera agregada, los principales componentes típicos de este tipo de instalaciones, tales como:

- Adecuación de terreno y obras civiles.
- Adquisición e instalación de equipos de pretratamiento y reacción.
- Sistemas auxiliares (almacenamiento, manejo de subproductos, control y seguridad).
- Infraestructura eléctrica y servicios complementarios.

En cuanto al OPEX, se incorporaron costos recurrentes asociados a:

- Personal operativo y administrativo.
- Mantenimiento de equipos y reposición de componentes.

- Consumo energético y servicios auxiliares.
- Gestión operativa general y manejo de insumos.

El análisis consideró rangos comparativos que permiten reflejar posibles variaciones según la tecnología adoptada y condiciones de mercado, manteniendo siempre el carácter referencial del ejercicio.

El resultado proporciona una estimación preliminar de la magnitud de inversión requerida y de la estructura general de costos operativos, constituyendo un insumo para análisis posteriores de prefactibilidad y evaluación estratégica del proyecto en el contexto del Valle del Cauca.

## 4. Identificación de flujos de residuos plásticos

La determinación de la factibilidad de una planta de reciclaje químico requiere, como paso inicial, el mapeo detallado de los flujos de materiales. En el contexto de Valle del Cauca, este análisis permite dimensionar la infraestructura necesaria y prever la logística de captación. La gestión de estos flujos se fundamenta en la cuantificación de la generación y la trazabilidad hacia los sitios de disposición.

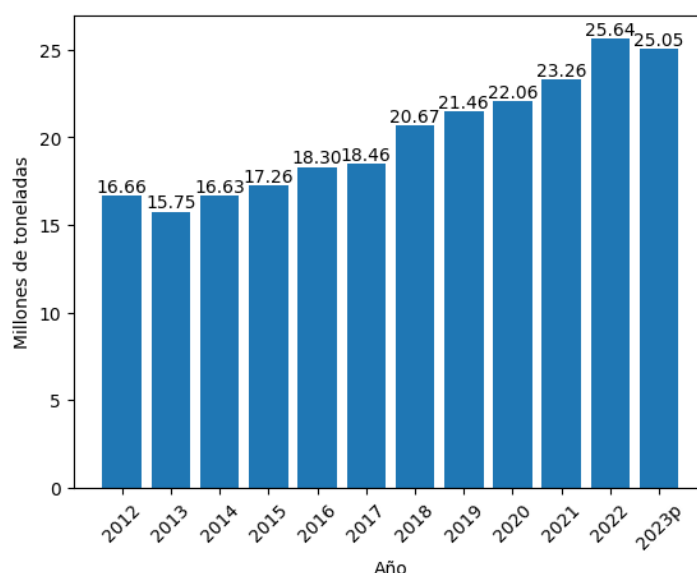
### 4.1. Generación de residuos sólidos y composición plástica

La presente sección analiza la generación de residuos sólidos en Colombia, con énfasis en su distribución sectorial y territorial. A través de la revisión de cifras oficiales y estudios técnicos, se busca identificar cuáles son los principales sectores generadores, la composición predominante de los residuos y la participación relativa del Valle del Cauca en el total nacional. Este análisis permite dimensionar la magnitud del flujo de residuos desde su origen y constituye un insumo clave para evaluar oportunidades de reducción, aprovechamiento y transición hacia esquemas de economía circular.

Como se puede apreciar en la Figura 2 la generación de residuos sólidos ha aumentado considerablemente, subiendo en poco menos de 9 millones de toneladas anuales respecto a los valores registrados a inicios de la década pasada. La tendencia al alza es sostenida, aunque 2023 registra una ligera disminución respecto a 2022. En términos generales, el crecimiento se acelera a partir de 2017, con incrementos más marcados entre 2018 y 2022, periodo en el que se alcanzan los niveles más altos de la serie. Si bien la reducción observada en 2023 no revierte la tendencia estructural creciente, podría estar asociada a factores coyunturales o ajustes en la actividad económica.

En conjunto, la evolución evidencia una presión progresiva sobre los sistemas de gestión y disposición final, lo que refuerza la necesidad de fortalecer estrategias de prevención, aprovechamiento y valorización de residuos.

**Figura 2. Evolución de la generación de residuos sólidos en Colombia (2012-2023)**



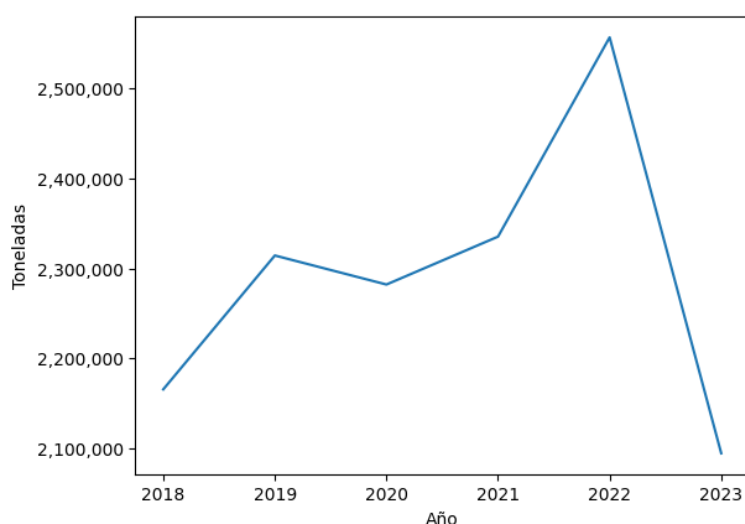
Fuente: Elaboración propia en base a datos de la DANE [8]

El principal generador de residuos sólidos en Colombia es el sector residencial, el cual genera aproximadamente el 40,7% de todos los residuos de Colombia, mientras que las actividades económicas en su conjunto generan el 59,3% restante [8]. De estos residuos, los orgánicos representan más del 50% de todos los residuos generados. El plástico, por su parte, representa entre el 12,8 y el 15% de los residuos que se generan. El papel y el cartón suelen representar menos del 10% de residuos generados, por otro lado, el resto de los materiales como vidrio o metales suelen representar fracciones sumamente reducidas. Cabe agregar que en ciudades como Cali los

residuos que se encuentran mezclados y contaminados pueden llegar a representar un porcentaje importante (entre 10-20%) de los residuos que se producen, lo que dificulta su aprovechamiento [9].

Dentro de los residuos generados en el país, el departamento del Valle del Cauca representa aproximadamente el 15 % del total. Al igual que la tendencia observada a nivel nacional, en el departamento se evidencia un incremento progresivo en la generación de residuos sólidos, asociado al crecimiento poblacional, urbano y productivo. Esta situación adquiere especial relevancia al considerar la composición de los residuos, de acuerdo con muestreos realizados por diferentes municipalidades del Valle del Cauca, los plásticos representan, en promedio, el 14,84 % del total generado. Su participación significativa, sumada a su persistencia en el ambiente y a las dificultades asociadas con su gestión, evidencia la necesidad de fortalecer e implementar estrategias departamentales para la separación, recuperación, reciclaje y aprovechamiento de los residuos sólidos, con especial atención a los materiales plásticos.

**Figura 3. Evolución de la generación de residuos sólidos en Valle del Cauca (2018-2023)**



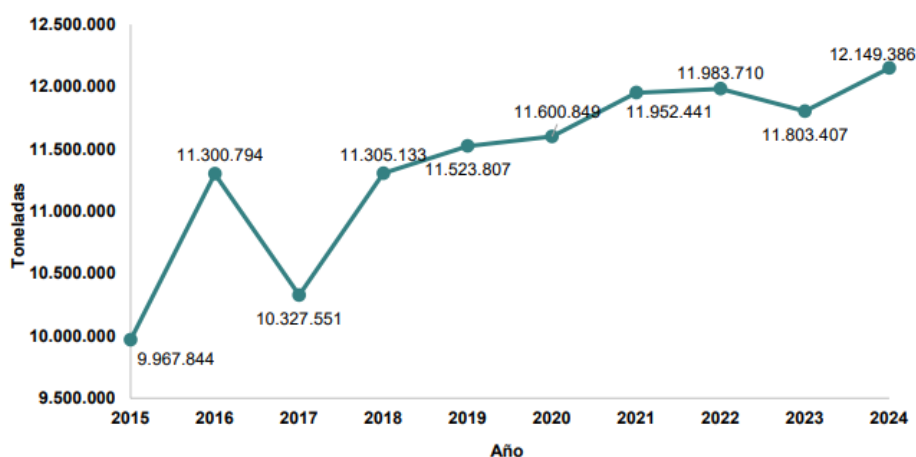
Fuente: Elaboración propia en base a datos de DANE y Superservicios [8], [10]

## 4.2. Disposición actual de residuos sólidos y brechas de aprovechamiento

En Colombia, la disposición total de residuos sólidos ascendió a las 12.149.386 toneladas en 2024, siendo este el número más alto registrado hasta la fecha y presentando un aumento de aproximadamente 3% respecto al 2023. La información presentada en la Figura 4 se evidencia una tendencia históricamente creciente en la disposición de residuos sólidos durante el periodo 2015-2024, aunque con fluctuaciones interanuales relevantes. En 2015 se registraron aproximadamente 9,97 millones de toneladas dispuestas, cifra que aumentó de manera significativa en 2016 hasta superar los 11,3 millones de toneladas. No obstante, en 2017 se observó una reducción importante, alcanzando cerca de 10,33 millones de toneladas. A partir de 2018, la disposición retoma una trayectoria ascendente, con valores que superan los 11,3 millones de toneladas en 2018 y 2019, y continúan incrementándose hasta 2020, cuando se alcanzan aproximadamente 11,6 millones de toneladas.

Durante el periodo 2021-2022 se consolida esta tendencia al alza, registrándose volúmenes cercanos a los 12 millones de toneladas anuales. En 2023 se presenta una ligera disminución, situándose en alrededor de 11,8 millones de toneladas; sin embargo, en 2024 se evidencia un nuevo incremento que lleva la disposición a aproximadamente 12,15 millones de toneladas, es decir, aproximadamente un 50% de los residuos generados terminan en disposición. En conjunto, estos resultados muestran un crecimiento estructural en la cantidad de residuos sólidos dispuestos a lo largo de la última década, lo que plantea retos significativos en términos de capacidad de disposición final y refuerza la necesidad de fortalecer estrategias de reducción, aprovechamiento y transición hacia esquemas de economía circular.

Figura 4. Disposición de residuos sólidos en Colombia



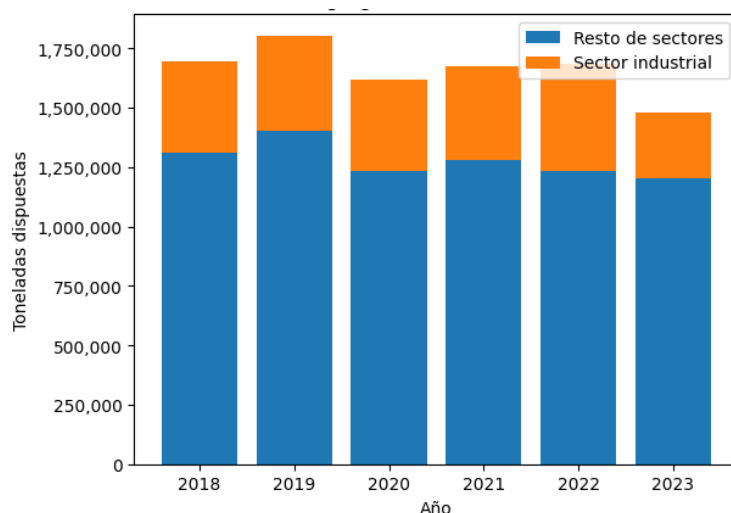
Fuente: [10]

En el Valle del Cauca, la disposición de residuos sólidos ha mostrado un comportamiento relativamente estable en los últimos años, con variaciones moderadas asociadas a dinámicas económicas, demográficas y a cambios en los patrones de consumo. El año 2019 se destacó como el periodo con mayor volumen de residuos dispuestos, reflejando un contexto de alta actividad económica y crecimiento urbano previo a la pandemia. Posteriormente, se observó una reducción en 2020, vinculada a las restricciones sanitarias y a la desaceleración productiva, seguida de una recuperación en 2021 y 2022. Para 2023, los datos evidencian una nueva disminución en la disposición final frente a los años inmediatamente anteriores, lo que podría estar asociado tanto a ajustes en la actividad económica como al fortalecimiento de estrategias de aprovechamiento y separación en la fuente.

En términos sectoriales, el sector residencial continúa siendo el principal generador de residuos sólidos que ingresan al sistema de disposición final, debido a la cobertura del servicio público de aseo y al peso demográfico del departamento, particularmente en áreas urbanas como Cali y su zona metropolitana. No obstante, el sector industrial mantiene una participación relevante, representando de manera consistente más del 20 % del total dispuesto en la mayoría de los años analizados (ver Figura 5) [10], [11], [12], [13]. La única excepción fue la del año 2023, donde este sector representó solamente el 18,7% de la disposición final [10]. Esto se debe tanto a una reducción en la generación de residuos por parte del sector industrial en el Valle como por el aumento del aprovechamiento. En conjunto, estas tendencias sugieren una transición gradual hacia esquemas de gestión más orientados al aprovechamiento, aunque el volumen total dispuesto sigue siendo significativo y plantea retos estructurales para la infraestructura de disposición final del departamento.

Cabe agregar que mientras el 50% de los residuos generados acaban en disposición a nivel nacional, los datos del Valle reflejan un porcentaje mayor, en el que el 50-75% de los residuos acaban en disposición final, dependiendo del año. Esto refleja que existen brechas importantes en el aprovechamiento, particularmente si se compara con los valores nacionales, lo cual es presentado a continuación.

**Figura 5. Disposición de residuos sólidos del sector Industrial con el resto de los sectores en el Valle del Cauca (2018 – 2023)**

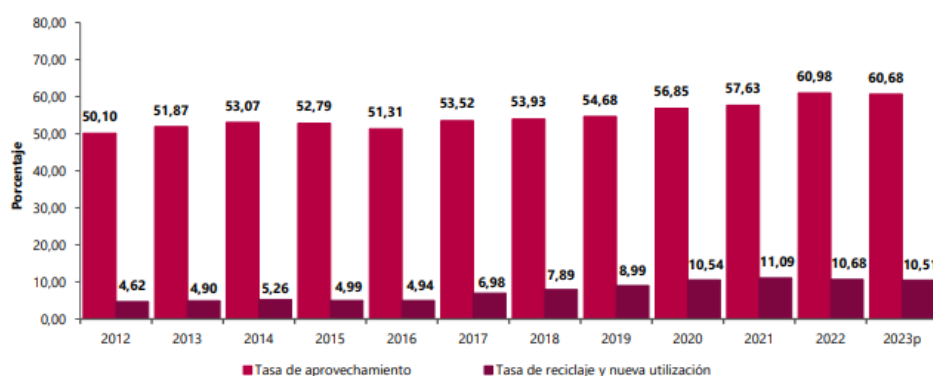


Fuente: Elaboración propia en base a información de DANE, Superservicios e IDEAM y [11][8], [10], [14], [21]

En materia de reciclaje, tal y como se observa en la Figura 6, el reciclaje de residuos sólidos en Colombia fue de 10,51% en 2023, subiendo considerablemente del menos de 5% que se tenía hace una década. Si bien este número está por encima de la media regional de 6%, sigue siendo muchísimo menor que la de los países del Norte Global. El reciclaje de plásticos en Colombia es mayor al reciclaje general, llegando a un 25%. Esto indica que los esfuerzos para reducir el plástico desaprovechado son efectivos, y que la tecnología encargada de este aprovechamiento tiene un potencial significativo.

En lo que respecta al aprovechamiento, tal y como se observa, se ha mostrado un progreso sostenido, pasando de aprovecharse el 50,10% de residuos en 2018 al 60,68% en 2023 [8]. Este incremento de más de diez puntos porcentuales refleja no solo mejoras en la infraestructura y en los esquemas de gestión, sino también un fortalecimiento del marco normativo y de los instrumentos de política pública orientados a la economía circular. Asimismo, sugiere una mayor articulación entre actores públicos y privados, así como avances en la implementación de estrategias de valorización energética, reutilización de materiales y formalización de cadenas de aprovechamiento.

**Figura 6. Tasa de reciclaje y nueva utilización, y tasa de aprovechamiento total nacional**



Fuente: [8]

La combinación de altas tasas de disposición con una fracción plástica significativa impulsa la evaluación de alternativas tecnológicas para complementar al reciclaje mecánico. Ejemplo de esto es el proyecto de reciclaje químico avanzado en el país, el cual representa un hito innovador en economía circular y gestión de residuos

plásticos en Colombia y Sudamérica. Esta iniciativa, que opera desde 2023, aplica tecnologías como la pirólisis para transformar residuos plásticos posconsumo de difícil reciclabilidad en materias primas de alto valor, como aceite pirolítico y polipropileno circular, que pueden reincorporarse en nuevos productos plásticos de calidad equivalente a las resinas vírgenes [15].

En su etapa inicial, el proyecto ha logrado recuperar alrededor de 500 toneladas de residuos plásticos, marcando un avance importante en la reducción de residuos que terminarían en rellenos sanitarios y aportando beneficios sociales y ambientales al integrar a recicladores de oficio en la cadena de valor [16]. Con potencial para ampliar su escala, se espera que este modelo pueda incrementar sustancialmente la cantidad de residuos procesados hasta 25.000 toneladas en 2027 [17] y consolidar una cadena productiva circular en la región, aprovechando plásticos complejos que tradicionalmente no se reciclan mediante métodos mecánicos.

### **4.3. Estimación del flujo de plásticos en el Valle del Cauca**

Con base en los datos de generación y composición presentados en las secciones anteriores, donde el Valle del Cauca representa el 15% de la generación nacional de residuos sólidos y los plásticos constituyen en promedio el 14,84% del total generado en el departamento, es posible estimar la fracción de residuos plásticos susceptible de ser procesada mediante reciclaje químico. Para ello, resulta necesario determinar qué proporción de ese flujo corresponde a PP y PE, los polímeros centrales para los procesos de pirólisis. Según un estudio de la ANDI, el 80% de los plásticos flexibles puestos en el mercado colombiano son PE o PP, mientras que entre los plásticos no flexibles estos dos tipos representan el 39%. Esto indica que la mayoría de los residuos plásticos generados en el departamento son susceptibles de aprovechamiento por esta vía, incluyendo aquellas fracciones mezcladas, contaminadas o en formatos multicapa que no tienen salida viable en las cadenas de reciclaje mecánico.

El Informe sectorial de actividad de aprovechamiento de la Superservicios (2024) permite aterrizar esta estimación con datos territoriales desagregados. Según lo reportado, el Valle del Cauca generó 83.755 toneladas de residuos aprovechables en 2024, de las cuales el 32,54% correspondió a plásticos, es decir, aproximadamente 27.250 t/año de material plástico postconsumo. Considerando la composición referenciada anteriormente, donde entre el 60% y el 80% de los plásticos municipales corresponde a poliolefinas (HDPE, LDPE y PP), se estima que entre 16.000-22.000 t/año ( $\approx 44$ -60 t/día) de PP/PE estarían disponibles localmente.

Esto demuestra que existe una cantidad considerable de residuos plásticos que no son fácilmente reincorporables mediante reciclaje mecánico, lo que abre un espacio importante para el uso del reciclaje químico. En particular, las fracciones mezcladas, contaminadas o compuestas por polímeros multicapa representan un desafío técnico y económico para los esquemas tradicionales de valorización. En este contexto, las tecnologías de reciclaje químico pueden ofrecer una alternativa complementaria al permitir la transformación de estos residuos en materias primas secundarias con calidad equivalente a insumos petroquímicos.

## 5. Experiencias internacionales en la implementación de plantas de reciclaje químico

El reciclaje químico ha emergido como una de las soluciones más prometedoras para abordar el creciente problema de gestión de los residuos plásticos, particularmente aquellos derivados de plásticos flexibles y multicapa, que presentan desafíos significativos para el reciclaje convencional.

En la presente sección se analizan diversas plantas de reciclaje químico que operan actualmente a nivel global, con el fin de evaluar las tecnologías, procesos y recursos utilizados para la conversión de plásticos postconsumo en nuevos productos o materiales de valor.

La tabla a continuación resume la información relevante de plantas destacadas, ubicadas en México, Estados Unidos y Sudáfrica, que emplean tecnologías como la pirólisis, extrusión y separación avanzada para procesar diferentes flujos de residuos plásticos. Asimismo, se destacan los productos y subproductos obtenidos, las capacidades de producción y, en algunos casos, las inversiones requeridas, proporcionando una visión comparativa sobre las tecnologías, recursos y la escala operativa de cada planta. Este análisis permite identificar tendencias clave y áreas de mejora en el sector, favoreciendo la innovación y eficiencia en el reciclaje químico.

**Tabla 1. Benchmarking de plantas de reciclaje químico**

| Planta / País                             | Flujos (ton/año) y tipología                                                                                                                                                             | Procesos y Capacidad instalada                                                                                                                                                                                                           | Productos y Subproductos                                    | Recursos (inversión y personal)                      |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Greenback Nestlé (México)</b>          | Plásticos flexibles posconsumo y aluminio.                                                                                                                                               | Capacidad de 3 mil toneladas/año.<br>Alimentación, triturado, extracción de aire, pirólisis, separación.                                                                                                                                 | Aceite pirolítico, carbón y gas.                            | Inversión de 4 millones de dólares.<br>45 empleados. |
| <b>Beston Group (Sudáfrica)</b>           | 3650-5840 toneladas de neumáticos y 2920-3650 toneladas de plásticos /año.<br>Total de 6570-9490 toneladas/año<br>Se recicla neumáticos y plásticos posconsumo (principalmente PP y PE). | Capacidad de 9500 mil toneladas/año.<br>Descarga, pesaje, enfardado, extracción de aire pirólisis.                                                                                                                                       | Gas, acero, aluminio, negro de carbono y aceite pirolítico. | No se encuentran datos públicos.                     |
| <b>ExxonMobil, Texas (Estados Unidos)</b> | 30 mil toneladas/año.                                                                                                                                                                    | Capacidad de 113 mil toneladas/año.<br>Capacidad de 113 mil toneladas/año<br>Procesos: Lavado, triturado, secado, agregación, pirólisis, refinado, purificación, y traspaso del aceite refinado a los procesos de la planta petroquímica | Polímeros y monómeros para nuevo uso.                       | No se encuentran datos públicos                      |
| <b>Alterra, Ohio. (Estados Unidos)</b>    | Plásticos posconsumo.                                                                                                                                                                    | Capacidad de 21.900 toneladas/año.                                                                                                                                                                                                       | Aceite pirolítico                                           | No se encuentran datos públicos                      |

|  |  |                                                                                  |  |  |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------|--|--|
|  |  | Recolección,<br>categorización,<br>extrucción,<br>liquidificación,<br>condensado |  |  |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------|--|--|

Fuente: [47], [48], [50], [51], [, [18]

Las plantas de reciclaje químico como Greenback-Nestlé en México, Alterra en Ohio y ExxonMobil en Baytown siguen procesos similares centrados en la conversión de residuos plásticos complejos en aceite pirolítico de alta calidad. En general, estos procesos involucran la pirólisis, donde los plásticos se descomponen térmicamente sin oxígeno, generando aceite pirolítico, gas y, en algunos casos, residuos sólidos como el carbon black. En el caso de Greenback-Nestlé, el aceite pirolítico generado es utilizado principalmente como feedstock para la producción de nuevos plásticos circulares en lugar de ser enviado a la refinería como combustible. ExxonMobil y Alterra, por su parte, procesan estos aceites en sus propias plantas para convertirlos en productos petroquímicos como etileno y propileno, que luego se usan para fabricar plásticos nuevos bajo esquemas de balance de masa y certificación de contenido reciclado. Estas operaciones están generalmente respaldadas por sistemas de trazabilidad que aseguran que el material reciclado cumple con los estándares de calidad requeridos para entrar a la cadena petroquímica.

En cuanto a los productos generados, el aceite pirolítico es el principal producto de valor en estas plantas. Este aceite se puede destinar a diferentes rutas como combustible para algunas industrias o como feedstock petroquímico para la producción de resinas y plásticos. La planta de Beston en Sudáfrica, que también utiliza la pirólisis, genera aceite pirolítico, carbon black, gas y alambre de acero (cuando procesa neumáticos). Mientras que el aceite pirolítico en Beston se utiliza principalmente como combustible industrial, en ExxonMobil y Alterra, se convierte en insumos para la industria petroquímica. Además, el gas generado en estos procesos a menudo se recircula internamente para proveer energía al sistema, lo que ayuda a reducir costos operativos.

En resumen, estos procesos de reciclaje químico permiten recuperar materiales de valor, contribuyendo a la circularidad y reduciendo la demanda de materiales vírgenes, con aplicaciones tanto en la industria energética como en la petroquímica.

Adicionalmente, en materia de recolección, debe hacerse notar que los medios para acceder a los insumos de cada planta son variados. Por ejemplo, la planta de Greenback en México, dada la falta de separación de los residuos en la fuente, hace contratos con recicladores y centros de acopio locales para obtener insumos adecuados [19]. La planta de ExxonMobil, por su parte, tiene un convenio con Cyclyx International LLC, la cual se encarga específicamente de recibir residuos de empresas y recolectores locales para procesarlos y categorizarlos antes de enviar los productos finales a Exxon para su uso en la planta de reciclaje químico [20]. La planta de Alterra tiene convenios con empresas de recolección de residuos locales para obtener sus insumos, los cuales son tratados dentro de la propia planta [21].

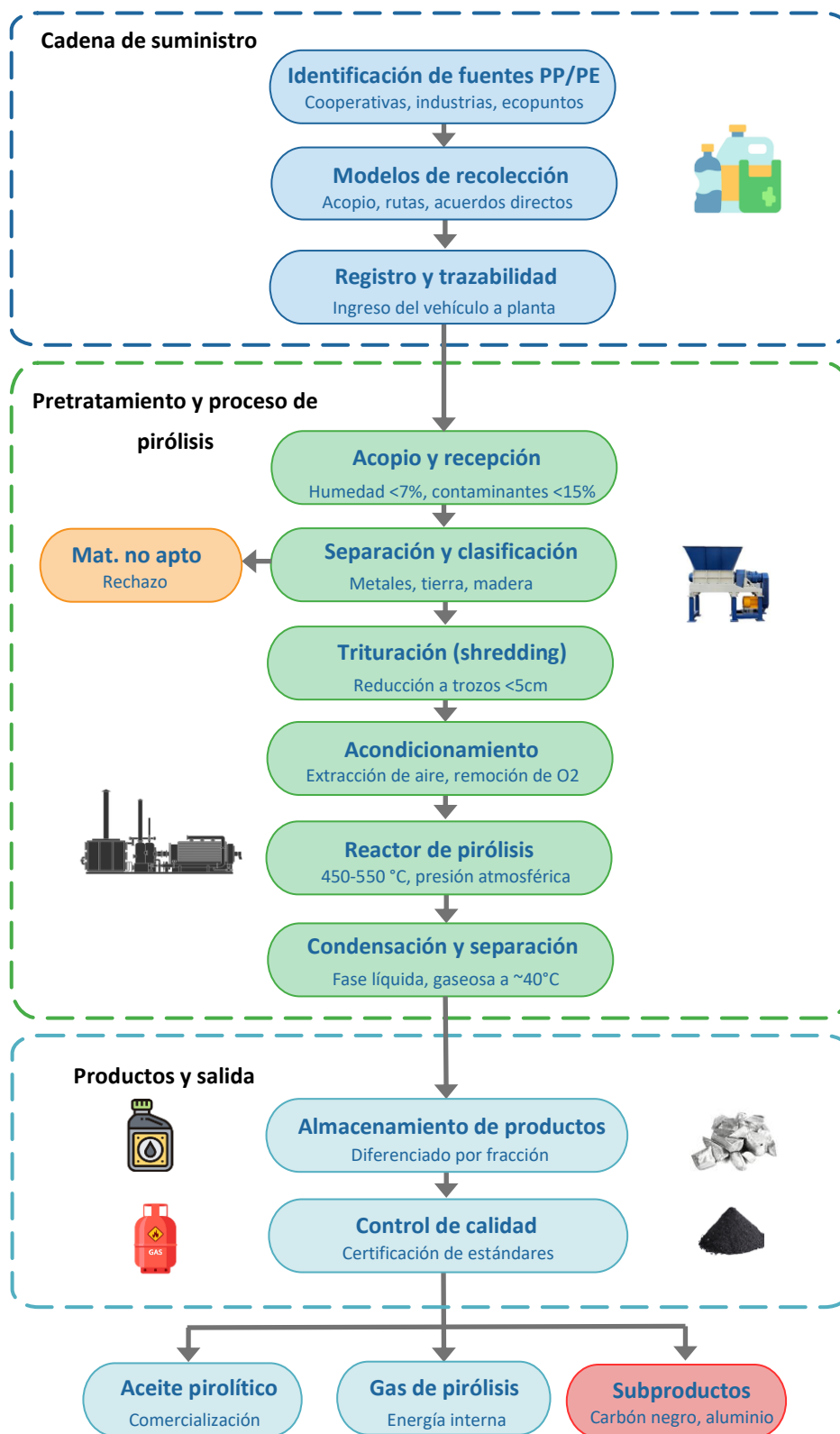
## **6. Modelo de operación de una planta de reciclaje químico**

A partir de la revisión de experiencias internacionales, se presentan a continuación los procesos, productos, subproductos e infraestructura que habitualmente se requieren para la implementación y operación de una planta de reciclaje químico.

### **6.1. Flujograma de procesos**

La Figura 7 ilustra de manera esquemática el funcionamiento de una planta de reciclaje químico mediante pirólisis, proceso mediante el cual residuos plásticos posconsumo e industriales son transformados en productos valorizables a través de la descomposición térmica en ausencia de oxígeno.

Figura 7. Flujograma del proceso de reciclaje químico en una planta



Fuente: Elaboración propia en base a [22]

#### A. Cadena de suministro upstream

El abastecimiento de materia prima para una planta de pirólisis de plásticos requiere la articulación de diferentes actores del sistema de gestión de residuos, con el fin de garantizar un flujo constante y con condiciones de calidad adecuadas. En este contexto, es fundamental establecer acuerdos con cooperativas de reciclaje, generadores industriales, comercios y redes de puntos de acopio.

Las fuentes de mayor calidad corresponden a los generadores industriales y comerciales, particularmente en sectores como el agrícola, farmacéutico y alimentario, donde se generan volúmenes significativos de plásticos tipo PP y PE relativamente limpios (films de empaque, big-bags, entre otros). Estas fuentes se caracterizan por ofrecer un suministro más estable y homogéneo.

Por su parte, las cooperativas de reciclaje y los recicladores informales recolectan materiales provenientes de hogares y rutas de aprovechamiento. Si bien esta fuente contribuye al volumen total disponible y está respaldada por incentivos normativos (como el Decreto 1381 de 2024 y el Decreto 596 de 2016), su oferta tiende a ser más variable, dependiendo de factores como campañas de recolección y condiciones del mercado [23].

Para estructurar el abastecimiento, se pueden implementar diferentes modelos de recolección:

- **Puntos de acopio o “Ecopuntos”:** redes de recolección donde los ciudadanos entregan residuos a cambio de incentivos, lo que favorece la obtención de material más limpio. Puede requerir apoyo de las municipalidades.
- **Recolección mediante recicladores:** contratación de cooperativas o asociaciones para operar rutas de recolección, con esquemas de pago por tonelada. Entre las ventajas está que fomenta la inclusión social, sin embargo, es difícil la supervisión de calidad.
- **Acuerdos con grandes generadores:** contratos directos con industrias o comercios, que permiten asegurar volúmenes constantes bajo condiciones definidas de entrega.

En todos los casos, se recomienda establecer contratos con criterios claros de calidad (por ejemplo, humedad inferior al 7% y ausencia de materiales no deseados como PVC o PET), así como esquemas de incentivos y planes de contingencia ante variaciones en la oferta.

El material recolectado es transportado hasta la planta de reciclaje químico, donde inicia su proceso de transformación.

## B. Pretratamiento y proceso de pirólisis

Una vez en planta, los residuos ingresan a la etapa de recepción y acopio, donde se verifica el cumplimiento de los criterios de calidad establecidos. En esta fase se controlan variables clave como el contenido de humedad (idealmente menor al 7%) y la presencia de contaminantes, los cuales deben mantenerse en niveles bajos, como referencia, la alianza AEPW indica que es admisible que los residuos estén mezclados con contaminantes totales sin superar el límite de <15% del peso total del residuo [24].

Posteriormente, el material pasa por un proceso de separación y clasificación, en el cual se eliminan elementos no deseados como metales, tierra, madera, etiquetas y otros contaminantes. Para ello se emplean tecnologías como separadores magnéticos y sistemas densimétricos [24].

Una vez limpio, el material es sometido a trituración, reduciendo su tamaño a partículas menores de aproximadamente 5 cm, lo que facilita su manipulación y mejora la eficiencia del proceso térmico. Posteriormente, el material triturado pasa por un sistema de acondicionamiento que incluye la extracción de aire, con el fin de minimizar la presencia de oxígeno y asegurar condiciones adecuadas para la pirólisis.

El material acondicionado pasa a alimentar al reactor de pirólisis, que opera a presión cercana a la atmosférica y temperaturas típicas entre 450 y 550 °C. En esta etapa, los plásticos se descomponen térmicamente en ausencia de oxígeno, generando una mezcla de vapores y residuos sólidos. El proceso puede realizarse en reactores continuos, como hornos rotatorios o de tornillo, donde el material avanza progresivamente mientras es

calentado [25]. La presión de operación es cercana a la atmosférica (101-105 kPa) para evitar ingreso de aire [26].

Los vapores generados son conducidos a un sistema de condensación, donde se enfrían hasta aproximadamente 40 °C, permitiendo la separación de la fracción líquida (aceite pirolítico) de los gases no condensables. Paralelamente, los residuos sólidos (carbón) son extraídos del reactor mediante sistemas mecánicos.

### C. Productos y salida

El proceso de pirólisis genera tres corrientes principales de productos: una fracción líquida (aceite pirolítico), una fracción gaseosa (gas de pirólisis) y una fracción sólida (carbón negro), además de subproductos valorizables como aluminio en caso de estar presente en la alimentación.

El aceite pirolítico constituye el principal producto del proceso, representando típicamente entre el 60% y el 80% en peso de la alimentación, y puede ser utilizado como materia prima en procesos petroquímicos o en la producción de combustibles. Por su parte, el gas de pirólisis, que representa entre el 10% y el 20%, está compuesto por hidrocarburos ligeros (como metano, etileno y propileno) y es generalmente reutilizado dentro de la planta como fuente de energía. La fracción sólida, inferior al 10%, corresponde a un residuo carbonoso (carbón negro) que puede ser valorizado o dispuesto según sus características.

Los rendimientos del proceso pueden variar en función de la composición del residuo plástico y de las condiciones de operación. Por ejemplo, en simulaciones con PE se han obtenido distribuciones cercanas a 81,6% de aceite, 16,3% de gas y 2,1% de sólidos [26], mientras que utilizando muestras de plástico polipropileno (PP) en estado más puro, se reportan valores típicos de aproximadamente 70% de aceite, 24% de gas y 6% de carbón [27]. Estas variaciones reflejan la sensibilidad del proceso frente al tipo de insumo utilizado.

Para una planta con capacidad de procesamiento de aproximadamente 50 toneladas por día utilizando PP y PE, se estiman producciones diarias del orden de 30 a 40 toneladas de aceite, 5 a 10 toneladas de gas y entre 1 y 3 toneladas de sólidos [26].

Desde el punto de vista energético, el proceso presenta una integración interna relevante, ya que una parte significativa del gas de pirólisis generado es reutilizada como combustible para mantener las condiciones térmicas del reactor, reduciendo así la demanda de energía externa. No obstante, se requiere un aporte adicional de combustible, estimado entre 30 y 50 kg por tonelada de plástico procesado, así como un consumo eléctrico del orden de 30 a 35 kWh por tonelada, asociado principalmente a equipos auxiliares como sistemas de transporte, bombeo y control [28].

Finalmente, los productos obtenidos son almacenados y sometidos a controles de calidad para verificar el cumplimiento de especificaciones técnicas, previo a su comercialización o uso posterior, cerrando así el ciclo de valorización de los residuos plásticos tratados.

## 6.2. Productos y subproductos

El proceso de pirólisis de residuos plásticos genera diversos productos y subproductos, que pueden ser reutilizados o comercializados para diferentes aplicaciones industriales. A continuación, se detallan los principales productos y subproductos obtenidos en una planta de reciclaje químico mediante pirólisis, sus precios en el mercado internacional, así como sus usos potenciales:

**Tabla 2. Principales productos y subproductos del reciclaje químico y sus precios en el mercado**

| Productos y subproductos                | Precio de venta por tonelada (USD) |
|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Aceite pirolítico (combustible)         | 500-700                            |
| Aceite pirolítico (insumo petroquímico) | 1200-1400                          |
| Carbono                                 | 120                                |

|          |     |
|----------|-----|
| Aluminio | 120 |
| Acero    | 200 |

Fuente: [54], [29], [29]

## A. Aceite pirolítico

El principal producto generado en la pirólisis de residuos plásticos es el aceite pirolítico. Este aceite es el resultado de la descomposición térmica de los polímeros plásticos y tiene diversas aplicaciones industriales. Aquí se puede diferenciar el uso del aceite como combustible y como materia prima petroquímica. La primera opción no requiere de procesos adicionales y permite la venta del aceite a industrias para su uso directo. La opción de venta a petroquímicas como materia prima requiere de refinamiento y procesos adicionales, los cuales suelen incluir filtración/separación, remoción de contaminantes, hidrotratamiento y refinamiento intermedio.

### Uso como materia prima petroquímica:

El aceite pirolítico de alta calidad es un destilado de residuos plásticos (o de neumáticos) obtenido por pirólisis anóxica. Se caracteriza por ser una mezcla rica en hidrocarburos (parafinas, olefinas, aromáticos) con alto poder calorífico (~43-44 MJ/kg [30]) y densidad relativamente alta (~0,80-0,95 g/cm<sup>3</sup> [31]). Sin embargo, contiene heteroátomos (S, O, N, Cl) y metales en niveles más altos que la nafta virgen, lo que obliga a procesos de hidrotratamiento para cumplir las estrictas especificaciones de los craqueadores petroquímicos.

La composición típica de este aceite incluye 30-40% de hidrocarburos de rango nafténico (C5-C12), ~20-30% diesel (C13-C20) y 10-15% fracciones pesadas (mayores de C20). Contiene parafinas, olefinas, cicloparafinas y aromáticos, además de contaminantes: cloro (proveniente de PVC), oxígeno, nitrógeno, azufre y metales (Zn, Na, K, Ni, etc.) [32]. Por ejemplo, en aceite pirolítico derivado de plástico posconsumo se han medido 137–474 ppm de Cl (muy por encima del límite ~3 ppm tolerado en craqueadores [32]). También se detectan cantidades significativas de O y N que exceden las especificaciones de craqueo. En contraste, la nafta virgen es una fracción ligera (~40-200 °C) con densidad menor (~0,71 g/cm<sup>3</sup>), muy baja en impurezas (S<~25 ppm, Cl<1 ppm) y aromáticos moderados (~7% en volumen [33]). Estas diferencias reflejan que el aceite pirolítico “en crudo” debe purificarse antes de uso petroquímico.

El precio citado (~USD 1.200-1.400/ton) es superior al de la nafta convencional (por ejemplo, ~\$775/T a mayo 2026 [34]), aunque a pesar de ello en Colombia ya se prueba su uso: Ecopetrol (Barrancabermeja) recibió aceite pirolítico de plástico posconsumo para producir propileno grado refinería. No obstante, el mercado objetivo principal serán refinerías y petroquímicas capaces de pretratamiento (hidrotratado/destilación) o craqueadores líquidos. En países con escasa industria petroquímica local (como Colombia), es difícil encontrar un mercado local que aproveche este insumo, por lo que probablemente deba exportarse a complejos mayores (EE. UU., Brasil, México).

### Uso como combustible:

En lo que respecta a este uso, la ventaja residiría en su costo, dado que posee un potencial calorífico casi idéntico al de combustibles tradicionales como el fuel oil pesado o el diésel (43MJ/kg) [35]. Mientras la tonelada de aceite pirolítico se ubicaría en el rango de 500-700 dólares, el diésel asciende a 940 dólares por tonelada, mostrando una tendencia constante y sostenida al alza [36]. Fuel oils como el número 4 ascienden a los 1080 dólares por tonelada [37], por lo que el aceite pirolítico sería notablemente más barato a pesar de tener un rendimiento energético comparable.

**Tabla 3. Comparación de precios de combustible**

| Combustible       | Valor por tonelada |
|-------------------|--------------------|
| Aceite pirolítico | 500-700 USD        |
| Diésel            | 940 USD            |
| Fuel oil N4       | 1080 USD           |

Fuente: Elaboración propia en base a [36], [37]

Industrias como la cementera, plantas de cerámica o ladrillos, fábricas de vidrio, y centrales térmicas podrían hacer uso del aceite pirolítico como combustible. El Valle del Cauca cuenta con diversidad de empresas de estos rubros, como Cementos Argos, Cementos San Marcos, CEMEX, Cerámicas Dicerva, Cerámica Skala, entre otros. En tal sentido, existen diversidad de posibles compradores.

## B. Gas Pirolítico

El gas pirolítico es otro subproducto importante que se genera durante la descomposición térmica de los plásticos y está compuesto principalmente de hidrógeno ( $H_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ).

Dentro de sus usos destaca:

- **Generación de energía:** El gas puede ser utilizado para alimentar un generador eléctrico, produciendo energía para operar la propia planta. Esto mejora la autosuficiencia energética del proceso y reduce la dependencia de fuentes externas de energía.
- **Producción de metanol:** El gas pirolítico también puede ser procesado para la síntesis de metanol, un compuesto químico utilizado en la fabricación de plásticos, disolventes y otros productos químicos industriales.

El metanol (alcohol metílico) es insumo básico en la industria química (resinas, formaldehído, MTBE, etc.) y se usa también como combustible o aditivo. Colombia no cuenta con producción industrial de metanol; la demanda interna (~60–80 kt/año en años recientes) se cubre mayoritariamente con importaciones. Según datos oficiales, la demanda llegó a ~140 kt en 2017 (pico) y se ha movido en un rango ~70 kt/año. Los principales consumidores son plantas de formaldehído, anhídrido acético, y mezcla con combustibles (p.ej. dme, carburantes renovables [38]).

Para la producción de metanol, el gas pirolítico de PP/PE se reformaría con vapor de agua para generar un gas de síntesis ( $CO+H_2$ ) que luego, bajo catalizador  $Cu/ZnO/Al_2O_3$  a 200–300 °C y 40–100 bar, produce metanol [39], [40]. Su rendimiento depende del porcentaje de gas vs. aceite en la pirólisis. Asumiendo un rendimiento de gas de 50–70% del plástico, proporción que se daría en caso el principal producto a comercializar fuera el gas, el metanol resultante rondaría entre 0,4–0,7 t por tonelada de PP/PE, es decir ~20–35 t/día en 50 t/día de plástico [41].

Integrar una unidad de metanol implica considerables inversiones. Los equipos principales son (a) reformador de vapor (reactor de gasificación/reformado con catalizador Ni), (b) reactor de water-gas shift, (c) compresores de gas, (d) reactor(s) de síntesis de metanol (columnas de reactor-catalizador y enfriadores), (e) torres de destilación para purificar metanol y sistema de manipulación de productos. También se requieren intercambiadores de calor, plantas de vapor/agua, instrumentación y tanques [41]. La unidad sintética adicional (reformador de gas, reactor de metanol, compresores, etc.) sumaría decenas de millones de USD en CAPEX (por ejemplo, 80 kt/año requiere ~70–100 M€, sin incluir fuentes externas de  $H_2/CO_2$  [39]) y OPEX significativos [42].

El precio del metanol internacional ha estado en el rango de USD 300–600/ton (USD 0,30–0,60/kg) según volúmenes y pureza. Datos de comercio exterior colombiano indican un precio promedio de importación en los últimos años de ~US\$0,43/kg- 0,5/kg (~1.600–1.900 COP/kg)[38], es decir alrededor de USD 430/ton – 500/ton (aprox. 1,6–1,8 millones COP/ton). En el mercado local puede haber un pequeño margen sobre el CIF importado. No obstante, el precio es volátil y depende de la oferta global de gas natural y de los tipos de cambio.

Como opciones de venta, un pequeño productor local tendría que negociar con fabricantes de derivados químicos (empresas de resinas o solventes), con distribuidores de combustibles o incluso exportar a países vecinos. Dada la falta de oferta nacional, un productor local podría encontrar compradores industriales interesados en abastecerse localmente, especialmente si compite bien en precio con las importaciones. Si bien esta puede ser una opción interesante, debe considerarse que se requieren inversiones adicionales para la

producción del metanol y que las variaciones en el precio de dicho insumo en el mercado nacional serán determinantes a la hora de definir si dicha inversión es viable.

### C. Carbono

El carbono es un subproducto sólido que se genera durante la pirólisis. Este material es esencialmente carbón vegetal y es el residuo no volátil que queda después de la descomposición de los plásticos. Si bien los ingresos secundarios generados por el char no constituyen la principal fuente de rentabilidad, sí contribuyen a mejorar el balance económico general de la planta y a maximizar el aprovechamiento de los residuos tratados. A continuación, se analizan sus usos principales.

#### Uso para carbono activado:

Este es el uso más común de este insumo. El char se vende a empresas químicas para que sea tratado y utilizado en la producción de carbono activado. En este uso, el char suele estar valorado entre los 120 dólares por tonelada, aunque su valor puede aumentar si se procesa para obtener una mayor calidad y dependiendo del mercado regional específico.

Desde el punto de vista técnico-económico, la ruta de carbón activado aparece como la alternativa más directa y coherente con la naturaleza carbonosa del char, siempre que el material alcance propiedades adecuadas de adsorción. La literatura reciente reconoce el potencial de los residuos plásticos, incluidas las poliolefinas, como precursores para materiales carbonosos activados de alta superficie específica, aunque su desempeño depende fuertemente de las condiciones de activación y de la composición del residuo [43], [44].

#### Uso para producción de hidrógeno:

La ruta de gasificación para producción de hidrógeno debe analizarse en dos niveles. Primero, el char puede utilizarse como insumo carbonoso para gasificación, generando un gas de síntesis que, tras etapas de reformado, reacción water-gas shift y purificación, permite obtener hidrógeno. Segundo, existe una ruta más amplia de pirólisis-reformado o gasificación directa de residuos plásticos, donde no solo el char, sino también vapores y gases del proceso, contribuyen a la producción de H<sub>2</sub>. Estudios recientes sobre residuos plásticos mixtos reportan rendimientos de hasta 64,21 kg/hora de hidrógeno a partir de 300 kg/hora de residuos plásticos, equivalentes a cerca de 0,21 kg H<sub>2</sub>/kg de plástico, aunque bajo configuraciones optimizadas y no directamente comparables con una planta convencional de pirólisis orientada a aceite [45]

### D. Metal Recuperado

Durante el proceso de pirólisis, los materiales no orgánicos presentes en los residuos, como el aluminio o el acero, son recuperados eficientemente. La separación de metales, especialmente el aluminio, es una parte integral del proceso.

Dentro de sus usos destaca:

- **Fabricación de nuevos productos de aluminio:** El aluminio recuperado puede ser fundido y reutilizado para producir nuevos productos, como envases, estructuras metálicas y componentes industriales.
- **Reciclaje en la industria automotriz y de construcción:** El aluminio recuperado es de alta calidad y puede ser reincorporado en la industria automotriz y de construcción para la fabricación de piezas y materiales ligeros, reduciendo la necesidad de extraer nuevos metales.

En países de la región como Chile, este metal reciclado suele venderse por 120 dólares la tonelada en el mercado [48]. La recuperación de aluminio y otros metales durante el proceso de pirólisis debe considerarse como un beneficio secundario asociado a la remoción de impropios metálicos presentes en la corriente de PP/PE, y no como una corriente principal de ingresos. En una alimentación de residuos plásticos mezclados, los metales pueden estar presentes como fragmentos de foil de aluminio, tapas, grapas, alambres, envases no separados o elementos metálicos residuales que no fueron retirados durante el pretratamiento. Por ello, su recuperación

dependerá de la calidad de la segregación inicial, de la eficiencia de los sistemas de separación magnética y por corrientes de Foucault, y de la limpieza del residuo metálico obtenido [49].

### 6.3. Infraestructura y dimensionamiento industrial

El dimensionamiento e infraestructura industrial para plantas de reciclaje químico depende de varios factores clave, como la capacidad de procesamiento, los tipos de residuos a tratar, los procesos tecnológicos empleados y los productos finales que se desean obtener. Los datos levantados en el benchmark, que comparan diversas plantas en países como Colombia, México y Estados Unidos, permiten observar las diferencias en las capacidades y configuraciones de las plantas de reciclaje químico a nivel global, proporcionando una guía sobre cómo dimensionar una planta según los requisitos específicos de cada caso. Por ejemplo, las capacidades varían desde 3 mil toneladas/año en México (Greenback), hasta 113 mil toneladas/año en la planta de reciclaje de ExxonMobil en Texas. Esta diferencia en capacidad está relacionada con los procesos específicos de cada planta y la tecnología utilizada. Plantas más pequeñas, como la de Greenback Nestlé en México, emplean procesos más simples y están orientadas a residuos de menor volumen, como plásticos flexibles postconsumo y aluminio. Estas plantas tienden a tener una infraestructura más compacta y menos compleja.

Plantas de mayor capacidad, como la de ExxonMobil (113,000 toneladas/año), requieren infraestructuras más robustas y una tecnología más avanzada que permita procesar grandes flujos de residuos a escala industrial. La infraestructura aquí es considerablemente mayor y se requiere un mayor número de reactores, sistemas de separación y equipos de refinamiento.

En términos de infraestructura industrial, los componentes principales incluyen:

1. **Edificaciones y estructuras:** La planta debe contar con edificios para la recepción y almacenamiento de residuos, zonas de tratamiento químico, reactores para los procesos de pirólisis o gasificación, y espacios dedicados a la separación de productos como el aluminio y el aceite pirolítico.
2. **Equipos y maquinarias:** Las plantas de reciclaje químico requieren equipos especializados como trituradores, reactores de pirólisis, sistemas de separación magnética (para extraer metales), y tromeles para la clasificación por tamaños. La infraestructura energética también juega un papel importante, ya que algunas plantas utilizan el gas pirolítico para generar electricidad y alimentar el proceso, lo que ayuda a reducir el consumo de energía externa, como es el caso de Greenback Nestlé en México.
3. **Sistemas de control y monitoreo:** Las plantas de mayor escala, como las de Eastman y ExxonMobil, requieren sistemas avanzados de control automático y monitoreo en tiempo real para regular parámetros de temperatura, presión y flujo, y asegurar la seguridad y eficiencia de los procesos.
4. **Gestión de residuos y subproductos:** Los subproductos obtenidos del proceso de reciclaje químico, como aceite pirolítico, gas, carbono, y metales reciclados, requieren sistemas adecuados de almacenamiento y distribución. Por ejemplo, el aceite pirolítico puede ser procesado y distribuido a través de sistemas de almacenamiento y tanques de distribución para su venta o reuso industrial, como se observa en las plantas de ExxonMobil y Alterra.

### 6.4. Análisis financiero y de capital humano

El análisis financiero de una planta de reciclaje químico de residuos plásticos o materiales complejos implica la estimación de los requerimientos de inversión (CAPEX) y los costos operacionales (OPEX), que son fundamentales para evaluar la viabilidad económica del proyecto. Este análisis se centra en los aspectos clave de los costos asociados al diseño, construcción, operación y mantenimiento de la planta.

#### 6.4.1. Inversión inicial (CAPEX)

El primer componente del análisis es el CAPEX, que se refiere a los costos de inversión inicial necesarios para la implementación de la planta de reciclaje químico. Estos costos incluyen la adquisición de equipos especializados

como reactores de pirólisis, sistemas de separación, bombas, equipos de destilación, y tecnologías de recuperación química. Además, se deben considerar los costos de diseño, ingeniería, construcción, y puesta en marcha de la planta, así como los gastos en infraestructura, que incluyen la instalación de redes de energía, agua, y desechos, entre otros. También es importante estimar los costos asociados con las licencias ambientales y la normativa vigente que regule la operación de este tipo de plantas.

La cuantificación de estos costos está directamente vinculada a la capacidad de tratamiento de la planta, el nivel de automatización, y la complejidad de las tecnologías empleadas en el proceso. Por ejemplo, una planta de reciclaje químico que emplee procesos avanzados de pirólisis y gasificación para venta a petroquímicas puede tener un CAPEX significativamente mayor que una planta basada en la venta de aceite como combustible. Cabe resaltar que los reactores de pirolisis suelen ser vendidos en conjunto con maquinaria de pre y post-tratamiento, por lo que son incluidas en la tabla como plantas de pirolisis.

**Tabla 4. Estimación referencial de CAPEX para una planta de reciclaje químico**

| Componente           | Subcomponente                 | Unidad | Supuesto                                        | Costo estimado (USD) |
|----------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------------------|----------------------|
| Equipos y maquinaria | Planta de pirolisis (micro)   | unidad | Capacidad: 100-500kg por batch                  | 15k-21k              |
|                      | Planta de pirolisis (pequeña) | unidad | Capacidad: 5-20 toneladas por día               | 300k-2M              |
|                      | Planta de pirolisis (mediana) | unidad | Capacidad: 30-50 toneladas por día              | 1.5-5M               |
|                      | Planta de pirolisis (grande)  | unidad | Capacidad: 50+ toneladas por día                | 5-50M                |
|                      | Planta de pirolisis (masiva)  | unidad | Capacidad de 240 toneladas por día              | 64M                  |
|                      | Unidad de destilado           | unidad | Solo si se busca vender aceite a petroquímicas. | 500k-3M              |
|                      | Trituradora                   | unidad | Suele venir incluida en la planta               | 200k-1M              |
|                      | Compra de maquinaria          |        | Capacidad de 60 toneladas por día               | 2.3M                 |
|                      | Costos directos               |        | Capacidad de 60 toneladas por día               | 6.2M                 |
|                      | Costos indirectos             |        | Capacidad de 60 toneladas por día               | 3M                   |
|                      | Capital de trabajo            |        | Capacidad de 60 toneladas por día               | 1M                   |

Fuente: [57], [58], [57], [50], [50], [58, [50],[59] , [59], [50]], [58]

El costo de inversión (CAPEX) de una planta de reciclaje químico, particularmente basada en tecnologías de pirólisis, varía significativamente en función de la capacidad de procesamiento, el nivel de integración tecnológica y el alcance de las unidades auxiliares incorporadas. En términos generales, existe una relación directa entre la escala de la planta y el monto de inversión requerido, aunque esta relación no es estrictamente lineal debido a la presencia de economías de escala y a la complejidad creciente de los sistemas a mayor capacidad.

En el caso de instalaciones a escala piloto o de prueba, con capacidades del orden de 100 a 500 kg por día, los costos de inversión se sitúan en un rango relativamente bajo, entre USD 15.000 y USD 21.000. Estas plantas

suelen estar orientadas a validación tecnológica, pruebas de laboratorio o desarrollo de modelos de negocio, y no contemplan necesariamente sistemas completos de refinamiento, control de emisiones o automatización industrial avanzada.

A medida que se avanza hacia plantas de pequeña escala, con capacidades entre 5 y 20 toneladas por día, la inversión requerida aumenta considerablemente, situándose entre USD 300.000 y USD 2 millones. En este rango, las plantas ya incorporan equipos industriales básicos, sistemas de alimentación continua y cierto nivel de control operativo, permitiendo una operación comercial inicial. Sin embargo, aún pueden presentar limitaciones en términos de eficiencia, calidad del producto final y grado de automatización.

Para plantas de escala media, con capacidades entre 30 y 50 toneladas por día, el CAPEX se ubica típicamente entre USD 1,5 millones y USD 5 millones. Estas instalaciones suelen contar con configuraciones más robustas, integración de sistemas auxiliares y mayores niveles de estabilidad operativa, lo que permite mejorar la calidad del producto obtenido y la eficiencia del proceso. En este nivel, la planta comienza a aproximarse a estándares industriales más consolidados.

En el caso de plantas de gran escala, con capacidades superiores a 50 toneladas por día, la inversión puede variar ampliamente, desde aproximadamente USD 12 millones hasta más de USD 50 millones, dependiendo del nivel de sofisticación tecnológica, el grado de automatización y la inclusión de unidades adicionales como destilación o upgrading. Por ejemplo, una planta de 60 toneladas por día puede implicar una inversión total cercana a USD 12,6 millones, considerando la suma de costos de maquinaria (alrededor de USD 2,3 millones), costos directos (USD 6,2 millones), costos indirectos (USD 3 millones) y capital de trabajo (USD 1 millón). Este tipo de desagregación evidencia la importancia de considerar no solo el costo de los equipos principales, sino también los gastos asociados a instalación, ingeniería, permisos, puesta en marcha y operación inicial [51].

En escalas aún mayores, como una planta masiva de aproximadamente 240 toneladas por día, la inversión total puede superar los USD 100 millones, considerando tanto el costo de la planta de pirólisis (del orden de USD 64 millones) como los gastos adicionales de construcción, planificación e infraestructura (aproximadamente USD 38 millones). Este tipo de instalaciones corresponde a desarrollos industriales de alta complejidad, generalmente orientados a la producción de insumos con estándares cercanos a la industria petroquímica.

Adicionalmente, es importante considerar que el CAPEX puede incrementarse significativamente cuando se incorporan unidades complementarias, como sistemas de destilación (con costos entre USD 500.000 y USD 3 millones) o equipos de pretratamiento como trituradoras (entre USD 200.000 y USD 1 millón, aunque en muchos casos estos vienen integrados en el suministro principal). Estas unidades permiten mejorar la calidad del producto final y la eficiencia del proceso, pero también elevan la inversión inicial requerida.

En conjunto, estos valores evidencian que el dimensionamiento de la planta es uno de los factores más determinantes en la estimación del CAPEX. No obstante, también influyen variables como la calidad del residuo a procesar, el nivel de refinamiento del producto, la localización del proyecto, los costos de construcción y las exigencias regulatorias. Por ello, los rangos presentados deben entenderse como referencias generales para etapas preliminares de evaluación, siendo necesario un análisis más detallado en fases posteriores de ingeniería para definir con mayor precisión la inversión requerida.

#### **6.4.2. Costos de operación (OPEX)**

Los costos operacionales (OPEX) de una planta de reciclaje químico corresponden a los gastos recurrentes asociados al funcionamiento continuo del proceso de reciclaje, que incluyen tanto el procesamiento de los materiales como el mantenimiento de los equipos y la gestión operativa general de la planta. A diferencia de los costos de inversión inicial (CAPEX), los OPEX se incurren de manera continua a lo largo de la vida útil de la planta y están directamente relacionados con la capacidad de tratamiento, el nivel de utilización de la planta y el grado de automatización y mecanización de los procesos.

En el caso de una planta de reciclaje químico, los costos operacionales están fuertemente influenciados por el consumo energético de los equipos involucrados en el proceso de reciclaje, como los reactores de pirólisis, los sistemas de separación, las bombas de fluidos y los sistemas de destilación. Dado que el reciclaje químico generalmente requiere altas temperaturas y presiones para descomponer los materiales, el consumo de energía puede ser uno de los costos más relevantes, especialmente si se emplean tecnologías de alto rendimiento que demandan energía de manera continua.

Además, los OPEX también incluyen los costos asociados a la operación de maquinaria especializada, que puede ser de alto costo de mantenimiento debido a la complejidad de los sistemas químicos involucrados. La necesidad de contar con personal especializado para operar los equipos y mantener las instalaciones también representa un gasto recurrente importante. Los salarios de los trabajadores, los costos de formación y los gastos generales de personal, como la seguridad y la salud ocupacional, son factores clave dentro del OPEX.

En resumen, los costos operacionales de una planta de reciclaje químico abarcan una amplia gama de gastos recurrentes, incluyendo el consumo energético, el mantenimiento de equipos, la gestión de residuos, la mano de obra, y la seguridad operativa. Todos estos factores deben ser considerados de manera integral para realizar una correcta estimación del OPEX, que a su vez influirá en la viabilidad económica y financiera del proyecto a lo largo de su vida útil. A continuación, se muestra una tabla con OPEX referencial construida a partir de distintas experiencias internacionales en distintos tamaños de planta.

**Tabla 5. Estimación referencial de OPEX para una planta de reciclaje químico**

| Tipo de planta        | Subcomponente                                   | Unidad         | Supuesto                                | Costo estimado (USD) |
|-----------------------|-------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------------|
| <b>Planta pequeña</b> | Mano de obra                                    | -              | Para una planta de 10 toneladas por día | 5.000-8.000 por mes  |
|                       | Agua y electricidad                             | m <sup>2</sup> | Para una planta de 10 toneladas por día | 3.000-5.000 por mes  |
|                       | Mantenimiento de maquinaria                     | m <sup>3</sup> | Para una planta de 10 toneladas por día | 2.000-3.000 por mes  |
|                       | Insumos plásticos                               | Tonelada       |                                         | 180                  |
|                       | <b>Gasto total</b>                              | Año            | Para una planta de 10 toneladas por día | 185.000-257.000      |
| <b>Planta grande</b>  | Gasto total promedio                            |                | Una planta de 85 toneladas por día      | 11.929.750           |
| <b>Planta masiva</b>  | Costos de pretratamiento (excluyendo triturado) | Año            | Una planta de 240 toneladas por día     | 13.000.000           |
|                       | Triturado                                       | Tonelada       | Una planta de 240 toneladas por día     | 420                  |
|                       | Compra de sulfolano                             | Año            | Una planta de 240 toneladas por día     | 10.000.000           |
|                       | Mano de obra y gastos generales                 | Año            | Una planta de 240 toneladas por día     | 9.000.000            |
|                       | Compra de insumos plásticos + triturado         | Año            | Una planta de 240 toneladas por día     | 52.000.000           |
|                       | <b>Gasto total</b>                              | Año            | Una planta de 240 toneladas por día     | 84.000.000           |

Fuente: [50][58, [52], [52], [52], [52], [57]

En ese sentido, el costo operativo de una planta de reciclaje químico con capacidad de procesamiento de 240 toneladas por día se estimaría en aproximadamente USD 84 millones anuales. Este valor permite dimensionar la

magnitud de los recursos requeridos para la operación de una instalación de escala industrial, especialmente cuando esta incorpora procesos continuos, sistemas avanzados de control y etapas de acondicionamiento o refinamiento del aceite pirolítico para obtener productos de mayor valor comercial. Dentro de este costo se incluyen componentes como consumo energético, mantenimiento de equipos, reposición de partes, mano de obra especializada, insumos auxiliares, gestión de emisiones y residuos secundarios, así como costos asociados a la logística interna y abastecimiento de materia prima.

El nivel de gasto operativo se encuentra fuertemente condicionado tanto por el tamaño de la planta como por el grado de refinamiento del aceite pirolítico obtenido. En términos generales, una instalación que se limite a producir un aceite intermedio de menor especificación técnica presentará menores costos de operación que una planta que incorpore procesos adicionales de purificación, fraccionamiento o upgrading orientados a generar combustibles o insumos petroquímicos de mayor calidad. A medida que aumenta la complejidad del tratamiento del producto final, también se incrementan los requerimientos energéticos, el uso de equipos especializados, las necesidades de monitoreo y control, y la exigencia de mantenimiento, lo cual se traduce en un mayor OPEX.

Bajo esta lógica, se estima que el gasto operativo por tonelada procesada podría oscilar entre USD 400 y USD 950. Este rango refleja las variaciones existentes entre tecnologías, configuraciones operativas y calidades de insumo. En el rango inferior se ubicarían plantas con procesos menos complejos, menor refinamiento y alimentación relativamente homogénea. En el rango superior se encontrarían aquellas instalaciones que procesan residuos más heterogéneos o contaminados, o que buscan alcanzar productos finales con mayores exigencias de calidad y, por tanto, requieren un tratamiento más intensivo.

### 6.4.3. Estructura de capital humano

La estructura de capital humano en una planta de reciclaje químico se caracteriza por una combinación de perfiles técnicos, operativos y administrativos, cuya configuración depende en gran medida de la capacidad de procesamiento, el nivel de automatización y la complejidad tecnológica del sistema implementado. En términos generales, estas plantas presentan una organización funcional relativamente compacta en comparación con otras instalaciones industriales de tratamiento de residuos, debido a que gran parte de las operaciones críticas se realizan mediante sistemas automatizados de control y monitoreo [53].

En el nivel operativo, el personal suele concentrarse en funciones de supervisión de procesos, control de variables críticas (como temperatura, presión y flujo), manejo de sistemas de alimentación y descarga, así como en labores de mantenimiento preventivo y correctivo. La presencia de operadores de planta es indispensable, pero su número tiende a ser reducido en instalaciones altamente automatizadas, donde los sistemas de control distribuido y la instrumentación permiten una operación continua con mínima intervención manual. En este contexto, el rol del personal operativo se orienta más hacia la supervisión y la toma de decisiones ante desviaciones del proceso, que hacia la ejecución directa de tareas físicas.

A nivel técnico, se requiere la participación de profesionales especializados en ingeniería química, mecánica, eléctrica e industrial, quienes se encargan de la optimización del proceso, la gestión de la seguridad industrial, el aseguramiento de la calidad del producto y la mejora continua de la operación. Este componente técnico adquiere mayor relevancia en plantas de mayor escala o en aquellas que incorporan etapas avanzadas de refinamiento del producto, donde las exigencias de control, eficiencia y cumplimiento normativo son más estrictas.

En el ámbito administrativo, la estructura suele incluir funciones asociadas a la gestión de operaciones, compras, logística, cumplimiento ambiental, gestión de contratos y comercialización de productos. Aunque este componente no es intensivo en número de personas, resulta clave para asegurar la viabilidad económica del proyecto y la correcta articulación con proveedores y clientes.

Es importante destacar que la estructura de capital humano varía significativamente según el tamaño de la planta. En instalaciones de pequeña escala, es común encontrar equipos reducidos donde un mismo trabajador

puede asumir múltiples funciones, combinando tareas operativas, técnicas y administrativas. En contraste, en plantas de mediana y gran escala, las funciones tienden a estar más especializadas y distribuidas en áreas definidas, lo que permite una mayor eficiencia operativa, pero también implica una mayor complejidad organizacional.

Un rasgo distintivo de las plantas de reciclaje químico es el alto grado de automatización de sus procesos, lo que reduce la necesidad de mano de obra directa en comparación con otras formas de reciclaje. Tecnologías como la pirólisis continua, los sistemas de alimentación automatizada y el monitoreo digital permiten operar con dotaciones relativamente bajas de personal en planta. Sin embargo, esta reducción en el empleo directo suele compensarse parcialmente con la necesidad de personal altamente calificado y con la generación de empleo indirecto en actividades complementarias.

En este sentido, una parte relevante del capital humano asociado a este tipo de plantas se encuentra fuera de la instalación, especialmente en la etapa de abastecimiento de residuos. Es habitual que las plantas de reciclaje químico se articulen con redes de recicladores o sistemas de recolección existentes, quienes cumplen un rol clave en la recuperación, clasificación y suministro de los materiales plásticos. Esta interacción no solo contribuye a asegurar el flujo de materia prima, sino que también puede generar impactos positivos en términos de inclusión económica y fortalecimiento de cadenas de valor locales.

En conjunto, la estructura de capital humano de una planta de reciclaje químico refleja un equilibrio entre automatización tecnológica y necesidades organizacionales, donde la eficiencia operativa se logra mediante sistemas avanzados de control, pero sigue dependiendo de la capacidad del personal técnico y de la adecuada articulación con actores externos para garantizar el suministro y la sostenibilidad del proceso.

## 7. Análisis de prefactibilidad de una planta de reciclaje químico para el Valle del Cauca

En el contexto de la expansión y la sostenibilidad de la industria del reciclaje en el Valle del Cauca, es fundamental realizar un análisis detallado sobre el flujo de residuos que podrían ser procesados en una planta de reciclaje químico. Esta intervención tiene como objetivo determinar el tamaño más adecuado para una planta en este departamento, considerando tanto los volúmenes de residuos disponibles como las capacidades técnicas y logísticas necesarias para su tratamiento eficiente.

A continuación, se presentan los principales aspectos a considerar para la implementación de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca.

### 7.1. Condiciones logísticas y territoriales

La ubicación de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca debe responder a un conjunto de criterios logísticos, territoriales, ambientales y económicos que inciden directamente en su viabilidad técnica, operativa y financiera. La Figura 8 agrupa estos criterios considerados.

**Figura 8. Condiciones logísticas y de terreno para la planta de reciclaje químico**



Para definir la localización de una posible planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca, el primer criterio debe ser la proximidad a los principales centros de generación de residuos plásticos, como lo serían entornos urbanos con alta densidad poblacional. Esto es clave porque la viabilidad de una planta de este tipo depende, en gran medida, de asegurar un flujo constante, suficiente y económicamente transportable de materia prima. En el contexto regional, esto implica priorizar zonas cercanas a Cali y su área de influencia, donde se concentra una alta generación de residuos plásticos posconsumo, lo que constituye una base crítica para el abastecimiento de la planta.

Un segundo criterio fundamental es la posibilidad de articular la planta con la cadena existente de recicladores y centros de acopio. La localización no debería pensarse únicamente desde la lógica industrial, sino también desde la eficiencia del sistema de abastecimiento. Una ubicación cercana a organizaciones de recicladores, bodegas, rutas de aprovechamiento y generadores industriales permite reducir costos de agregación de material, mejorar la trazabilidad del plástico y fortalecer esquemas de inclusión social. En ese sentido, más que la cantidad de residuos disponibles, lo que cobra relevancia es la existencia de una red organizada que facilita su

recuperación, consolidación y entrega hacia la planta. En el caso de Cali, la administración distrital reporta más de 3.000 recicladores de oficio organizados en 34 organizaciones, además de una estructura de rutas de reciclaje ya instalada en numerosos barrios, lo que evidencia una base territorial sólida para la articulación del proyecto como un eslabón complementario a la cadena actual, sin desplazar actores que ya cumplen funciones esenciales [54].

Un tercer criterio es la accesibilidad vial y logística. La planta debería ubicarse en un punto con conexión eficiente a corredores troncales, de forma que facilite tanto el ingreso de residuos como la salida de productos valorizados. En este sentido, resulta preferible una localización con acceso expedito a la red vial principal del departamento y, de ser posible, con articulación hacia nodos logísticos mayores como Buenaventura, dada su importancia para la importación de insumos, la exportación de productos y la conexión con otras cadenas industriales. La accesibilidad no debe evaluarse solo en términos de distancia, sino también en función de la calidad de las vías, restricciones para tránsito de carga pesada, tiempos efectivos de transporte y continuidad operativa durante todo el año [55].

Un cuarto criterio es la disponibilidad de terreno apto para uso industrial. La implantación de una planta de reciclaje químico exige suelos compatibles con actividades manufactureras, suficiente área para la nave de proceso, almacenamiento de insumos, circulación de camiones, zonas de seguridad, eventuales sistemas de tratamiento y áreas de expansión futura. Por ello, conviene priorizar municipios o corredores con tradición industrial y con instrumentos de ordenamiento territorial que contemplen suelo para este tipo de actividades. En ese marco, Yumbo aparece como una referencia especialmente relevante, no solo por su consolidación manufacturera, sino también porque la documentación territorial oficial del municipio y la caracterización regional de la CVC lo reconocen como un nodo industrial destacado del Valle del Cauca, con fuerte presencia de actividades químicas, cementeras y papeleras.

La disponibilidad de servicios públicos e infraestructura complementaria constituye otro criterio fundamental. Una planta de reciclaje químico no solo requiere electricidad y agua en condiciones estables, sino también capacidad para manejo de efluentes, conectividad interna, seguridad industrial y, dependiendo de la tecnología seleccionada, acceso a combustibles auxiliares o gas. En consecuencia, la localización más adecuada será aquella donde ya exista infraestructura industrial consolidada, porque facilita la conexión a redes existentes, simplifica la puesta en marcha y disminuye los riesgos de sobredimensionar inversiones fuera del proceso principal [55].

También debe incorporarse un criterio ambiental y de compatibilidad territorial. La planta debe emplazarse en áreas donde el uso industrial sea permitido y donde no existan restricciones críticas asociadas a protección de cuerpos de agua, áreas ambientalmente sensibles, zonas inundables o cercanía excesiva a asentamientos residenciales. Este aspecto es particularmente importante en una instalación de reciclaje químico, dado que la aceptación social y la viabilidad del proyecto dependerán no solo de su desempeño técnico, sino de la capacidad de minimizar conflictos por percepción de riesgo, emisiones, ruido, tráfico y manejo de materiales. Por ello, la evaluación de localización debe cruzar ordenamiento territorial, condicionantes ambientales y distancia prudente respecto de áreas urbanas densamente habitadas.

Finalmente, la selección del sitio debería considerar criterios económicos e institucionales. Entre ellos destacan el costo del suelo, la facilidad para licenciamiento y permisos, la cercanía a mercados potenciales para los productos obtenidos, y la disposición de las autoridades locales para acompañar iniciativas alineadas con economía circular y transformación productiva. En zonas con condiciones habilitantes desde el punto de vista institucional y de gobernanza, la incertidumbre del proyecto tiende a ser menor. Por eso, para una evaluación preliminar, los territorios más promisorios suelen ser aquellos donde convergen generación de residuos, infraestructura, suelo industrial, servicios y cercanía a actores de la cadena, más que los sitios que solo cumplen uno de estos atributos de manera aislada.

## 7.2. Adaptación tecnológica de la planta

La adaptación tecnológica de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca debe partir del entendimiento de la disponibilidad real de materia prima, así como de las condiciones operativas y de mercado que determinan su viabilidad. En este sentido, tal como se expuso en la sección 4.3, el departamento genera aproximadamente 16-22 mil toneladas anuales de residuos de polipropileno (PP) y polietileno (PE), que constituyen los principales insumos para procesos de reciclaje químico tipo pirólisis.

Si bien el reciclaje químico permite procesar residuos plásticos con mayor grado de mezcla y menor nivel de limpieza que el reciclaje mecánico, sigue siendo necesario un acondicionamiento básico del material para su adecuada transformación. En este contexto, factores como la calidad del residuo, la presencia de contaminantes y las condiciones logísticas del suministro influyen en la cantidad de material que puede ser efectivamente aprovechado.

En términos comparativos, otros materiales plásticos como el PET presentan tasas de aprovechamiento más bajas, cercanas al 26%, debido a que requieren mayores niveles de separación, limpieza y homogeneidad para su reciclaje. En el caso del PP y PE, si bien las exigencias técnicas para su procesamiento son menores en el contexto del reciclaje químico, aún persisten limitaciones asociadas a la baja separación en la fuente, la recolección no diferenciada y la contaminación de los residuos.

Bajo este enfoque, y considerando tanto la disponibilidad de residuos como las experiencias analizadas en el benchmarking internacional, se propone una planta con una capacidad de procesamiento del orden de 50 toneladas por día. Asumiendo una operación de 350 días al año, esto equivale a aproximadamente 17.500 toneladas anuales, lo que representa cerca del 20-25% del volumen total recolectado en el departamento. Esta proporción es consistente con escenarios realistas de captura de mercado, permite reducir el riesgo de desabastecimiento y, al mismo tiempo, asegura una escala suficiente para lograr eficiencias operativas. En términos de disponibilidad de insumos, los volúmenes existentes son del mismo orden de magnitud que la capacidad anual requerida por la planta propuesta (~50 t/día  $\approx$  17.500 t/año). En otras palabras, el Valle del Cauca produce decenas de miles de toneladas de plásticos al año, por lo que en principio existiría flujo suficiente de PP/PE posconsumo para la planta.

Al dimensionar el tamaño de la planta, se deben considerar no solo las capacidades de procesamiento del equipo, sino también la infraestructura logística para la recolección, transporte y almacenamiento de los residuos. La viabilidad del proyecto dependerá en gran medida de la capacidad de articular un flujo constante y homogéneo de material, lo cual implica fortalecer esquemas de clasificación, pretratamiento y acopio. Asimismo, será necesario tener en cuenta las normativas medioambientales locales y las posibilidades de integración con otras iniciativas regionales de reciclaje y sostenibilidad.

Desde el punto de vista tecnológico, la planta estaría basada en un proceso de pirólisis para la conversión de residuos plásticos en productos valorizables, principalmente aceite pirolítico. Este proceso permite tratar mezclas del PP y PE con menor grado de exigencia en pureza respecto a otras tecnologías, lo cual resulta particularmente adecuado en contextos donde la separación en la fuente es limitada. Para ser precisos, el promedio de residuos sólidos contaminados en distintos municipios de Valle del Cauca, según lo reportado en distintos PGIRS, ascendió al 13,4%, siendo Cali la ciudad con la mayor proporción de residuos contaminados con un 29,21% [56], [57], [58], [59], [60], [61]. Adicionalmente, la pirólisis presenta ventajas en términos de modularidad y escalabilidad, facilitando futuras expansiones conforme se consolide la cadena de suministro.

En términos de inversión, una planta de estas características requiere un CAPEX estimado entre 13,3 y 14,8 millones de dólares, en línea con los valores observados en la sección 6.4 para capacidades similares. La composición de esta inversión incluye la adquisición de maquinaria principal, costos directos e indirectos de construcción, así como capital de trabajo inicial, tal como se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6. Estimación referencial del CAPEX de una planta de pirólisis de 50 toneladas por día**

| Tipo de gasto                                          | Costo (USD)                  |
|--------------------------------------------------------|------------------------------|
| Compra de terreno (12.000m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup> | 1.428.441                    |
| Compra de maquinaria                                   | 3.500.000-5.000.000          |
| Costos directos                                        | 5.100.000                    |
| Costos indirectos                                      | 2.500.000                    |
| Capital de trabajo                                     | 830.000                      |
| <b>Gasto total</b>                                     | <b>13.358.441-14.858.441</b> |

Fuente: Calculado en base a [62] [51]

Por su parte, los costos operativos (OPEX) están asociados principalmente al suministro de residuos, consumo energético y de agua, mantenimiento de equipos y mano de obra. Para una planta de esta escala, se estima un rango de operación anual de aproximadamente 6,4 millones de dólares durante los primeros años, cuya desagregación se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 7. Estimación referencial del OPEX de una planta de pirólisis de 50 toneladas por día**

| Tipo de gasto               | Unidad         | Costo anual (USD)          |
|-----------------------------|----------------|----------------------------|
| Mano de obra                | -              | 60.000-96.000              |
| Agua y electricidad         | m <sup>2</sup> | 680.000                    |
| Mantenimiento de maquinaria | m <sup>3</sup> | 120.000                    |
| Insumos plásticos           | Tonelada       | 315                        |
| <b>Gasto total</b>          | <b>Año</b>     | <b>6.372.500-6.408.500</b> |

Nota: Los costos del agua, electricidad y la mano de obra han sido sacados de un análisis de mercado de Invest Pacific.

Fuente: Calculado en base a [50][63][64]

En cuanto al modelo de negocio, se identifican dos rutas principales para la valorización del aceite pirolítico: su refinamiento para la producción de nuevos plásticos o su uso como combustible. Considerando el contexto actual del mercado colombiano, las limitaciones del desarrollo petroquímico local y los costos adicionales asociados al refinamiento, se recomienda priorizar la comercialización del aceite como combustible. Esta recomendación se ve reforzada por las dificultades observadas en iniciativas recientes de reciclaje químico de un conjunto de empresas, donde la producción de plásticos circulares ha enfrentado barreras de competitividad frente a los materiales vírgenes, especialmente por un aumento del 250% en el costo final de empaques reciclados respecto a sus contrapartes a base de plásticos vírgenes.

En este sentido, la valorización energética del aceite pirolítico representa una alternativa más viable en el corto plazo, al requerir menor complejidad tecnológica adicional y permitir una inserción más directa en mercados existentes. El aceite pirolítico puede alcanzar precios entre 500 y 700 USD por tonelada, lo que le permite competir con combustibles convencionales como el fuel oil, cuyo precio se sitúa alrededor de 1.000 USD por tonelada. Este menor precio sugiere un mayor potencial de adopción, particularmente en sectores industriales con demanda constante de combustibles líquidos. Adicionalmente, esta competitividad podría fortalecerse en el futuro en caso de que la legislación colombiana incorpore incentivos para el uso de insumos circulares en procesos productivos.

En lo que respecta a este uso como combustible, industrias como la cementera, plantas de cerámica o ladrillos, fábricas de vidrio, y centrales térmicas podrían hacer uso del aceite pirolítico [65]. El Valle del Cauca cuenta con

<sup>1</sup> El valor estimado corresponde al ajuste del área requerida por el valor de m<sup>2</sup> tomado de un promedio de costos de compra de terrenos con uso industrial en el corredor Yumbo-Palmira al año 2026.

diversidad de empresas de estos rubros, como Cementos Argos, Cementos San Marcos, CEMEX, Cerámicas Dicerva, Cerámica Skala, entre otros. En tal sentido, existen diversidad de posibles compradores.

La ventaja del aceite pirolítico residiría en su costo, dado que posee un potencial calorífico casi idéntico al de combustibles tradicionales como el fuel oil pesado o el diésel. Para ser precisos, mientras la tonelada de aceite pirolítico se ubicaría en el rango de 500-700 dólares, el diésel asciende a 940 dólares por tonelada, mostrando una tendencia constante y sostenida al alza [36]. Fuel oils como el número 4 ascienden a los 1080 dólares la tonelada [37], por lo que el aceite pirolítico sería notablemente más barato a pesar de tener un rendimiento energético comparable [66]

Otro subproducto que podría comercializarse es el gas pirolítico. Si bien este suele ser consumido por la propia planta para su conversión en energía, este gas puede ser usado para la producción de metanol, tal y como se vio anteriormente. Esta opción ofrece ventajas (combustible limpio, uso químico), pero en la escala de 50 t/día su viabilidad económica no está asegurada.

En lo que respecta al char, una planta de 50 t/día podría generar aproximadamente entre 0,35 y 2,0 t/día de char en un escenario de alimentación dominada por PP/PE relativamente limpios, y hasta 7 t/día en escenarios con mayor presencia de impurezas o fracciones plásticas complejas. Para efectos de prefactibilidad, se recomienda trabajar con un rango conservador de 0,5 a 2,0 t/día, sujeto a validación mediante pruebas piloto con la mezcla real de alimentación.

En el caso específico de la planta evaluada, si se considera únicamente la valorización del char generado como subproducto, y se adopta un rango conservador de 0,5 a 2,0 t/día de char, la producción potencial de hidrógeno podría ubicarse referencialmente entre 100 y 600 kg H<sub>2</sub>/día, dependiendo del contenido de carbono fijo del char, la eficiencia de gasificación y la recuperación efectiva de H<sub>2</sub>. Esta alternativa, sin embargo, requeriría inversiones adicionales relevantes en gasificación, tratamiento de syngas, control de contaminantes, separación de CO<sub>2</sub> y purificación del hidrógeno, por lo que debería analizarse como una línea de expansión tecnológica y no como valorización inmediata.

En lo que respecta a aluminio recuperado, para efectos de estimación preliminar, se considera un contenido metálico total de entre 0,2% y 1,0% en peso del flujo de PP/PE alimentado a la planta. Como se mencionó en la sección de subproductos, este metal es un beneficio secundario y no un subproducto principal. A una escala de 50 toneladas por día, equivale a una recuperación potencial de 100 a 500 kg/día de metales. Bajo un escenario medio de 0,5% de contenido metálico, la planta podría recuperar aproximadamente 250 kg/día de metales, de los cuales cerca de 175 kg/día corresponderían a aluminio y 75 kg/día a metales ferrosos u otros metales menores. En términos anuales, considerando 330 días de operación, el potencial total de recuperación metálica se ubicaría entre 33 y 165 toneladas/año.

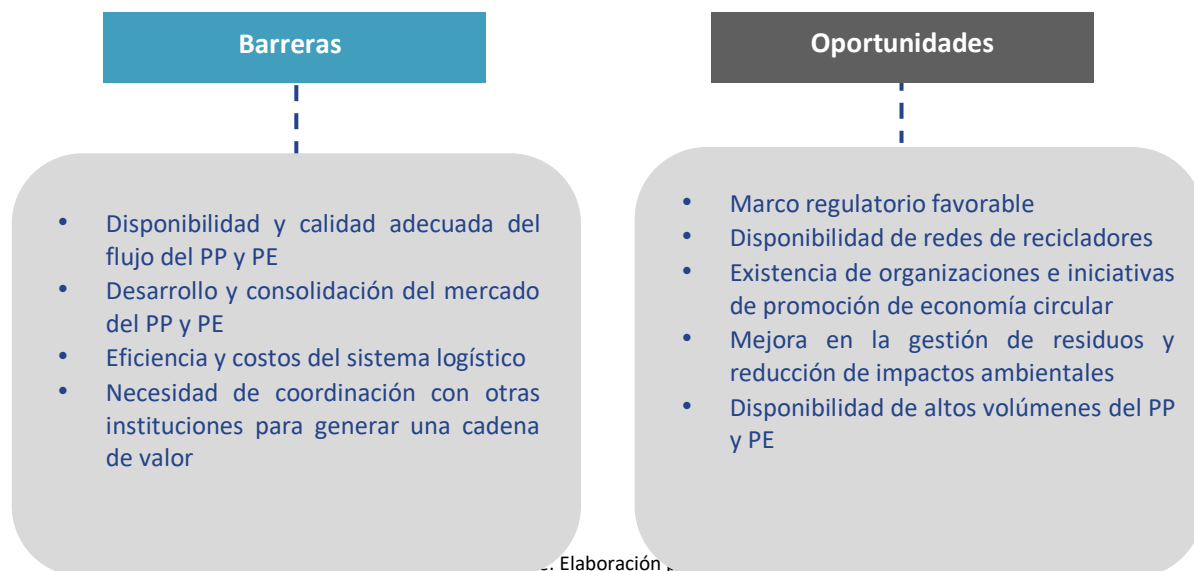
En cuanto al valor de mercado, el aluminio recuperado debe valorarse con descuento frente al aluminio primario internacional, debido a posibles impurezas, presencia de char, humedad o necesidad de limpieza adicional. Como referencia, el aluminio en la Bolsa de Metales de Londres se ubicó alrededor de USD 3.635/t en mayo de 2026 [67]. Para el mercado de acopio en Cali, se estima un precio conservador de referencia de COP 4.500 a 7.000/kg para aluminio recuperado, sujeto a validación mediante cotizaciones locales. Con este rango, el ingreso potencial por aluminio se estima entre COP 104 y 809 millones/año, dependiendo del contenido metálico real de la alimentación y de la calidad comercial del material recuperado.

En conjunto, la configuración propuesta, basada en una planta de escala media, tecnología de pirólisis y un enfoque en la producción de combustibles, permite adaptar el modelo de reciclaje químico a las condiciones específicas del Valle del Cauca, equilibrando la disponibilidad de residuos, los requerimientos de inversión y las oportunidades de mercado.

### 7.3. Consideraciones para la implementación

A continuación, en la Figura 9 se presentan las principales barreras y oportunidades asociadas a la implementación de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca, considerando factores técnicos, logísticos, económicos, ambientales y de mercado que inciden en su viabilidad.

Figura 9. Barreras y oportunidades para la implementación de la planta de reciclaje químico



#### A. Barreras

La implementación de una planta de reciclaje químico en el Valle del Cauca enfrenta, en primer lugar, una serie de barreras estructurales asociadas a la disponibilidad, calidad y trazabilidad de los insumos. Si bien el departamento cuenta con una base territorial e institucional favorable para avanzar en soluciones de valorización de residuos plásticos, ello no implica automáticamente que exista un flujo de entrada adecuado para un proceso de reciclaje químico. Este tipo de tecnología requiere volúmenes constantes, una composición relativamente controlada y menores niveles de contaminación que los que suelen encontrarse cuando la separación en la fuente es limitada o cuando predominan esquemas de recuperación orientados a materiales de valorización inmediata.

En este contexto, una de las principales limitaciones radica en que los materiales que resultan más atractivos para el reciclaje químico suelen ser, precisamente, aquellos que hoy presentan menor valor comercial dentro de la cadena actual de aprovechamiento. Los recicladores de oficio tienden a priorizar residuos con mercado consolidado y rápida salida comercial, mientras que una planta de reciclaje químico demandaría capturar fracciones más complejas, como plásticos mezclados, multicapa o contaminados, que suponen mayores costos de separación, almacenamiento y logística. Por tanto, la existencia de una red de recicladores no elimina por sí sola las restricciones del proyecto; más bien, pone de relieve la necesidad de construir mecanismos específicos que permitan mejorar la calidad del material recuperado y asegurar su suministro en condiciones compatibles con el proceso industrial.

A ello se suman barreras logísticas y de mercado. La información disponible para Cali muestra que, aunque existen rutas de reciclaje establecidas, su cobertura sigue siendo parcial, lo que sugiere que aún persisten brechas en la expansión de la recolección diferenciada y en la consolidación de sistemas de segregación más eficientes. En términos prácticos, esto significa que la viabilidad de una planta no dependerá únicamente de la tecnología seleccionada, sino también de la necesidad de invertir en etapas previas de acondicionamiento, centros de acopio, esquemas de pretratamiento, acuerdos con organizaciones de recicladores y mecanismos que aseguren

regularidad, calidad y trazabilidad del abastecimiento. En ausencia de esta infraestructura complementaria, el proyecto podría enfrentar dificultades para sostener una operación continua y económicamente eficiente [68].

Por último, también se identifican barreras asociadas a la articulación de la cadena de valor. Para que una planta de reciclaje químico sea viable en el territorio, no basta con disponer de residuos; es necesario que existan condiciones para integrar de manera efectiva a los actores que hoy participan en la recuperación y manejo de materiales. En caso contrario, la planta correría el riesgo de insertarse en una cadena fragmentada, con baja coordinación entre generadores, recicladores, centros de acopio y transformadores. Por ello, el desafío no es solo tecnológico, sino también organizacional e institucional, en la medida en que el proyecto requiere una estructura de gobernanza que permita alinear incentivos, distribuir valor y reducir incertidumbres en la provisión de insumos.

## **B. Oportunidades**

Pese a estas barreras, el Valle del Cauca presenta oportunidades reales para el desarrollo de una planta de reciclaje químico, sustentadas en condiciones institucionales, normativas y territoriales favorables. En particular, el marco regulatorio colombiano ha venido promoviendo una mayor gestión de residuos plásticos y de envases y empaques, a través de instrumentos como los mencionados en la sección 2, a los cuales se suman la Ley 2232 de 2022 y su reglamentación mediante el Decreto 2192 de 2023 [69], en la cual se establece un marco normativo que promueve la reducción de plásticos de un solo uso, la sustitución por alternativas sostenibles y, fundamentalmente, el cierre de ciclos de los materiales plásticos mediante el aprovechamiento, que incluye tecnologías como la reutilización, el reciclaje mecánico y químico, la valorización energética y el coprocesamiento. La ley reconoce expresamente el reciclaje químico como una solución válida para reincorporar plásticos al ciclo productivo, lo que permite que plantas de pirólisis puedan operar dentro del marco legal, siempre que sus productos se destinen a la generación de materias primas secundarias o insumos para la industria química.

Asimismo, esta Ley establece mecanismos de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que obligan a los fabricantes e importadores de plásticos a cumplir metas de recolección y aprovechamiento. Esto genera una demanda potencial de servicios de transformación de residuos plásticos, brindando a las plantas de reciclaje químico la posibilidad de asegurar suministro a través de contratos con productores, importadores o sistemas colectivos de gestión de residuos. La ley también promueve líneas de financiamiento e incentivos para proyectos de economía circular, lo que facilita la estructuración de proyectos de inversión en plantas de pirólisis y la obtención de recursos de innovación o crédito verde.

Por su parte, el Decreto 2192 de 2023, que reglamenta parcialmente la Ley, fortalece los Programas de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) municipales e impulsa la formalización de empresas transformadoras de plásticos. Esto crea condiciones para que una planta de pirólisis pueda integrarse en las estrategias locales de aprovechamiento, estableciendo convenios con municipios, asociaciones de recicladores y generadores de residuos. Aunque no regula directamente la operación de plantas de pirólisis ni otorga autorizaciones automáticas, ofrece legitimidad institucional y facilita la articulación territorial de la cadena de suministro de residuos plásticos.

En conjunto, estas disposiciones refuerzan la necesidad de avanzar hacia soluciones complementarias al reciclaje mecánico, especialmente para aquellas fracciones plásticas de difícil aprovechamiento, generando un entorno normativo que favorece la búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas y modelos de negocio en economía circular.

Una oportunidad especialmente relevante es la existencia de una base ya organizada de recuperación de materiales en Cali, principal nodo urbano del departamento. Según la información contenida en el texto base, cerca de 3.000 recicladores de oficio recorren diariamente la ciudad recolectando residuos aprovechables, y esta labor se articula con 34 organizaciones de recicladores de oficio y con rutas de reciclaje establecidas en 108 barrios. Esta realidad indica que el territorio no parte desde cero en materia de recolección diferenciada y

aprovechamiento, sino que ya dispone de una red social y operativa que podría servir como base para esquemas de abastecimiento, acopio y preclasificación más sofisticados. Desde esta perspectiva, la red existente constituye una plataforma sobre la cual podría estructurarse un sistema de suministro adaptado a los requerimientos del reciclaje químico.

Asimismo, desde una perspectiva territorial, se observan señales favorables en el fortalecimiento de capacidades locales para el manejo y transformación de plásticos. La CVC reportó en 2024 la entrega de maquinaria para la transformación de plástico en Bazán Bocana, Buenaventura, junto con compromisos de construcción de centro de acopio y adecuación eléctrica [70]. Del mismo modo, en 2025 se informaron nuevas iniciativas comunitarias de reciclaje en municipios del departamento, con rutas periódicas de recolección y separación de cartón, plástico, vidrio y otros materiales [71]. Aunque estos esfuerzos aún no constituyen una cadena plenamente madura para el reciclaje químico, sí evidencian que existe una base territorial e institucional que podría facilitar el escalamiento progresivo de un sistema de aprovechamiento más robusto y articulado.

En síntesis, el Valle del Cauca combina elementos que hacen plausible el desarrollo de una planta de reciclaje químico: un marco regulatorio que favorece la valorización de residuos plásticos, una red ya existente de recicladores de oficio y organizaciones formalizadas, y experiencias locales orientadas al fortalecimiento del aprovechamiento.

No obstante, estas oportunidades solo podrán traducirse en una factibilidad efectiva si se abordan adecuadamente las barreras identificadas. En ese sentido, la disponibilidad de recicladores debe entenderse no solo como una ventaja operativa, sino también como una condición que exige diseñar el proyecto bajo un enfoque inclusivo y complementario. La planta tendría mayores probabilidades de éxito técnico, económico y social si se concibe como un eslabón que fortalece y amplía la cadena existente, en lugar de operar de forma aislada respecto del trabajo que ya realizan los recicladores locales.

## 7.4. Impacto en emisiones de GEI

El impacto del reciclaje químico mediante pirolisis en la generación de gases de efecto invernadero (GEI) ha sido un tema de creciente interés y debate en el ámbito científico, especialmente en países del Norte Global. Este proceso, que implica la descomposición de materiales orgánicos a alta temperatura en ausencia de oxígeno, ha demostrado tener un potencial significativo para la reducción de emisiones contaminantes, especialmente en el sector de los plásticos.

En varios estudios, como aquellos publicados en la revista científica *Waste Management* [72] o en el informe *Environmental and economic assessment of plastic waste recycling* para la Unión Europea [73], se ha evidenciado que la pirolisis puede ser una alternativa viable para mitigar las emisiones de GEI generadas por los residuos plásticos. La razón principal de este impacto positivo radica en la capacidad de la pirolisis para transformar los plásticos en productos químicos y combustibles valiosos, en lugar de ser enviados a vertederos o incinerados. Este cambio de enfoque contribuye directamente a una menor emisión de metano y dióxido de carbono, dos de los principales GEI.

Sin embargo, la reducción de emisiones depende de varios factores, como la composición del material reciclado, la tecnología de pirolisis empleada y las condiciones operativas específicas de la planta. Algunos estudios muestran que, cuando se implementa correctamente, la pirolisis tiene el potencial de generar menos emisiones que otras técnicas de manejo de residuos, como la incineración tradicional o el vertido en rellenos sanitarios. La eficiencia en la conversión de residuos plásticos en productos útiles, junto con la reducción en el uso de materias primas fósiles, es clave en este proceso.

La reducción de la generación de gases de efecto invernadero (GEI) varía entre 400 y 1.000 kg por cada tonelada de residuos procesados. Esta variabilidad se debe a las diferencias en los tipos de insumos que se someten al proceso de pirolisis [72]. Para ser precisos, las plantas que trabajan con flujos mixtos (distintos tipos de plásticos) son las que muestran la mayor reducción, mientras que plantas donde se trabaja únicamente con PP y PE suelen

tener reducciones menores [74]. Las plantas que trabajan plásticos mixtos evitan entre 600-1.000 kg de emisiones por tonelada, mientras las que trabajan solamente PP y PE reducen entre 400 y 600 kg por tonelada [72], [73]. Esta diferencia está relacionada al nivel de pureza del aceite pirolítico, dado que un aceite de mayor pureza reemplazará a combustibles fósiles en procesos más intensivos. En el caso de una planta dedicada exclusivamente al reciclaje de residuos de polipropileno (PP) y polietileno (PE), se estima que contribuye a una reducción de entre 400 y 600 kg de GEI por tonelada procesada [72], [73]. En este contexto, una planta con capacidad para procesar 50 toneladas diarias generaría una reducción de entre 7.000 y 10.500 toneladas de GEI al año.

## 8. Conclusiones

El análisis de prefactibilidad desarrollado para el Valle del Cauca permite concluir que el departamento reúne condiciones territoriales, institucionales y normativas que hacen plausible la implementación de una planta de reciclaje químico mediante tecnología de pirólisis, aunque con brechas relevantes que condicionan su viabilidad efectiva. El potencial no reside únicamente en la disponibilidad de residuos plásticos, sino en la convergencia de un marco regulatorio favorable, una red de recuperación preexistente y una demanda industrial que puede absorber los productos derivados del proceso. Sin embargo, ninguno de estos factores opera de manera autónoma: su aprovechamiento requiere decisiones de inversión, articulación institucional y un modelo de negocio estructurado con criterios realistas.

En cuanto a la disponibilidad de materia prima, el departamento genera entre 16.000 y 27.000 toneladas anuales de polipropileno (PP) y polietileno (PE) posconsumo, volumen del mismo orden de magnitud que la capacidad anual de la planta propuesta, 50 toneladas por día, equivalentes a aproximadamente 17.500 toneladas al año. Esta correspondencia de escala reduce el riesgo de desabastecimiento y hace técnicamente viable la operación continua de la planta, siempre que se consoliden los mecanismos de recolección, pretratamiento y acopio. No obstante, la disponibilidad de residuos no implica automáticamente su recuperabilidad pues buena parte del PP y PE disponible se encuentra en fracciones mezcladas, contaminadas o dispersas en circuitos informales que aún no están articulados con esquemas de aprovechamiento industrial.

La tecnología de pirólisis se confirma como la opción más adecuada para el contexto del Valle del Cauca. Su capacidad para procesar residuos con mayor heterogeneidad y menor exigencia de limpieza respecto al reciclaje mecánico la posiciona como una solución complementaria, y no sustituta, de los sistemas de aprovechamiento existentes. La pirólisis amplía la frontera del reciclaje hacia fracciones que hoy no tienen salida comercial en el circuito convencional, lo que es especialmente relevante en un contexto donde la separación en la fuente sigue siendo limitada y los flujos de material presentan niveles de contaminación que promedian el 13,4% en los municipios del departamento, llegando al 29,2% en Cali.

El modelo de negocio más viable en el corto plazo es la comercialización del aceite pirolítico como combustible industrial, con precios de referencia entre 500 y 700 USD por tonelada, competitivos frente al fuel oil (1.080 USD/ton) y al diésel (940 USD/ton). El Valle del Cauca cuenta con una base diversa de consumidores potenciales en sectores como cementera, cerámica, vidrio y manufactura pesada, lo que reduce la dependencia de un único comprador y fortalece la posición comercial del proyecto. En contraste, la ruta de producción de plásticos circulares enfrenta barreras de competitividad significativas frente a los materiales vírgenes, que elevan en hasta un 250% el costo final del empaque reciclado, lo que la convierte en una opción de menor viabilidad inmediata sin incentivos regulatorios adicionales.

Desde el punto de vista financiero, la planta propuesta de 50 toneladas por día requiere una inversión inicial (CAPEX) estimada entre 13,3 y 14,9 millones de dólares, con costos operativos anuales (OPEX) del orden de 6,4 millones de dólares. Este dimensionamiento es coherente con referencias internacionales para instalaciones similares y permite evaluar la escala mínima necesaria para lograr eficiencia operativa. Sin embargo, estos valores deben interpretarse como una estimación de prefactibilidad sujeta a validación técnica, no como un modelo financiero definitivo. La rentabilidad del proyecto dependerá en medida significativa del precio efectivo del aceite pirolítico en el mercado local, de los costos reales de aprovisionamiento de materia prima y de los incentivos que el marco regulatorio pueda ofrecer en materia de economía circular.

La localización más favorable para la planta confluye en el corredor industrial Yumbo-Palmira, donde se combinan suelo industrial disponible, infraestructura logística consolidada, servicios públicos adecuados, proximidad a los principales centros de generación de residuos y cercanía a clientes industriales. Yumbo en particular destaca como nodo manufacturero reconocido institucionalmente por la CVC y los instrumentos de ordenamiento territorial del departamento, con presencia de sectores afines como química, cemento y papel.

Esta localización también facilita el acceso al corredor vial hacia Buenaventura, lo que amplía las posibilidades de integración logística y exportación de productos valorizados.

El marco normativo colombiano constituye un habilitador real para este tipo de proyectos. La Resolución 1407 de 2018 y sus modificaciones, la Ley 2232 de 2022, el Decreto 2192 de 2023 y el CONPES 3874 configuran un entorno regulatorio que no solo reconoce el reciclaje químico como alternativa válida de valorización, sino que genera obligaciones cuantificables para productores e importadores mediante esquemas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Estos mecanismos crean una demanda estructural de servicios de transformación de residuos plásticos, lo que representa una oportunidad de contratos de suministro estables con planes colectivos como ConexiónREP o RELIC, que ya operan en el territorio.

La red de más de 3.000 recicladores de oficio organizados en 34 organizaciones y con presencia en 108 barrios de Cali representa un activo territorial diferencial. Sin embargo, esta red no garantiza por sí sola la provisión de insumos con la calidad y continuidad que requiere el proceso de pirólisis. Los recicladores priorizan materiales con mercado establecido e inmediata salida comercial, mientras que el reciclaje químico demanda fracciones de menor valor actual pero mayor complejidad. Esta tensión no es insalvable, pero sí exige diseñar esquemas de articulación específicos, con incentivos económicos y logísticos que orienten parte del flujo recuperado hacia la planta, sin desplazar a los actores que ya cumplen funciones esenciales en la cadena.

Desde la perspectiva ambiental, una planta de 50 toneladas por día de PP y PE podría evitar entre 7.000 y 10.500 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año, al desplazar residuos que de otro modo terminarían en rellenos sanitarios o serían incinerados, y al sustituir parcialmente combustibles fósiles convencionales. Este aporte es modesto en términos de la huella total del departamento, pero estratégicamente relevante como demostración de viabilidad tecnológica y como argumento de posicionamiento en materia de economía circular. La contribución ambiental se fortalece si la planta opera con fuentes de energía renovable y si los productos derivados desplazan efectivamente combustibles de mayor intensidad de emisiones.

En síntesis, el reciclaje químico mediante pirólisis en el Valle del Cauca es una oportunidad real pero condicionada. El departamento cuenta con los insumos básicos, residuos, red de recuperación, marco normativo, demanda industrial y capacidad institucional, pero estos factores no se articulan solos. La viabilidad del proyecto dependerá de la capacidad de estructurar una cadena de valor funcional que combine inversión privada, articulación con recicladores, acuerdos comerciales con clientes industriales y acompañamiento institucional que reduzca la incertidumbre regulatoria y ambiental. Bajo estas condiciones, el reciclaje químico puede convertirse en un componente relevante de la propuesta de valor de Valle Verde como territorio de economía circular avanzada.

## 9. Recomendaciones

Se recomienda utilizar los resultados de este estudio como insumo estratégico para la atracción de inversión en economía circular, posicionando al Valle del Cauca como un territorio con condiciones técnicas, normativas y territoriales favorables para el desarrollo de soluciones de valorización avanzada de residuos plásticos. El análisis realizado no solo dimensiona la oportunidad, sino que permite diferenciar qué condiciones habilitantes ya existen y cuáles requieren intervención, lo que facilita una narrativa de inversión accionable. Invest Pacific puede aprovechar este diagnóstico para estructurar notas de concepto, fichas de oportunidad o presentaciones ante inversionistas, fondos climáticos y operadores industriales interesados en plataformas de economía circular.

Se recomienda avanzar en un estudio de factibilidad técnica y financiera de mayor profundidad, con base en los resultados de este informe. La prefactibilidad desarrollada establece los parámetros de referencia, escala de 50 toneladas por día, tecnología de pirólisis, CAPEX estimado entre 13,3 y 14,9 millones de dólares, OPEX anual de aproximadamente 6,4 millones de dólares, pero la decisión de inversión requiere una siguiente fase de ingeniería conceptual, validación de flujos de residuos, modelamiento financiero con sensibilidades y estructuración del modelo de negocio.

Se recomienda priorizar el corredor Yumbo-Palmira como zona de localización para el proyecto y avanzar en la identificación de predios con uso industrial disponibles, conectividad logística y acceso a servicios. Esta definición temprana de sitio permite reducir incertidumbre en la estructuración del proyecto y facilita conversaciones con autoridades municipales, operadores de zonas francas y parques industriales sobre las condiciones de habilitación. La disponibilidad de suelo industrial en esta zona, combinada con la cercanía a centros de generación de residuos y a clientes industriales consumidores de aceite pirolítico, convierte a este corredor en la localización de menor riesgo logístico y territorial para la primera etapa del proyecto.

Se recomienda diseñar e implementar un esquema de articulación con la cadena de recicladores de oficio del departamento, entendiendo este vínculo como una condición estructural del proyecto y no como un componente periférico de responsabilidad social. El éxito operativo de la planta depende de garantizar un flujo constante y adecuadamente acondicionado de PP y PE posconsumo, lo que exige invertir en relaciones contractuales con organizaciones de recicladores, en infraestructura de acopio y pretratamiento, y en mecanismos de trazabilidad que permitan reportar aprovechamiento ante los sistemas REP. Este esquema no solo asegura la materia prima, sino que también fortalece la legitimidad social del proyecto y su compatibilidad con los objetivos de formalización e inclusión que promueve la política pública colombiana.

Se recomienda explorar acuerdos de suministro de materia prima con planes colectivos REP activos en el departamento, como ConexiónREP (con hub en Yumbo) y RELIC. Estos sistemas generan una demanda institucional de capacidades de transformación para materiales plásticos que hoy no cuentan con salida en el reciclaje mecánico. Una planta de pirólisis registrada como transformadora ante la autoridad ambiental puede suscribir convenios con estos planes para recibir material seleccionado y, simultáneamente, contribuir al cumplimiento de las metas obligatorias de aprovechamiento de los productores e importadores vinculados. Esta articulación reduce el riesgo de desabastecimiento y crea un mecanismo de estabilización del flujo de insumos compatible con los ciclos de recolección ya operativos.

Se recomienda desarrollar acuerdos comerciales con consumidores industriales de aceite pirolítico en el departamento, comenzando por sectores con demanda continua de combustibles líquidos como la industria cementera, cerámica, ladrillera y vidrio. Empresas como Cementos Argos, CEMEX, Cerámicas Dicerva y Cerámica Skala representan clientes potenciales con capacidad de consumo regular y con incentivos crecientes para diversificar sus fuentes energéticas hacia insumos de menor huella de carbono. Asegurar estos acuerdos desde etapas tempranas del proyecto no solo garantiza la salida del producto principal, sino que fortalece la bancabilidad del esquema financiero al reducir la incertidumbre en los ingresos proyectados.

Se recomienda gestionar el licenciamiento ambiental del proyecto desde las etapas iniciales de estructuración, identificando los requerimientos específicos de la CVC y del Ministerio de Ambiente para instalaciones de reciclaje químico. Dado que el reciclaje químico es reconocido en el marco de la Ley 2232 de 2022 y el Decreto 2192 de 2023, el proyecto cuenta con una base jurídica clara, pero los permisos ambientales, de uso de suelo y de emisiones atmosféricas requieren un proceso de tramitación que puede tomar entre 12 y 24 meses. Anticipar esta gestión evita retrasos en la puesta en marcha, reduce la incertidumbre percibida por los inversionistas y permite planificar la etapa de construcción con mayor certeza sobre los plazos totales del proyecto.

Se recomienda evaluar el desarrollo de un piloto de validación tecnológica a escala reducida antes de comprometer la inversión completa de la planta de 50 toneladas por día. Un piloto de entre 5 y 10 toneladas por día permitiría validar la calidad del aceite pirolítico con la mezcla real de residuos del departamento, ajustar los parámetros operativos, estimar con mayor precisión los costos de abastecimiento y establecer relaciones comerciales con compradores antes de escalar. Este enfoque escalonado reduce el riesgo de inversión, genera evidencia local de desempeño tecnológico y puede atraer el interés de fondos de innovación, cooperación internacional o banca de desarrollo que busquen apoyar proyectos demostrables con potencial de réplica regional.

Se recomienda vincular el proyecto de reciclaje químico a la narrativa de competitividad industrial baja en carbono que Invest Pacific promueve a través de la iniciativa Valle Verde. El reciclaje químico no es únicamente una solución de gestión de residuos, es una plataforma que permite a las empresas instaladas en el departamento mejorar su desempeño ambiental, reducir su huella plástica, acceder a insumos circulares y fortalecer su posicionamiento ante clientes, reguladores e inversores con compromisos de sostenibilidad. Este encuadre permite presentar la planta no solo como una inversión en infraestructura de residuos, sino como un activo estratégico de la cadena de valor industrial del Valle del Cauca, alineado con los compromisos del Acuerdo de París y con las exigencias crecientes de mercados de exportación europeos y norteamericanos en materia de circularidad.

Finalmente, se recomienda que Invest Pacific impulse una agenda institucional de corto plazo orientada a reducir las brechas habilitantes identificadas en este estudio, en particular las relacionadas con la infraestructura de acopio y pretratamiento de residuos plásticos, la articulación entre sistemas REP y gestores locales, la actualización de los PGIRS municipales para incluir capacidades de valorización avanzada, y el fortalecimiento de las condiciones de conexión logística entre generadores de residuos y potenciales plantas de transformación. Estas acciones no requieren esperar la decisión de inversión final, sino que crean las condiciones del entorno que harán que esa decisión sea posible y atractiva. En ese sentido, el rol de Invest Pacific como articulador institucional es tan estratégico como su función de promotor de inversión directa.

## Referencias bibliográficas

- [1] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, “Global plastics outlook : economic drivers, environmental impacts and policy options,” OECD Publishing, 2022. Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: [https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook\\_de747aef-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html)
- [2] H. Jeswani *et al.*, “Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery,” *Science of the Total Environment*, vol. 769, May 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144483.
- [3] Essentia and Ecopetrol, “EL PLÁSTICO, UN ALIADO PARA LA TRANSFORMACIÓN,” 2024. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.esenttia.co/wp-content/uploads/2024/12/El-Catallizador-9-Esenttia.pdf>
- [4] Asociación Nacional de Empresarios ANDI, “POTENCIAL DE RECICLABILIDAD DE ENVASES Y EMPAQUES EN COLOMBIA,” 2024. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: [https://www.andi.com.co/Uploads/POTENCIAL%20DE%20RECICLABILIDAD%20DE%20ENVASES%20Y%20EMPAQUES%20EN%20COLOMBIA%20\(003\)\\_638602627756422428.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/POTENCIAL%20DE%20RECICLABILIDAD%20DE%20ENVASES%20Y%20EMPAQUES%20EN%20COLOMBIA%20(003)_638602627756422428.pdf)
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Resolución 1407 de 2018.”
- [6] Ecocircular S.A.S, “Plan de Gestión Ambiental de Residuos de Envases y Embalajes del sector Licores del País,” RELIC. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://relicplan.com/#:~:text=RELIC%2C%20es%20el%20Plan%20Colectivo,Cauca%2C%20Boyac%C3%A1%2C%20Meta%20y%20Valle>
- [7] Ecocircular S.A.S, “ConexiónREP,” Ecocircular ConexiónREP. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://ecocircularsas.com/ecocircular-conexionrep/#:~:text=Hub%20Valle%20Carrera%2032%20,Bodega%202%20Yumbo%20302%202167938>
- [8] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, “Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Materiales de Residuos Sólidos (CAEFM-RS) 2022 – 2023 provisional,” 2025. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CAEFM-RS/bol-CAEFMRS-2023pr.pdf>
- [9] Alcaldía de Santiago de Cali, “Proyecto de acuerdo cali cero plasticos de un solo uso,” Cali, 2020. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.concejodecali.gov.co/descargar.php?idFile=20542>
- [10] Superservicios, “Informe Nacional de Disposición Final de Residuos sólidos en Colombia en el año 2024,” 2025. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/2025-12/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-en-Cambia-2024.pdf>
- [11] Superservicios, “Informe Nacional de Disposición Final de Residuos sólidos en Colombia en el año 2022,” 2023. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2022.pdf>
- [12] Superservicios, “INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020,” 2021. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_df\\_2020.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020.pdf)
- [13] Superservicios, “Disposición Final de Residuos Sólidos Informe Nacional– 2018,” 2019. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_nacional\\_disposicion\\_final\\_2019.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_nacional_disposicion_final_2019.pdf)

- [14] M. y E. A. IDEAM - Instituto de Hidrología, “Informe Nacional del Registro Único Ambiental Manufacturero de COLOMBIA RUA MF 2023,” 2024. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Nacional-de-RUA-manufacturero>
- [15] C. Gómez, “Así promueve Carvajal Empaques el reciclaje químico en Colombia,” *Portafolio*, 2024. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/sostenibilidad/reciclaje-quimico-que-es-y-por-que-carvajal-empaques-lo-esta-promoviendo-604438>
- [16] Ecopetrol, “Colombia, pionera en reciclaje químico avanzado en Suramérica,” *Sala de Prensa Ecopetrol*, 2023. Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/colombia-pionera-reciclaje-quimico-avanzado-suramerica>
- [17] J. M. Murillo, “Reciclaje químico, solución sostenible a cargo de Esenttia,” *Portafolio*, Nov. 19, 2024. Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/innovacion/reciclaje-quimico-solucion-sostenible-a-cargo-de-esenttia-617831>
- [18] Exxon Mobil, “How we’re supporting chemical recycling.”
- [19] Nestlé, “Nestlé México, Greenback y Enval instalarán en México la Primera Planta para lograr la circularidad de empaques plásticos grado alimenticio.”
- [20] M. Zamora, “Bringing advanced recycling to life,” ExxonMobil.
- [21] Alterra Solving Plastic Pollution, “Frequently Asked Questions.”
- [22] WIRED, “Esta es la primera planta de reciclaje químico en América Latina enfocada en empaques flexibles.”
- [23] F. Parra and O. Abizaid, “La formalización de la población recicladora en Colombia como prestadora del servicio público de reciclaje.,” Bogotá D.C., Oct. 2021. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.wiego.org/wp-content/uploads/2022/08/nota-tecnica-wiego-12-parra-abizaid.pdf#:~:text=%E2%80%A2%20El%20reconocimiento%20de%20la,venta%20de%20los%20ma%02teriales%20recuperados>
- [24] A. Gendell and V. Lahme, “Feedstock Quality Guidelines for Pyrolysis of Plastic Waste,” Bristol, Aug. 2022. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://publuu.com/flip-book/179931/1494662>
- [25] J. Ma and Z. Qidi, “COMPARISON OF CHINESE PYROLYSIS PROCESSES,” Unspecified, Columbia University, New York, 2018. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: [https://wtert.org/wp-content/uploads/2019/07/Research-paper\\_MaZhong-May14.pdf#:~:text=the%20most%20important%20reactors%20used,tons%20per%20day%20using%20a](https://wtert.org/wp-content/uploads/2019/07/Research-paper_MaZhong-May14.pdf#:~:text=the%20most%20important%20reactors%20used,tons%20per%20day%20using%20a)
- [26] J. Timana, C. Ubillas, V. Pretell, H. Manrique, and W. Ramos, “Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.326.
- [27] A. I. Eldahshory, K. Emara, M. S. Abd-Elhady, and M. A. Ismail, “Catalytic pyrolysis of waste polypropylene using low-cost natural catalysts,” *Sci. Rep.*, vol. 13, Jul. 2023, Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-37769-8#:~:text=match%20at%20L460%20yield%20of,pyrolysis%20of%20WPP%20increased%20when>
- [28] Henan Doing, “Does pyrolysis plant use electricity or burning system for the pyrolysis process?,” Henan Doing - Industry News. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: [https://www.wasteplasticpyrolysisplant.com/News/Industry\\_News/burning\\_and\\_electricity\\_consumption\\_of\\_pyrolysis\\_machine\\_359.html](https://www.wasteplasticpyrolysisplant.com/News/Industry_News/burning_and_electricity_consumption_of_pyrolysis_machine_359.html)

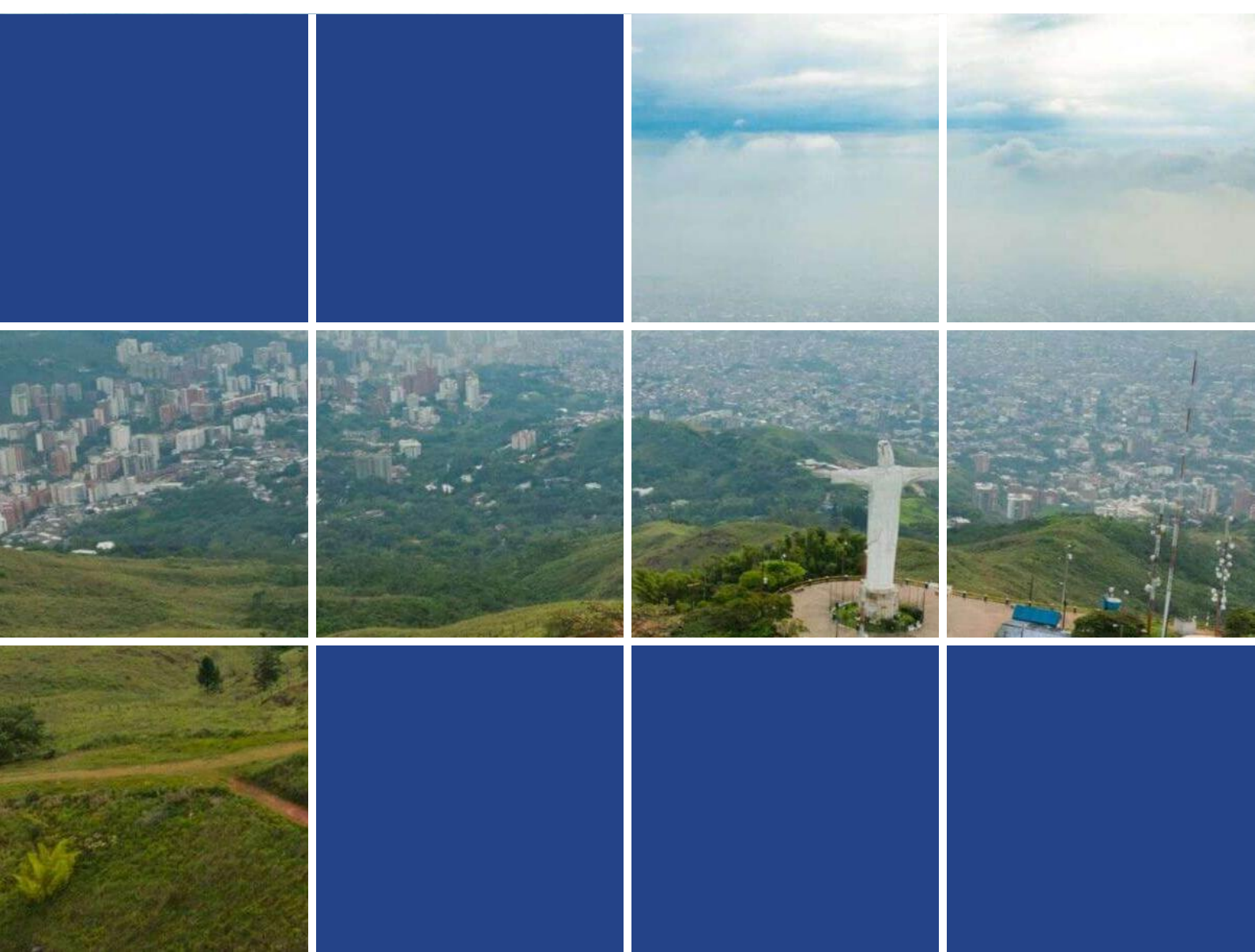
- [29] PyrolysisUnit, “Cost of Pyrolysis Oil,” Pyrolysis Unit. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.bestoneco.com/planta-de-pirolisis-en-chile/>
- [30] Beston, “Aceite de pirólisis de neumáticos,” Beston. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.bestongroup.com/es/industry-news/tyre-pyrolysis-oil/#:~:text=Punto%20cr%C3%ADtico%20por%20PMCC%20ASTM,25%2043.385%20MJ%2Fkg>
- [31] Beston, “How to Assess the Quality of Pyrolysis Oil,” Beston . Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.bestongroup.com/industry-news/how-to-assess-the-quality-of-pyrolysis-oil/#:~:text=Density>
- [32] FT-ICR MS and GCxGC, “Detailed Characterization of Plastic Pyrolysis Oils and Their Contaminants By FT-ICR MS and GCxGC,” in *Spring24+20thGCPS*, Los Angeles: AIChE, Mar. 2024. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.aiche.org/conferences/videos/conference-presentations/detailed-characterization-plastic-pyrolysis-oils-and-their-contaminants-ft-icr-ms-and-gcxcgc#:~:text=Chlorine%20is%20one%20of%20the,ICR%20MS>
- [33] combustibles venta directa desde refinería, “NAFTA VIRGEN,” combustibles venta directa desde refinería. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://combustibles.com.ar/producto/nafta-virgen/#:~:text=Densidad%20a%2015%C2%BA>
- [34] Trading Economics, “Naphta Trading Economics,” Trading Economics. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/naphtha#:~:text=Naphtha%20rose%20to%20815,benchmark%20market%20for%20this%20commodity>
- [35] L. Shihao *et al.*, “Pyrolytic oil from biomass, plastics, and tires: Production, properties, and tailored upgrading strategies for sustainable application,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 226, no. E, Jan. 2026.
- [36] Global Petrol Prices, “Colombia Diesel prices, 27-Apr-2026,” Global Petrol Prices - Colombia. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: [https://www.globalpetrolprices.com/Colombia/diesel\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/Colombia/diesel_prices/)
- [37] Ecopetrol, “Precios vigentes - Ecopetrol,” Precios Vigentes Ecopetrol. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/multisitios/comercial/es/precios/precios-vigentes/precios-vigentes!/ut/p/z1/pZLLUoMwFlafxQVLyUmCNXWXIFDqhcv0gtk44GDKDCUdijK-vTi6EMvQqmeXzPedzH9OkEQJkIX6Wqi0KXSVlt35QU4eAz5jmFkQMMIYRNPQvqSQL9wQo3Uf8OwbF6IZdZeLffViQpD8hy9i6zT\\_nkxs7Fs4ZAvhQOTMp\\_T27hq4wKf50CsOliaCANGB-Yv\\_vdMv8x8Ccrz9GsmxJ1hw8RMYWNEY0I3iGGB9AWNbnGMjRH\\_OxoHmKvAmzzz\\_Jq4wyhWSdP-d1XpsvdXe9aZrd\\_soAA9q2NZXWqsZNI701YEjZ6H2Dkj6JdtvIRyVQ-IV\\_LrO3lp-9A1\\_YeG0!/dz/d5/L2dBISvZ0FBIS9nQSEh/](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/multisitios/comercial/es/precios/precios-vigentes/precios-vigentes!/ut/p/z1/pZLLUoMwFlafxQVLyUmCNXWXIFDqhcv0gtk44GDKDCUdijK-vTi6EMvQqmeXzPedzH9OkEQJkIX6Wqi0KXSVlt35QU4eAz5jmFkQMMIYRNPQvqSQL9wQo3Uf8OwbF6IZdZeLffViQpD8hy9i6zT_nkxs7Fs4ZAvhQOTMp_T27hq4wKf50CsOliaCANGB-Yv_vdMv8x8Ccrz9GsmxJ1hw8RMYWNEY0I3iGGB9AWNbnGMjRH_OxoHmKvAmzzz_Jq4wyhWSdP-d1XpsvdXe9aZrd_soAA9q2NZXWqsZNI701YEjZ6H2Dkj6JdtvIRyVQ-IV_LrO3lp-9A1_YeG0!/dz/d5/L2dBISvZ0FBIS9nQSEh/)
- [38] A. Almonacid S., “INTERNATIONAL HYDROGEN RAMP-UP PROGRAM (H2Uppp).”, Bogotá D.C., Jan. 2024. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: [https://www.minenergia.gov.co/documents/11890/04.Estudio\\_de\\_Mercado\\_H2V\\_y\\_PtX.pdf#:~:text=D esde%202015%2C%20la%20oferta%20y,000%E2%80%89t%20y%20las](https://www.minenergia.gov.co/documents/11890/04.Estudio_de_Mercado_H2V_y_PtX.pdf#:~:text=D esde%202015%2C%20la%20oferta%20y,000%E2%80%89t%20y%20las)
- [39] A. Elorduy Prieto, “Producción de metanol renovable sintético,” Energy Analysis. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://energyanalysis.substack.com/p/produccion-metanol-renovable>
- [40] Comisión Europea, “Develop, design and evaluate a sustainable marine litter-to-methanol process,” CORDIS - Resultados de Investigaciones de la UE. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/451615-a-new-approach-to-making-methanol-valorising-marine-litter/es#:~:text=las%20mol%C3%A9culas%20de%20pl%C3%A1stico%20para,El%20metanol%20y%20el>

- [41] M. B. Uddin, M. G. Rasul, A. A. Chowdhury, and N. M. S. Hassan, "Hydrogen production from plastic waste pyrolysis syngas: A review on progresses and challenges," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 158, Aug. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150512>.
- [42] A. Elorduy Prieto, "Costes del metanol renovable," *Energy Analysis*. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0472-de-2017/>
- [43] R. Blanchard and T. H. Mekonnen, "Valorization of plastic waste via chemical activation and carbonization into activated carbon for functional material applications," *Royal Society of Chemistry Applied Polymers*, vol. 2, pp. 557–582, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1039/D4LP00016A>.
- [44] K. Singh and S. Gupta, "Engineered char from waste plastic: A review on the physicochemical properties, carbon dioxide uptake, and application in construction materials," *Cleaner Materials*, vol. 17, Sep. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100321>.
- [45] F. J. Medaiyese, H. R. Nasriani, K. Khan, and L. Khajenoori, "Sustainable Hydrogen Production from Plastic Waste: Optimizing Pyrolysis for a Circular Economy," *Hydrogen*, vol. 6, no. 1, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/hydrogen6010015>.
- [46] International Biochar Initiative, "Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (aka IBI Biochar Standards)," Nov. 2015. [Online]. Available: <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>.
- [47] H. P. Schmidt *et al.*, "European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar," Frick, Switzerland, Aug. 2025. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: [https://www.european-biochar.org/media/doc/7/ebc\\_en\\_10\\_5\\_red.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/7/ebc_en_10_5_red.pdf)
- [48] BESTON, "Planta de Pirólisis en Chile ." Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.bestoneco.com/planta-de-pirolisis-en-chile/>
- [49] J. R. Nagel, "An Analytic Model for Eddy Current Separation," *Applied Physics* , Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02435>.
- [50] MINGJIE Environmental Equipment, "How Much Does Plastic Pyrolysis Plant Cost."
- [51] J. Timana, C. Ubillas, V. Pretell, H. Manrique, and W. Ramos, "Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.326.
- [52] Royal Society of Chemistry, "Energy & Environmental Science," Sep. 2023.
- [53] I. - International Energy Agency, "The Future of Petrochemicals Towards more sustainable plastics and fertilisers Together Secure Sustainable." [Online]. Available: [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- [54] Alcaldía de Santiago de Cali, "Entregar los residuos aprovechables a recicladores de oficio, factor clave para avanzar hacia una Cali circular."
- [55] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, "Plan de Gestión Integral de Residuos Peligrosos en el Área de Jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca 2023 - 2031," Nov. 2023.
- [56] Municipalidad de Palmira, "PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL MUNICIPIO DE PALMIRA," Palmira, 2016. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://biogreensasesp.com/archivos/PGIRS%202016-2027%20PALMIRA.pdf>
- [57] "proyecto de acuerdo cali cero plasticos de un solo uso (2)".

- [58] Municipalidad de Guajalajara de Buga, “Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Municipio de Guajalajara de Buga,” Guajalajara de Buga, 2016. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/698268118/Pgirs-2017-Buga>
- [59] Municipalidad de Buenaventura, “PLAN DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS PARA EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE BUENAVENTURA – VALLE,” Buenaventura. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: [https://www.buenaventura.gov.co/images/multimedia/pgirs\\_buenaventura.pdf](https://www.buenaventura.gov.co/images/multimedia/pgirs_buenaventura.pdf)
- [60] Municipalidad de Cartago, “REVISIÓN Y AJUSTES DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS- DEL MUNICIPIO DE CARTAGO,” Cartago, 2015. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.municipio.cartago.gov.co/wp-content/uploads/2018/10/Documento-PGIRS-Cartago-2016-2027.pdf>
- [61] El Tiempo, “Bogotá transforma escombros clandestinos en material de construcción para las vías: así funciona el plan de economía circular para salvar a Doña Juana.”
- [62] BESTON, “Global Launch, BLJ-20: Pyrolysis + Distillation Integration Technology.” Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.bestongroup.com/blj-20-pyrolysis-distillation-integrated-plant/>
- [63] A. Gallón, “Si supiéramos que dos millones de familias viven de reciclar la basura, ¿lo haríamos más?,” *El País*, México D.C., Jan. 31, 2025. Accessed: May 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.mendeley.com/reference-manager/library/all-references/70e42981-9d8f-3124-b3b7-9aa403ebfbc9>
- [64] Acoplásticos, “Encuesta de precios de reciclaje en Colombia,” Aug. 2024. Accessed: Jun. 02, 2026. [Online]. Available: <https://plas-tic.org/wp-content/uploads/2024/09/INFORME-PRECIOS-AGOS-2024-5.pdf>
- [65] DOING Group, “¿Podemos utilizar aceite de pirólisis para generar energía?,” *Noticias de industria*, Oct. 10, 2023. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: [https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis\\_news/Industry\\_Trends/pyrolysis\\_oil\\_for\\_power\\_generation\\_uses\\_439.html](https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_news/Industry_Trends/pyrolysis_oil_for_power_generation_uses_439.html)
- [66] DOING Group, “Los precios del combustible para calefacción están en aumento, ¿cómo puede la industria ahorrar en combustible?,” *Noticias de industria*, Oct. 28, 2025. Accessed: Apr. 28, 2026. [Online]. Available: [https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis\\_news/Industry\\_Trends/industry-save-on-heating-fuel-costs-529.html](https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_news/Industry_Trends/industry-save-on-heating-fuel-costs-529.html)
- [67] N. Redmond, “Aluminum could hit \$4,000 a ton amid most bullish set-up in over 50 years,” Market Watch. Accessed: May 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.marketwatch.com/story/aluminum-could-hit-4-000-a-ton-amid-most-bullish-set-up-in-over-50-years-9cae5e49>
- [68] Alcaldía de Santiago de Cali, “Entregar los residuos aprovechables a recicladores de oficio, factor clave para avanzar hacia una Cali circular,” *Alcaldía de Santiago de Cali*, 2024. Accessed: Apr. 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.cali.gov.co/serviciospublicos/publicaciones/183193/entregar-los-residuos-aprovechables-a-recicladores-de-oficio-factor-clave-para-avanzar-hacia-una-cali-circular/>
- [69] Presidencia de la República de Colombia, *DECRETO 2192 DE 2023*. Presidencia de la República de Colombia, 2023. Accessed: Apr. 08, 2026. [Online]. Available: *DECRETO 2192 DE 2023*
- [70] Corporación Autónoma Regional de Valle del Cauca, “CVC ENTREGA MAQUINARIA PARA LA TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS EN BUENAVENTURA,” Boletines de prensa CVC. Accessed: Apr. 08, 2026. [Online]. Available: <https://cvc.gov.co/boletin-prensa-036-2024>
- [71] Corporación Autónoma Regional de Valle del Cauca, “‘RECICLETA’: MOVILIDAD SOLAR AL SERVICIO DEL RECICLAJE EN EL CORREGIMIENTO LA PAILA,” Boletines de prensa CVC. Accessed: Apr. 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.cvc.gov.co/recicleta-la->

paila#:~:text=La%20incorporaci%C3%B3n%20de%20esta%20tecnolog%C3%ADa%20refuerza%20la,un%20modelo%20para%20seguir%20en%20el%20departamento.

- [72] K. Krell, F. Keller, and M. Grabner, "Life cycle greenhouse gas emission assessment of pyrolysis-based chemical recycling of post-consumer waste: focus on feedstock composition, oil processing and balancing consistency," *Waste Management*, 2025, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115090>
- [73] G. -Gutierrez, P. Amadei, A. M. Klenert, Nessi, and S. Tonini, "Environmental and economic assessment of plastic waste recycling A comparison of mechanical, physical, chemical recycling and energy recovery of plastic waste," 2023. doi: 10.2760/0472.
- [74] C. Kruger, "LCA ChemCyclingTM: CO2 emissions of pyrolyzed mixed plastic waste and the mass balance approach," 2020, BASF. Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: [https://www.basf.com/dam/jcr:70562702-eb77-3bcc-81ff-d9604ba51999/basf/www/global/documents/en/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/chemcycling/Intern\\_Christian%20Kr%C3%BCger\\_BASF%20Dialog%20Forum.pdf#:~:text=generated%20by%20incineration%20replaces%20the,1t%20CO2e%2Ft%20waste](https://www.basf.com/dam/jcr:70562702-eb77-3bcc-81ff-d9604ba51999/basf/www/global/documents/en/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/chemcycling/Intern_Christian%20Kr%C3%BCger_BASF%20Dialog%20Forum.pdf#:~:text=generated%20by%20incineration%20replaces%20the,1t%20CO2e%2Ft%20waste)



[www.deuman.com](http://www.deuman.com)