



Universidad  
del Atlántico

CÓDIGO: FOR-DO-109

VERSIÓN: 0

FECHA: 03/06/2020

**AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA  
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL  
TEXTO COMPLETO**

Puerto Colombia, 10 de noviembre de 2023

Señores

**DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS**

Universidad del Atlántico

Cuidad

**Asunto: Autorización Trabajo de Grado**

Cordial saludo,

Yo, **JOSE DAVID VALENCIA CHAVEZ**, identificado(a) con **C.C. No. 1.143.442.285** de **BARRANQUILLA**, autor(a) del trabajo de grado titulado **EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ACEITES LUBRICANTES EINDUSTRIALES USADOS EN PROCESO DE REFINACIÓN DE UNA PLANTA DE DISPOSICIÓN FINAL DERESIDUOS INDUSTRIALES EN CARTAGENA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE CICLO DE VIDA** presentado y aprobado en el año **2023** como requisito para optar al título Profesional de **MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.**; autorizo al Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico para que, con fines académicos, la producción académica, literaria, intelectual de la Universidad del Atlántico sea divulgada a nivel nacional e internacional a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios del Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web institucional, en el Repositorio Digital y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad del Atlántico.
- Permitir consulta, reproducción y citación a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Esto de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Atentamente,

Firma

**JOSE DAVID VALENCIA CHAVEZ.**

**C.C. No. 1.143.442.285 de BARRANQUILLA**

**DECLARACIÓN DE AUSENCIA DE PLAGIO EN TRABAJO ACADÉMICO PARA GRADO**


*Este documento debe ser diligenciado de manera clara y completa, sin tachaduras o enmendaduras y las firmas consignadas deben corresponder al (los) autor (es) identificado en el mismo.*

Puerto Colombia, **10 de Noviembre del 2023,**

Una vez obtenido el visto bueno del director del trabajo y los evaluadores, presento al **Departamento de Bibliotecas** el resultado académico de mi formación profesional o posgradual. Asimismo, declaro y entiendo lo siguiente:

- El trabajo académico es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, en consecuencia, la obra es de mi exclusiva autoría y detento la titularidad sobre la misma.
- Asumo total responsabilidad por el contenido del trabajo académico.
- Eximo a la Universidad del Atlántico, quien actúa como un tercero de buena fe, contra cualquier daño o perjuicio originado en la reclamación de los derechos de este documento, por parte de terceros.
- Las fuentes citadas han sido debidamente referenciadas en el mismo.
- El (los) autor (es) declara (n) que conoce (n) lo consignado en el trabajo académico debido a que contribuyeron en su elaboración y aprobaron esta versión adjunta.

<b>Título del trabajo académico:</b>	<b>EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ACEITES LUBRICANTES E INDUSTRIALES USADOS EN PROCESO DE REFINACIÓN DE UNA PLANTA DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN CARTAGENA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE CICLO DE VIDA</b>
<b>Programa académico:</b>	<b>MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES</b>

<b>Firma de Autor 1:</b>							
<b>Nombres y Apellidos:</b>	<b>JOSE DAVID VALENCIA CHAVEZ</b>						
<b>Documento de Identificación:</b>	<b>CC</b>	<b>X</b>	<b>CE</b>	<b>PA</b>	<b>Número:</b>	<b>1.143.442.285</b>	
<b>Nacionalidad:</b>	<b>COLOMBIANO</b>			<b>Lugar de residencia:</b>	<b>BARRANQUILLA</b>		
<b>Dirección de residencia:</b>	<b>CALLE 14A # 15 – 130, URBANIZACIÓN LA LUZ</b>						
<b>Teléfono:</b>	<b>N.A.</b>			<b>Celular:</b>	<b>321 680 6032</b>		

**FORMULARIO DESCRIPTIVO DEL TRABAJO DE GRADO**

<b>TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO</b>	<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ACEITES LUBRICANTES E INDUSTRIALES USADOS EN PROCESO DE REFINACIÓN DE UNA PLANTA DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN CARTAGENA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE CICLO DE VIDA</b>
<b>AUTOR(A) (ES)</b>	<b>JOSE DAVID VALENCIA CHAVEZ</b>
<b>DIRECTOR (A)</b>	<b>CARLOS DIAZ URIBE</b>
<b>CO-DIRECTOR (A)</b>	<b>N.A.</b>
<b>JURADOS</b>	<b>YOMA ISABEL MENDOZA GUERRA y MIRYAM YORLENIS ARROYO DE LA OSSA</b>
<b>TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE</b>	<b>MAGÍSTER EN CIENCIAS AMBIENTALES</b>
<b>PROGRAMA</b>	<b>ELIJA EL PROGRAMA</b>
<b>PREGRADO / POSTGRADO</b>	<b>POSTGRADO</b>
<b>FACULTAD</b>	<b>CIENCIAS BÁSICAS</b>
<b>SEDE INSTITUCIONAL</b>	<b>UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO</b>
<b>AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO</b>	<b>2023</b>
<b>NÚMERO DE PÁGINAS</b>	<b>NÚMERO DE PÁGINAS.</b>
<b>TIPO DE ILUSTRACIONES</b>	<b>Figuras y Tablas</b>
<b>MATERIAL ANEXO (VÍDEO, AUDIO, MULTIMEDIA O PRODUCCIÓN ELECTRÓNICA)</b>	<b>NO APLICA</b>
<b>PREMIO O RECONOCIMIENTO</b>	<b>NO APLICA</b>



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ACEITES LUBRICANTES E INDUSTRIALES USADOS EN PROCESO DE REFINACIÓN DE UNA PLANTA DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN CARTAGENA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE CICLO DE VIDA**

**Ing. JOSE DAVID VALENCIA CHAVEZ**

**UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICA  
BARRANQUILLA, COLOMBIA  
2023**

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ACEITES LUBRICANTES E INDUSTRIALES USADOS EN PROCESO DE REFINACIÓN DE UNA PLANTA DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN CARTAGENA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE CICLO DE VIDA**

**Ing. JOSE DAVID VALENCIA CHAVEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de:  
MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**DIRECTOR:  
Dr. CARLOS ENRIQUE DIAZ URIBE**

**UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICA  
BARRANQUILLA, COLOMBIA  
2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primordialmente a Dios por brindarme salud, sabiduría, fuerza y la determinación necesaria para llevar a cabo este trabajo aun cuando el cansancio después de trabajar y la incertidumbre de mejora de salud de mi padre estuvieron presente en cada minuto de desarrollo de esta tesis.

A la compañía Industria Ambiental SAS – ATICA, en especial al Ing. Mauricio Abondano por apoyarme desde el primer minuto que le comenté sobre este proyecto y sin dudarlo fue clave para que la compañía diera el visto bueno para ejecutar esta tesis. De igual Forma al Ing. Julian Villalba por su acompañamiento en desarrollo de esta, así como también al Ing. Daniel Ortega.

A mi director de trabajo de grado Carlos Diaz Uribe por su orientación asertiva para hacer posible esta tesis y sus consejos puntuales para tomar las debidas acciones encaminadas a la culminación del proyecto.

Al Dr. Samir Meramo quien desde la distancia me facilitó las bases de datos de procesos importantes para el desarrollo de este trabajo de grado y sin su ayuda no hubiese sido posible terminarla.

A mi amigo incondicional Cristian Visbal por su apoyo clave para analizar la información y poder interpretar de la mejor manera esos conceptos técnicos muy propios del proceso.

A todas las personas que me escucharon y me ayudaron a concretar este trabajo de grado, este también es su trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABLAS.....	8
RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Generalidades de los Aceites Lubricantes e Industriales Usados.....	14
2.1.1. Gestión Aceites Lubricantes e Industriales Usados.....	17
2.2. Impacto de los Aceites Usados en la Salud Humana y el Medio Ambiente.....	19
2.2.1. <i>Impacto de aceites usado en el suelo</i> .....	19
2.2.2. <i>Impacto de aceites usado en el agua</i> .....	20
2.2.3. <i>Impacto de aceites usado en el aire</i> .....	21
2.3. Tecnologías de Regeneración de Aceites Lubricantes e Industriales Usados.	22
2.4. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	23
2.4.1. <i>Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)</i> .....	25
2.5. Antecedentes ACV Aceites Minerales Usados.....	27
2.6. Marco Normativo Aceites Lubricantes Usados.....	29
2.6.1. <i>Contexto internacional aceites lubricantes usados</i> .....	30
2.6.2. Contexto nacional aceites lubricantes usados.....	32
3. OBJETIVOS.....	40
3.1. Objetivo General.....	40
3.2. Objetivos específicos.....	40
4. MARCO METODOLÓGICO.....	41
4.1. Fase I: Definición de Objetivo y Alcance ACV Re-Refinación Aceites Usados Planta ATICA.....	41
4.1.1. <i>Tipo de investigación</i> .....	41
4.1.2. <i>Sistema función para ACV</i> .....	41

4.1.3.	<i>Descripción proceso refinería ATICA.....</i>	42
4.1.4.	<i>Unidad funcional ACV aceites minerales usados planta ATICA Cartagena..</i>	45
4.1.5.	<i>Calidad de datos ACV planta ATICA.....</i>	45
4.1.6.	<i>Objetivo del ACV proceso ATICA.....</i>	47
4.1.7.	<i>Audiencia objetivo.....</i>	47
4.1.8.	<i>Alcance de ACV proceso ATICA.....</i>	47
4.1.9.	<i>Metodología de evaluación de impacto de ciclo de vida y tipos de impactos.....</i>	48
4.2.	<i>Fase II: Análisis de Inventario ACV Proceso ATICA .....</i>	49
4.2.1.	<i>Datos recolección aceites lubricantes usados proceso ATICA .....</i>	49
4.2.2.	<i>Sustitución de productos refinación aceites planta ATICA para acv.....</i>	50
4.2.3.	<i>Datos flujos de referencia ACV aceites usados planta ATICA .....</i>	51
4.2.4.	<i>Límites proceso evaluado.....</i>	51
4.2.5.	<i>Diagrama general del flujo de proceso.....</i>	52
4.2.6.	<i>Datos entradas y salidas para el modelo de re-refinación ATICA .....</i>	54
5.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	58
5.1.	<i>Fase III y Fase IV: Evaluación de Impactos e Interpretación de Resultados....</i>	58
6.	<b>CONCLUSIONES .....</b>	73
7.	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	75
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	77
	<b>ANEXOS.....</b>	83



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Composición típica de aceite lubricante fresco y usado.(Islam et al., 2021) .....	15
<b>Figura 2.</b> Actividades productivas que más aportaron a la generación de aceites lubricantes usados entre 2010 y 2019. Adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).....	18
<b>Figura 3.</b> Volumen total de aceite lubricante usado tratado y aprovechados por valorización energética por los Operadores "Avalados" FAU Vs. Vol. estimado generado País. Adaptado (Asociación Colombiana de petróleo ACP, 2022) .....	19
<b>Figura 4.</b> Interacciones fases en ACV. Adaptado de (ISO, 2006) .....	24
<b>Figura 5.</b> Ubicación de la planta Industria Ambiental sede Cartagena. (10.324646211317615, -75.49586437906596). Fuente: Google Earth; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo de delimita las fronteras del sistema para el sistema de producto. Fuente: Construcción propia con datos de los procesos industriales analizados. .....	53
<b>Figura 7.</b> Impacto Calentamiento Global por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	63
<b>Figura 8.</b> Impacto ecotoxicidad agua dulce por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA. 64	
<b>Figura 9.</b> Impacto eutrofización de agua dulce por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA. ....	65
<b>Figura 10.</b> Impacto ecotoxicidad marina por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	65
<b>Figura 11.</b> Impacto eutrofización marina por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	66

<b>Figura 12.</b> Impacto agotamiento del agua por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	67
<b>Figura 13.</b> Impacto toxicidad humana por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	68
<b>Figura 14.</b> Impacto formación de oxidantes fotoquímicos por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA. ....	69
<b>Figura 15.</b> Impacto acidificación terrestre por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	70
<b>Figura 16.</b> Impacto ecotoxicidad terrestre por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.....	71

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características generales del aceite lubricante virgen y usados.(Pinheiro, Ascensão, Reis, et al., 2017) .....	16
<b>Tabla 2.</b> Límites máximos de contaminantes para mezcla de aceites usados tratados en Colombia para uso como combustibles establecidos en la Resolución 1446 de 2005.....	36
<b>Tabla 3.</b> Procesos usados de la base de datos Ecoinvent para modelos en el Software OPENLCA.....	46
<b>Tabla 4.</b> Categorías de impactos consideradas para proceso de re-refinación aceites usados planta ATICA bajo método Recipe punto medio (H) V1.13.....	48
<b>Tabla 5.</b> Relación de sustitución de subproductos de la re-refinación de aceites minerales planta ATICA.....	50
<b>Tabla 6.</b> Flujos de referencia proceso re-refinación ALU planta ATICA Cartagena para 1 Kg de ALU .....	51
<b>Tabla 7.</b> Convenciones de las corrientes del diagrama de flujo que delimita las fronteras del sistema. ....	54
<b>Tabla 8.</b> Datos de flujos entradas y salidas proceso de re-refinación de aceites ATICA.....	55
<b>Tabla 9.</b> Resultado de las categorías de impacto evaluadas por el proceso re-refinación de aceites usados en la planta ATICA .....	58
<b>Tabla 10.</b> Impactos evitados flujo sustituto de base lubricante proceso Re-refinación ATICA.....	62

## RESUMEN

El aprovechamiento de los residuos, cuya finalidad sea reducir los impactos ambientales generados por su mala disposición final, es una tendencia importante que está cobrando fuerza a nivel global. Entre estas sustancias se encuentran los aceites lubricantes e industriales usados, desechos catalogados como peligroso de acuerdo con los postulados de la Convención de Basilea a la cual se adscribió Colombia en 1996. En el presente trabajo se realizó un análisis de ciclo de vida para la tecnología de re-refinación por destilación de capa fina propia en una planta ubicada en Mamonal-Cartagena, bajo el software OPENLCA versión 1.11 y método de punto medio de ReCiPe 2016 (H) V1.13. La información del inventario fue compilada en su gran mayoría a partir de información directa suministrada por la empresa y otra parte de la información fue obtenida en diálogo con expertos en los procesos de tratamiento de aceites usados o consultada en fuentes especializadas y extraída de la base de datos de Ecoinvent 3.8. Se obtuvieron resultados en 10 de las 12 categorías de impacto objeto de estudio y se evidenció que el flujo sustituto de proceso para obtener base lubricante impacta de manera positiva en todas las categorías estudiadas con valores diferente de cero (resultados con valores negativos) y adicional, el proceso contribuye a prevenir impactos ambientales en las categorías ecotoxicidad de agua dulce, eutrofización de agua dulce, toxicidad humana, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad terrestre. Por otra parte, la categoría de calentamiento global fue la de mayor resultado del proceso.

***Palabras clave:*** Aceites lubricantes usados, ciclo de vida, Re-refinación, beneficios ambientales, economía circular.

## 1. INTRODUCCIÓN

Todas las actividades que realizan los individuos generan algún tipo de residuo, y su manejo se ha convertido en un tema de gran importancia para la sociedad debido a sus efectos negativos sobre el medio ambiente (Karpan et al., 2021). La producción mundial anual de residuos es de al menos 4.500 millones de toneladas y entre las principales fuentes se encuentran los siguientes sectores: (i) energético (residuos de la producción, procesamiento y combustión de combustibles); (ii) industrial (aceites y productos químicos usados, máquinas y mecanismos); municipal (residuos sólidos, lodos de depuradora, residuos de construcción); maderero y agrícola (residuos de aserradero, carpintería, residuos agrícolas, etc.) (Vershina et al., 2022).

El rápido crecimiento industrial y de la población, junto con el crecimiento económico, ha llevado a un aumento en la generación de residuos en los últimos años. Los residuos peligrosos (RESPEL) son un problema ambiental muy importante en comparación con los desechos no peligrosos ya que presentan un mayor riesgo para el medio ambiente y la salud humana (Callao et al., 2019; Minelgaitė & Liobikienė, 2019). Se presentan impactos significativos en estas 2 áreas si se manejan o eliminan de manera inadecuada debido a su cantidad, concentración y características físicas, químicas e infecciosas que presenten (Ankit et al., 2021).

Los desechos peligrosos incluyen cualquier material no deseado en forma de sólido, semisólido, líquido o gas que podría amenazar a los humanos y al medio ambiente si se emite, libera, deposita o descarga en el entorno. Estos residuos presentan una o más de las siguientes características: inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad (Sadala et al., 2019). Es por esto, que se hace necesario implementar un marco jurídico institucional para el diseño de políticas públicas, desde un ámbito integral, holístico y sistémico, que contribuya como instrumento para combatir los efectos de la generación insostenible e incorrecta disposición final de residuos y su consecuente deterioro del medio ambiente.

Los residuos de aceites lubricantes e industriales usados son considerados un desecho peligroso de aceites minerales (no aptos para el uso al que estaban originalmente destinados, o mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua), de acuerdo con los postulados del convenio de Basilea a la cual ratificó y adoptó Colombia mediante la Ley 253 de 1996 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Su peligrosidad para la vida vegetal, animal y acuática radica en que contiene contaminantes peligrosos como aditivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados como el plomo (Pb), Cobalto (Co), arsénico (As), el cobre (Cu), el Cromo (Cr), el Zinc (Zn), el níquel (Ni) y el Cadmio (Cd) (Sánchez-Alvarracín et al., 2021).

En Colombia existen dos métodos principales para el aprovechamiento de los aceites lubricantes usados aprobados por legislación. El primer método tiene como punto de partida los aceites lubricantes usados tratados y sin tratamiento, en donde es posible la valorización o recuperación energética para uso de éste como combustible industrial y como parte de mezcla con otros combustibles (proporción menor a 5%), estos pueden ser usados en hornos cementeros, metalúrgicos o en plantas de generación de energía con sistema de control de emisiones atmosféricas eficientes respectivamente (Resolución 1446, 2005) ; El segundo método, es el reciclaje de aceites lubricantes usados a través del proceso de re-refinación, con el cual se recuperan principalmente bases lubricantes para la formulación de aceites minerales nuevos y derivados combustibles para uso industrial según lo establece en la NTC 5995.

El párrafo 2 del artículo 21 del Decreto 4741 de 2005 (actualmente compilado en el título 6 del Decreto Único Ambiental 1076 de 2015 del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible), establece que los fabricantes o importadores de productos que al desecharse se conviertan en residuos peligrosos, deberán presentar ante el Ministerio de Ambiente, planes de gestión de devolución de productos posconsumo (Decreto 4741, 2005). Estas iniciativas hacen parte de la política de producción y consumo sostenible que propicia, en la mayoría de los casos, la devolución de dichos productos por parte de los consumidores cuando se convierten en residuos al entrar en desuso. Sin embargo, los planes posconsumo para el manejo de los aceites lubricantes usados no han sido

desarrollados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, principalmente por las escasas alternativas tecnológicas conocidas y disponibles en Colombia para su tratamiento integral.

Colombia actualmente no cuenta con un plan de gestión posconsumo para los residuos de aceites lubricantes e industriales usados y, aunque exista un manual técnico para el manejo de los desechos de aceites minerales y sintéticos lubricantes en el país emitido en el 2014, no hay total garantía de que este residuo peligroso sea recolectado, transportado, tratado y dispuesto de manera ambientalmente segura y efectiva. En este sentido, hasta hoy el único documento cercano a un plan posconsumo para los aceites lubricantes usados ha sido la Resolución 1446 de 2005 que permite usar los aceites usados en mezclas como combustibles industriales. Es por ello, que surge la necesidad de valorar y analizar los procesos productivos, teniendo en cuenta el ciclo vida del producto, el residuo generado y su posible impacto en el medio ambiente.

La gestión adecuada y el uso razonable de los recursos juegan un papel central tanto en el desarrollo de una economía eficiente como en el mantenimiento de esos recursos para las generaciones futuras. La gestión de residuos de aceite lubricante es de inmensa importancia para la sostenibilidad de los recursos (por ejemplo, petróleo crudo) y mejores beneficios económicos, sociales y ambientales (Pinheiro et al., 2021).

Por otro lado, en Colombia muy poco se tiene conocimiento de los impactos ambientales de tecnologías como la re-refinación por destilación de capa fina para tratar aceites lubricantes usados, tecnologías actualmente implementadas por la empresa experta en la gestión integral de residuos industriales Industria Ambiental SAS-ATICA en la ciudad de Cartagena y que hoy cuenta con la única refinería de aceites usados en el país. Esto es de suma importancia brindar información de la valorización bajo este proceso que permita estimar la contribución ambiental en la recuperación de los aceites lubricantes e industriales usados e identificar áreas de mejora en el mismo acorde a lo establecido en la política ambiental para la gestión integral de RESPEL en el período 2022-2030, que propone unas metas estratégicas nacionales con las cuales se pretende visualizar

mejoras significativas en diferentes aspectos de la gestión integral de RESPEL, y en el caso de los aceites usados, se propone como meta a 2030 que se gestionen por medio de operaciones de reciclaje como re-refinación, al menos el 20 % de los aceites lubricantes usados (Y8) reportados como generados en el país (MADS, 2022).

Es por esto que en este trabajo provee información relacionada a la tecnología de re-refinación por destilación de capa fina de aceites lubricantes e industriales usado por parte de una compañía experta en la gestión integral de residuos industriales en la ciudad de Cartagena, para la obtención de derivados combustibles sustitutos, para la metodología se consideró los impactos relevantes de este tratamiento de disposición final por medio del análisis de ciclo de vida y su aporte a la sostenibilidad ambiental de Colombia. Adicional se quiere que esta investigación pueda brindar soporte a todos los trabajos adelantados y por realizar de las asociaciones con enfoque a las correcta disposición final de los aceites usados, en el marco de los compromisos ambientales adquiridos por Colombia a nivel internacional e internos generados a través del Consejo Nacional de Política Económica y Social- CONPES y que, además, permita ser tomada como aporte y contribución de política pública colombiana como instrumento de toma de decisión para las autoridades competentes en las medidas respectivas a la condiciones de disposición final segura y sostenible de aceites lubricantes usados.

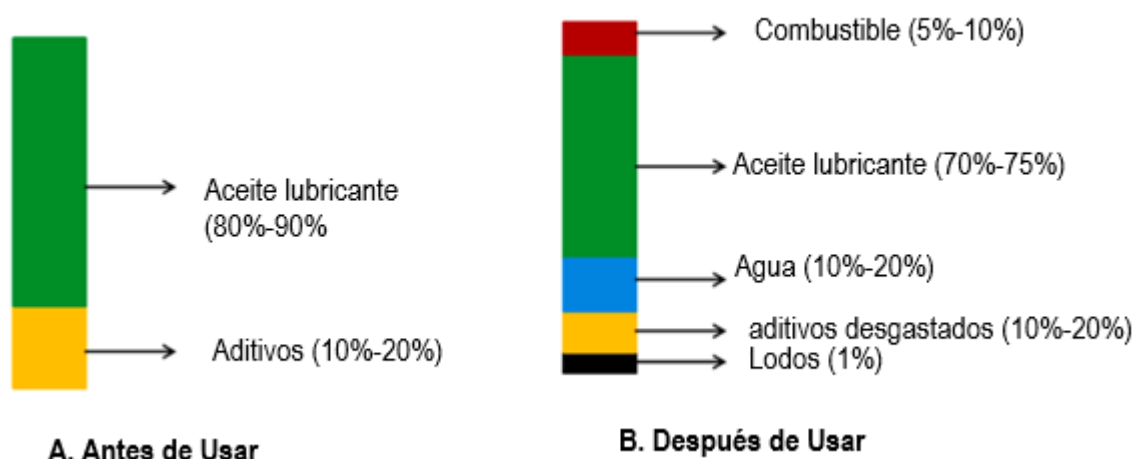


## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Generalidades de los Aceites Lubricantes e Industriales Usados

Los aceites lubricantes e industriales usado (ALIU) es un desecho común producido en las industrias petroquímica, manufacturera, automotriz y otros campos relacionados. Varios tipos de aceites minerales, como aceite lubricante, aceite de corte, aceite hidráulico, aceite de proceso y aceite eléctrico para diferentes propósitos, se consumen en grandes cantidades (más de 45 millones de toneladas) anualmente en todo el mundo (Xu et al., 2023).

El aceite base se define típicamente como aceite procedente del refinado de petróleo crudo (aceite base mineral) u obtenido por síntesis química (aceite base sintético) con un punto de ebullición entre 300°C y 565 C, que consiste en hidrocarburos de C18 a C40 (J. Speight & Exall, 2014). La composición típica del aceite lubricante nuevo y de desecho se muestra en la Figura 1. Es evidente que el aceite lubricante nuevo contiene 80–90 % de aceite base, ya sea crudo/mineral o sintético, y 10–20 % aditivos (Wozniak et al., 2020). Cuando este lubricante fresco se pone en funcionamiento (dentro del motor de combustión), pierde su lubricidad gradualmente debido a la acumulación de fueloil sin quemar, lodos, agua y descomposición de aditivos, y alrededor del 50% se consume en el proceso. La degradación del aceite lubricante reduce su vida, lo que limita severamente su reutilización. Por lo tanto, debe reemplazarse con aceite nuevo (El-Fadel & Khoury, 2001).



**Figura 1.**

*Composición típica de aceite lubricante fresco y usado. (Islam et al., 2021)*

Los lubricantes se utilizan ampliamente en muchos sectores e industrias importantes, incluidos el transporte, la fabricación, la generación de energía, el petróleo y el gas, los alimentos y los productos farmacéuticos. El influyente sector del transporte actualmente representa cerca del 60% de la demanda del mercado de lubricantes y se prevé que siga siendo un contribuyente clave en el desarrollo de futuros lubricantes (Nyholm & Espallargas, 2023).

La tabla 1 enumera algunas características de los lubricantes vírgenes para diferentes aplicaciones (fluidos de corte, aceites para engranajes, aceites hidráulicos, aceites de motor, marinos, y otros), y de ALU recolectados en generadores portugueses (garaje, industria y otros) donde se permite apreciar las diferencias entre cada uno de estos hidrocarburos.

**Tabla 1.**

*Características generales del aceite lubricante virgen y usados. (Pinheiro et al., 2017)*

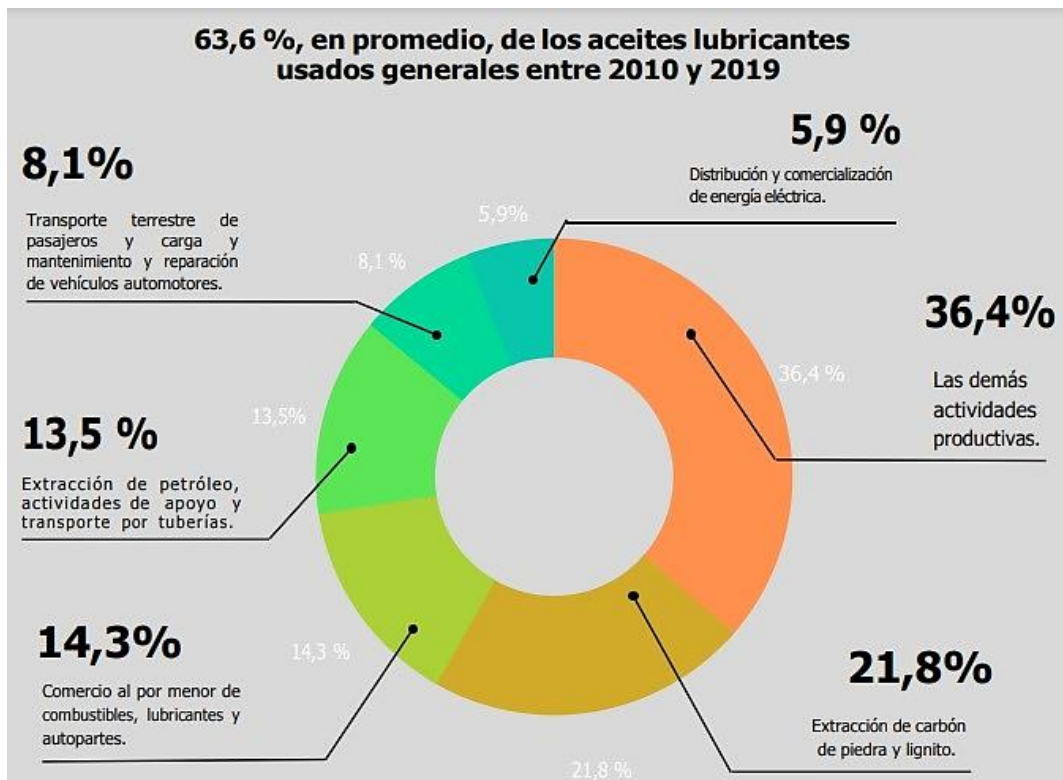
<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Lubricante virgen</b>		<b>Aceite Usado</b>	
		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<i>Densidad</i>	kg/m <sup>3</sup>	817	953	851	972
<i>Viscosidad cinemática a 40 ° C</i>	cSt	4	491	0.82	324
<i>Viscosidad cinemática a 100 ° C</i>	cSt	1	86	ND	ND
<i>Índice de viscosidad</i>	-	-13	314	ND	ND
<i>Índice de acidez total</i>	mg KOH/g	<QL	5.35	0.26	4.6
<i>Numero de saponificación</i>	mg KOH/g	<QL	64	2.12	21.8
<i>Contenido de carbón</i>					
<i>aromático</i>	wt. %	<QL	19.3	<QL	7.87
<i>Parafinas</i>	wt. %	23,9	75.4	34.1	62.1
<i>Nafténicos</i>	wt. %	21,3	46.27	29.9	65.8
<i>Agua</i>	wt. %	ND	ND	<QL	14.6
<i>Sedimentos</i>	wt. %	ND	ND	<QL	50.4
<i>Tensión Superficial</i>	Mn/m	ND	ND	22.4	33.2
<i>Bifenilos policlorados</i>	Ppm	ND	ND	<QL	3400
<i>Benzo(a)pireno</i>	mg/L	ND	ND	0.36	62
<i>Benzo(a)antraceno</i>	mg/L	ND	ND	0.87	30
<i>Contenido elemental</i>					
<i>P</i>	Ppm	<QL	150	57	1220
<i>Ca</i>	Ppm	38	8750	90	4190
<i>Cl</i>	Ppm	9	623	<QL	6012
<i>Cr*</i>	Ppm	ND	nd	5	24
<i>Fe</i>	Ppm	<QL	<QL	20	1210
<i>Pb*</i>	Ppm	ND	ND	3700	14000
<i>Si</i>	Ppm	<QL	370	11	879
<i>S</i>	wt. %	<QL	2.2	<QL	1.1
<i>Zn</i>	Ppm	48	1380	24	1670

*De la referencia: (Jafari & Hassanpour, 2015); ND: no determinado; QL - Límite de cuantificación.*

### **2.1.1. Gestión Aceites Lubricantes e Industriales Usados**

El mercado mundial de lubricantes tuvo un valor de 164,8 billones de dólares en 2022 y se prevé que alcance los 187,9 billones de dólares en 2027, con un crecimiento anual del 2,7 % entre ambos años. Factores como la rápida industrialización en Asia Pacífico, Oriente Medio y África tras el covid-19, el aumento de la automatización en industrias, el incremento de vehículos en carretera y la demanda de energía renovable impulsan el mercado. Sin embargo, los precios volátiles del petróleo y las estrictas regulaciones ambientales son desafíos clave para los lubricantes de base mineral (MarketsandMarketsTM, 2022).

Según la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) publicada el 30 de diciembre del 2021, el cual el DANE busca obtener información básica del sector manufacturero que permita el conocimiento de su estructura, características y evolución, para el año 2020 la cantidad de aceites minerales (Aceites lubricantes en bruto-básicos, aceites livianos y otros, aceites lubricantes, Aceites especiales para aislamiento-dieléctrico, aceites parafínicos y aceite mineral) consumidos en Colombia fue de 9.200 toneladas aproximadamente, el cual su valor en consumo fue alrededor de \$317 mil millones de pesos colombianos (DANE, 2021) .Según el IDEAM los aceites lubricantes usados se encuentran dentro de las corrientes de RESPEL que más se han generado en Colombia entre 2010 y 2019 con una participación del 8,4% del total de RESPEL generado durante este período, equivalente a una cantidad de 32.892 toneladas. Respecto a los aceites lubricantes usados, si bien su generación en ciertos sectores como el minero energético es mayoritario, este tipo de residuos se genera de forma habitual en muchas otras actividades productivas de diversa índole como se muestra en la Figura 2 (MADS, 2022).

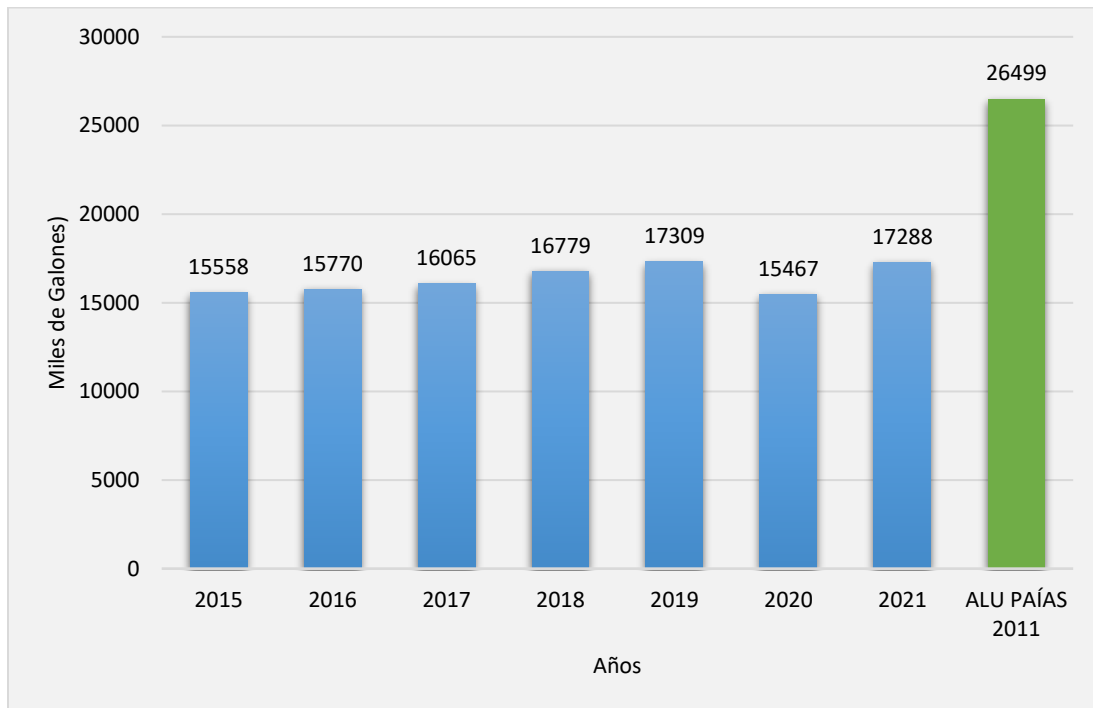


**Figura 2.**

*Actividades productivas que más aportaron a la generación de aceites lubricantes usados entre 2010 y 2019. Adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)*

En Colombia, según el último informe del Fondo de los Aceites Usados (FAU) , El volumen de aceite lubricante usado aprovechado y dispuesto correctamente por los Operadores "avalados" FAU para el cierre del año 2021 fue superior en un 10.5% en comparación con el año 2020 (Asociación Colombiana de petróleo ACP, 2022), año de inicio de la Pandemia por Covid19 el cual presentó un decrecimiento del 10% respecto al año anterior al total de aceites lubricantes usados que se estima es generado en el país. Al comparar los volúmenes de aceite usado aprovechado y dispuesto correctamente por operadores avalados por el FAU a través de los años y el volumen total de aceite usado generado en el país, se encuentra que se ha venido incrementando cada año el porcentaje de recolección y aprovechamiento del aceite usado con base en los planes de

manejo de aceite usado que desarrollan sus afiliados con los operadores, con excepción de la pandemia del 2020 que fue un año atípico debido a la misma como muestra la Figura 3.



**Figura 3.**

*Volumen total de aceite lubricante usado tratado y aprovechados por valorización energética por los Operadores "Avalados" FAU Vs. Vol. estimado generado País. Adaptado (Asociación Colombiana de petróleo ACP, 2022)*

## 2.2. Impacto de los Aceites Usados en la Salud Humana y el Medio Ambiente

### 2.2.1. Impacto de aceites usado en el suelo

La contaminación del suelo con aceites lubricantes usados se deriva de fugas y pérdidas de aceite en motores, vertidos indiscriminados en alcantarillas o en el suelo. Las consecuencias en las funciones del suelo pueden ser devastadoras, ya que las propiedades físicas, químicas y microbiológicas normales pueden verse obstaculizadas significativamente (Pinheiro et al., 2021).

El destino del aceite liberado al suelo está controlado principalmente por la naturaleza, la porosidad y la materia orgánica del suelo (Klamerus-Iwan et al., 2015). Adicional esta contaminación induce cambios sustanciales en los organismos vivos, principalmente los involucrados en el ciclo del nitrógeno (J. Speight & Exall, 2014). En caso de alto contenido orgánico, el suelo tiende a absorber el aceite y evitar su flujo hacia abajo, mientras que el suelo permeable con poca materia orgánica permite la migración del aceite y la contaminación de las aguas subterráneas.

Los metales pesados pueden inhibir fuertemente la producción primaria en el suelo, la mineralización de carbono, las transformaciones de nitrógeno y la mineralización de azufre y fósforo (Srivastava et al., 2017). Las altas concentraciones de metales tóxicos pueden causar inhibición metabólica y del crecimiento para la mayoría de las especies de plantas y pueden tener un efecto nocivo en la cadena alimentaria (Morkunas et al., 2018).

### **2.2.2. Impacto de aceites usado en el agua**

El sabor de alrededor de 106 L de agua podría verse afectado por 1 L de aceite usado; entre 50 y 100 ppm del aceite usado podría retrasar el proceso de tratamiento de aguas residuales. Además, la naturaleza hidrofóbica del aceite usado inhibe la disolución de oxígeno y aumenta la demanda química de oxígeno (DQO) en el agua (Mishra et al., 2020).

Los lubricantes en contacto con el agua forman una película orgánica de baja densidad, evitando la oxigenación de los seres vivos en el medio acuoso. Los diferentes constituyentes se someten a diferentes procesos lentos de volatilización, emulsificación, aglomeración, fotodegradación y biodegradación (ÖZBAY, 2016).

Al igual que en el suelo, el principal efecto de los hidrocarburos en el medio acuático es el estrés y luego el cambio en la comunidad de microorganismos. Por lo general, los organismos pueden ser inhibidos por la presencia de contaminantes específicos (por ejemplo, metales)(Kapoor et al., 2015) , aunque puede ocurrir un aumento de microorganismos capaces de biodegradar los hidrocarburos de bajo peso molecular (Deshpande et al., 2018).

Se encontró que el aceite lubricante usado es uno de los agentes mutagénicos más importantes en el medio acuático (Salam, 2016) . De hecho, los hidrocarburos tienen una mayor resistencia a la biodegradación, en comparación con otras sustancias orgánicas existentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales típicas. En general, los alcanos y alquenos de cadena corta son los que se degradan más fácilmente, seguidos de los alcanos ramificados y luego los aromáticos (Xue et al., 2015).El agua contaminada, en última instancia, puede llegar a los receptores de agua, provocando efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas naturales (J. G. Speight, 2016).

### **2.2.3. Impacto de aceites usado en el aire**

El aceite lubricante usado tiene un calor de combustión similar al de los combustibles derivados del petróleo (42.500 kcal / kg), pero es mucho menos costoso (Arpa et al., 2010). Por esta razón, puede ser utilizado como combustible primario o complementario para calderas industriales, quemadores domésticos de aceite, hornos rotativos de cemento, incineradores de disposición de residuos, entre otros.



La quema indiscriminada de aceites lubricantes usados, sin un pretratamiento de remoción de metales, genera importantes emisiones de metales. La combustión de 1L de estos puede dar lugar a 800 mg de Zn y 30 mg de Pb al aire, lo que corresponde a un aumento de 50 a 100 veces en comparación con los fuelóleos derivados del crudo, Además, la combustión produce otros compuestos nocivos como dioxinas, óxidos de azufre, compuestos nitro, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno, fosfatos, entre otros. Se forman altas concentraciones de HCl durante la combustión de WLO, como el aceite de corte y el aceite de procesamiento de metales, que pueden contener hasta un 5% de cloruro (Pinheiro et al., 2021).

### **2.3. Tecnologías de Regeneración de Aceites Lubricantes e Industriales Usados.**

La selección de las tecnologías de regeneración a utilizar para los aceites lubricantes depende de varios criterios tales como (I) Tecnología (temperatura de operación, cantidad de recuperación, calidad de los productos y etapa de desarrollo del proceso), (II) Los aspectos económicos (costos de agua, costos totales de energía requerida, escala unitaria, costos de equipo) y ( III) La protección del medio ambiente (eliminación de PCB, lodos ácidos generados, lodos de aceite residual, sustancias químicas peligrosas utilizadas). Hoy en día, existen muchas tecnologías de regeneración para generar aceite base para su reutilización. El marco operativo de todas las tecnologías abarca los siguientes cuatro pasos (Jafari & Hassanpour, 2015):

- A. **Deshidratación/ Eliminación de combustible:** Separación de componentes extraños en el aceite (agua, combustibles livianos) en función de la diferencia entre sus propiedades físicas y el aceite lubricante.
- B. **Desasfaltado:** El desasfaltado se realiza principalmente separación aprovechando las propiedades físicas como solubilidad o punto de ebullición por adición de ácido sulfúrico, método de tratamiento con solvente y separación de película o tratamiento térmico.

- C. **Fraccionamiento:** el fraccionamiento clasifica diferentes materiales en función de los puntos de ebullición de los componentes para seleccionar o eliminar un tipo específico de materiales.
- D. **Refinación:** el tratamiento final se realiza para eliminar algunos componentes extraños, como cloro, nitrógeno, oxígeno y azufre, que no pueden eliminarse mediante los pasos mencionados. A menudo se solicita arcilla o hidrotratamiento para el paso de acabado. Entre estas tecnologías, la diferencia importante es el procedimiento de desasfaltado y acabado.

## 2.4. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

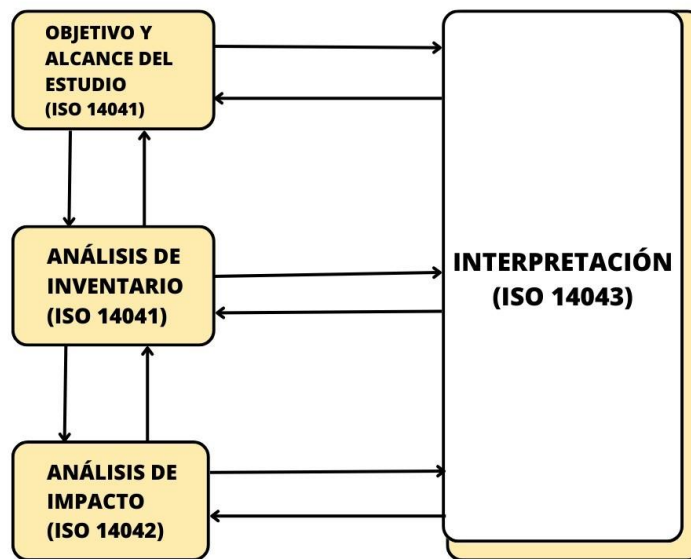
De acuerdo con las normas ISO 14040 (ISO, 2006), ACV se define como una técnica para "compilar y evaluar las entradas, salidas y posibles impactos ambientales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida". Las entradas incluyen la medición del consumo de materiales y energía, y las salidas, flujos de productos y subproductos y emisiones al aire, agua y suelo, entre otros flujos, que conformarán el inventario de ciclo de vida (ICV) del producto estudiado. Una vez consolidado el inventario, se calculan los impactos ambientales a través de la evaluación del impacto del ciclo de vida del producto (IACV) y se identifican los puntos críticos ambientales para la posterior interpretación de los resultados de acuerdo con las metas del ACV.

ACV (ISO, 2006) es una herramienta valiosa para obtener información sobre estos sistemas complejos para predecir su desempeño ambiental y poder comparar diferentes sistemas y configuraciones de manera consistente y transparente. Los ACV comprenden cuatro fases, que proporcionan el marco de una evaluación coherente de los sistemas de fabricación (Zhou et al., 2018):

- I. Definición de objetivo y alcance (p. ej., aplicación prevista, unidad funcional, límites del sistema).
- II. Análisis de inventario (p. ej., recopilación de datos y análisis de entrada y salida).

- III. Evaluación de impacto (evaluar la importancia de los posibles impactos ambientales utilizando los resultados del inventario).
- IV. Interpretación (reflexión crítica de los resultados del análisis de inventario y de la evaluación de impacto para concluir y llegar a recomendaciones)

El procedimiento de ACV se caracteriza por ser iterativo, donde cada etapa se retroalimenta del resto y la interpretación de resultados se realiza en cada una de ellas de manera que el proceso completo se encuentra intercomunicado como tal y se representa en la Figura 4. Esta conexión recíproca de fases puede conllevar a redefinir el alcance final varias veces a lo largo del análisis dada la variabilidad del sistema o a reunir más datos de los inicialmente previstos, pero a su vez asegura una coherencia e integridad de resultados.



**Figura 4.**

*Interacciones fases en ACV. Adaptado de (ISO, 2006).*

### **2.4.1. Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)**

En cualquier caso, norma ISO 14040 no habla de aplicar ninguna metodología en concreto sino de seleccionar qué clases de impactos se van a utilizar y asociarles los datos correspondientes ya sea por la aplicación de un método específico o no (Ruiz, 2016). Se muestra a continuación una lista de las principales categorías de impacto, su ámbito espacial y su indicador de medida establecido, así como una breve explicación de lo que representan cada uno de ellos:

- ❖ **Potencial de cambio climático.** El cambio climático, también conocido como potencial de calentamiento global con sus siglas en inglés GWP (Global Warming Potential), es un efecto importante asociado con el cambio climático y los gases de efecto invernadero en el aire, y podría afectar la salud del ecosistema, la salud humana y el bienestar material. El GWP se expresa en kg de equivalentes de CO<sub>2</sub>. El calentamiento global es causado principalmente, en la aplicación actual, por la quema de combustibles, ya sea a partir de la generación de electricidad (red), el transporte o los procesos industriales (Aresti et al., 2021).
- ❖ **Agotamiento capa de Ozono.** El potencial de agotamiento del ozono estratosférico con sus siglas en inglés ODP (Ozone Depletion potential) describe el impacto del agotamiento del ozono de diferentes gases, causando el adelgazamiento de la capa de ozono en la atmósfera superior, y se expresa en kg equivalentes de CFC-11 (Aresti et al., 2021).
- ❖ **Potencial de acidificación.** El potencial de acidificación con sus siglas en inglés AP (Acidification potential) describe el impacto de las sustancias acidificantes en las emisiones al aire, que son la principal causa de la lluvia ácida y la disminución de los bosques, y se expresa en equivalentes de kg SO<sub>2</sub>. Esta categoría de impacto está asociada con los contaminantes del aire, causados en la aplicación actual principalmente por la combustión de combustibles ya sea de la producción de electricidad o del transporte (Aresti et al., 2021).

- ❖ **Potencial de eutrofización.** El potencial de eutrofización con sus siglas en inglés EP (Eutrophication Potential) describe el impacto de altos niveles de macronutrientes en el medio ambiente, causados por emisiones al aire, agua o suelo. EP se expresa en kg PO<sub>4</sub> equivalentes (Aresti et al., 2021).
- ❖ **Potencial de Ecotoxicidad.** El potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce (FAETP) se refiere al impacto en los ecosistemas de agua dulce de las emisiones de sustancias tóxicas en el aire, el agua o el suelo, y se expresa en equivalentes de 1,4-diclorobenceno. El potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) es similar al FAETP y describe el impacto de las sustancias tóxicas en los ecosistemas terrestres. Las principales sustancias con potencial de ecotoxicidad incluyen el zinc, el cobre y los productos químicos orgánicos. La degradación del ecosistema podría considerarse como un impacto de punto medio, mientras que la disminución de la biodiversidad como un impacto de punto final (Aresti et al., 2021).
- ❖ **Potencial de toxicidad humana.** El potencial de toxicidad humana con sus siglas en inglés HTP (Human Toxicity Potential) describe el efecto de las sustancias tóxicas en la salud humana y se expresa en equivalentes de 1,4-diclorobencen (Aresti et al., 2021).
- ❖ **Formación de Oxidantes Fotoquímicos.** Formación de sustancias reactivas (principalmente ozono), perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas. La emisión de sustancias a la atmósfera se calcula con el modelo de trayectoria UNECE (incluido el destino), y se expresa en kg equivalentes de etileno / kg de emisiones (Huijbregts, 2016).

## **2.5. Antecedentes ACV Aceites Minerales Usados**

Los aceites lubricantes usados han sido cada vez más objeto de estudios principalmente sobre Análisis de ciclo de vida (ACV) en la literatura internacional desde el año 2000.

Puralube GmbH, una subsidiaria de Puralube Global, instaló una planta a escala industrial para la re-refinación de aceites lubricantes usados en el 2004 conocida como proceso HyLube, ubicada en Troglitz/Zeitz, Alemania; esta convertía 220 toneladas métricas por día de aceite usado en aceites base lubricantes y combustibles ecológicos de manera respetuosa con el medio ambiente. Las características clave del proceso incluían (1) procesamiento continuo de toda la carga de aceite usado en un ambiente rico en hidrógeno sin el uso de almacenamiento de aceite intermedio, (2) eliminación eficiente de contaminantes como compuestos orgánicos clorados, sulfurosos y oxigenados e hidrocarburos poliaromáticos, (3) el manejo de todos los compuestos sulfurosos y olorosos para eliminar las emisiones tóxicas y malolientes y (4) la producción de aceite base profundamente desulfurado y productos de combustible destilado de alta calidad constante. Los resultados del análisis de Ciclo de Vida realizada a esta planta confirmaron que, en casi todas las categorías, la refinación de aceite usado en el proceso Hylube es más aceptable ambientalmente que la combustión de aceites usados en hornos de cemento (Kalnes et al., 2006).

Kanokkantapong et al. (2009) también realizaron un ACL comparativo de seis escenarios para la gestión de ALU (dos refinerías y cuatro plantas de calderas). Esta evaluación ilustró que cada opción podría representar impactos ambientales significativamente diferentes. Los resultados mostraron un buen desempeño en las estrategias de reciclaje; sin embargo, el horno de cemento generó los impactos más bajos en términos de potencial de calentamiento global y generación de metales pesados, ya que permite la quema completa de los compuestos orgánicos que componen los aceites lubricantes usados, mientras que otros contaminantes, como los metales pesados, fueron capturados para reciclaje externo en forma de morteros.

Pires y Martinho (2013) compararon 16 estrategias de final de vida para ALU en Portugal, las cuales incluyeron el reciclaje durante la producción de arcilla expandida, el reciclaje y la producción de electricidad, la refinación, la recuperación de energía durante la producción de cemento y la recuperación de energía durante la producción de arcilla expandida.

Se puede observar en el estudio de Hassanain et al. (2017) en África la comparación de la refinación y la combustión ALU. Según los autores, el enfoque de gestión de ALU más amigable con el medio ambiente involucraba dos escenarios: reciclaje por re-combustión y recuperación por co-combustión, llegando a la conclusión de que la refinación de petróleo se destaca de las demás hacia una producción más limpia. Con cálculos realizados sobre una sola empresa de tratamiento aceites lubricantes usados en Egipto, Hassanain et al. (2017) señalaron que el mejor resultado (refinado) está garantizado dependiendo de la calidad de estos aceites, ya que, si tiene más aditivos y altos valores de viscosidad, el escenario puede cambiar y dejar de ser la mejor alternativa.

Botas et al. (2017) también compararon el desempeño energético y ambiental de las estrategias de fin de vida relacionadas con ALU por ACV, con el objetivo de medir la productividad de una determinada planta de una empresa en Madrid, España, y analizar el desempeño de un aceite base refinado frente a uno de origen primario (o de aceite virgen). El estudio de Botas et al. (2017) afirma que la refinación es mucho más respetuosa con el medio ambiente e incluso sugiere más investigaciones para optimizar el proceso de refinación existente, pero no compara la refinación de petróleo con la combustión para obtener energía, por ejemplo.

Finalmente, Tsambe et al. (2019) han avanzado recientemente en los estudios de ACV en aceites lubricantes usados en Brasil, manejando dos enfoques de re-refinación. El estudio concluye que el ciclo de vida de ALU con transporte para transbordo provoca menores impactos que sin dicho paso o adoptando el transporte por carretera, por ejemplo.

En el año 2012 el proceso de re-refinación llega a Colombia y se registra a través de un artículo de revista llamado “Re-refinación de aceites usados en Colombia: primer paso hacia la sostenibilidad de un recurso no renovable” que menciona de manera general la normatividad asociada al manejo y disposición final de este residuo, la forma en que ese momento se le daba manejo y ventajas de la nueva tecnología que llega a Colombia. (Echeverry, 2012). Se desarrolla en la universidad nacional de Colombia el trabajo de grado de Magister en Medio Ambiente y Desarrollo con título “Beneficios ambientales de un proceso de re-refinación de aceites lubricantes usados en Colombia” en donde , se realiza la evaluación del ciclo de vida del aceite lubricante usado en su etapa final, para determinar los beneficios ambientales del proceso de Re-refinación, mediante un análisis comparativo de tipo descriptivo, entre el sistema de tratamiento de Re-refinación (modelo Puerta-Puerta) y la Tecnología de Valorización energética (modelo Puerta-Tumba) como sistema de referencia dentro del mismo sistema de producto. Para ambos procesos se realizó la evaluación ambiental mediante el método ReCiPe de punto medio, disponible en el Software Umberto el cual se obtuvieron resultados en 12 categorías de impacto ambiental y en la demanda acumulada de energía para cada vía evaluada, con resultados directos en la sustitución de materias primas e impactos ambientales y energéticos evitados, lo cual otorga créditos a cada vía de tratamiento por la reducción de los impactos totales en el ciclo de vida del aceite lubricante (Muñoz, 2020).

## **2.6. Marco Normativo Aceites Lubricantes Usados**

Con una conciencia ambiental global en constante crecimiento, muchos países han desarrollado regulaciones para guiar la gestión de desechos peligrosos. A continuación, se presenta el contexto normativo internacional y nacional relacionado con los aceites lubricantes e industriales usados.



### **2.6.1. Contexto internacional aceites lubricantes usados**

En los Estados miembros de la Unión Europea (UE), la Directiva Marco de Residuos (DMA) 2008/98 /CE modificada por la Directiva (UE) 2018/851 establece el marco para la gestión de aceites lubricantes usados. En esta se proponen pautas de protección del medio ambiente y la salud humana para prevenir o reducir los impactos negativos de estos aceites, así como para reducir las consecuencias del uso de recursos y mejorar la eficiencia de dicha práctica. El marco define el ambicioso objetivo de acercar la UE a una "sociedad del reciclaje". Por lo tanto, la gestión de Aceites lubricantes usados debe realizarse de acuerdo con la jerarquía de residuos (1- prevención, 2-reutilización, 3-reciclaje, 4-recuperación de energía y 5-eliminación). El artículo 21 modificado establece que los Estados miembros adoptarán medidas para garantizar que **i)** los aceites usados se recogen por separado a menos que esto no sea técnicamente factible; **ii)** se tratan los aceites usados, dando prioridad a la regeneración o alternativamente a otras operaciones de reciclado equivalentes; **iii)** los aceites usados de diferentes características no se mezclan, y los aceites usados no se mezclan con otros tipos de desechos o sustancias, si dicha mezcla dificulta la regeneración u otra operación de reciclaje (Pinheiro et al., 2021).

Se implementaron sistemas de gestión de base de libre mercado en países como Países Bajos y el Reino Unido, donde el valor de mercado de los aceites usados juega un papel importante y los operadores de la cadena de recuperación contratan en condiciones de libre mercado para garantizar la recogida y el destino adecuados de aceites lubricantes usados (Pires & Martinho, 2013). Finlandia aplica un sistema dirigido por el gobierno, donde los productores pagan una tarifa al Estado, que es responsable de la organización general y remunera a los operadores en la cadena de recuperación (Kapustina et al., 2014; Kapustina & Horttanainen, 2016). Francia aplica un sistema de gestión similar al de Finlandia. La mayoría de los países de la Unión europea aplican programas de responsabilidad ampliada del productor, incluidos Austria, Bélgica, Bulgaria, Alemania, Letonia, Polonia, Portugal, España, Eslovenia y Croacia (Pires & Martinho, 2013).

En los Estados Unidos, la Orden Ejecutiva de la Casa Blanca No. 13101 (1998) trata de "Hacer verde al gobierno" mediante la prevención de desechos, el reciclaje y la adquisición federal. Las regulaciones estadounidenses son cada vez más restrictivas con respecto al contenido, uso y eliminación de lubricantes. Cuatro reglamentos son de especial interés a nivel federal (Bart et al., 2013):

- Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA): regula la fabricación, importación, distribución y procesamiento de todos los productos químicos tóxicos (requiere aprobación de la EPA).
- Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA): regula los desechos peligrosos y los desechos sólidos.
- Ley de Responsabilidad y Compensación de Respuesta Ambiental Integral (CERCLA): impone responsabilidad por la limpieza de la contaminación causada por sustancias peligrosas.
- Ley de Enmiendas y Reautorización del Superfondo (SARA): enmienda y amplía CERCLA para incluir perfiles toxicológicos de sustancias peligrosas.

A nivel federal de EE. UU., El "aceite usado" se gestiona según un conjunto de normas (40 CFR 279) desarrolladas por la EPA en virtud de la RCRA. Las regulaciones ambientales federales de los EE. UU. Que rigen la prevención de derrames de petróleo, la notificación de derrames y la limpieza hacen poca distinción entre el aceite de petróleo y el aceite vegetal.

El aceite usado que no se recicla de acuerdo con los estándares federales está sujeto a ser manejado como un desecho peligroso si cumple con la definición reglamentaria de desecho peligroso (por ejemplo, contiene ciertos metales y productos químicos listados por la EPA por encima de ciertos límites) (Pinheiro et al., 2021). Las regulaciones de aceite usado de la EPA permiten cuatro tipos de reciclaje:

- Reacondicionamiento del aceite in situ para eliminar las impurezas;
- Utilizar el aceite como materia prima para una refinería de petróleo;
- Volver a refinar el aceite en una nueva base; o

- Procesar y quemar el aceite para la recuperación de energía.

### **2.6.2. Contexto nacional aceites lubricantes usados.**

***Marco institucional gestión aceites minerales usados en Colombia.*** Para comprender mejor la Política como intervención pública, se debe tener en cuenta que existen varios actores del Sistema Nacional Ambiental (SINA) que intervienen en su implementación para la gestión de residuos peligrosos, entre estos los aceites minerales usados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022) los cuales se mencionan a continuación:

- ❖ En el nivel central y de gobierno, el MADS es el encargado de formular la política, establecer la normativa ambiental en la materia y hacer el seguimiento a su implementación con la participación de otros ministerios, como el Ministerio de Salud y Protección Social. A su vez, es la autoridad nacional competente para la implementación de los Convenios de Basilea y Estocolmo y del Protocolo de Montreal, entre otros convenios y acuerdos ambientales internacionales.
- ❖ El IDEAM, adscrito al MADS, tiene competencia para administrar los diferentes sistemas de información nacional relacionados con RESPEL —como el Registro de Generadores de RESPEL, el Inventario Nacional de PCB y el Registro Único Ambiental (RUA)—, así como de emitir las estadísticas nacionales de generación y manejo y de establecer los protocolos de ensayo para la caracterización de RESPEL. Esta será la entidad encargada de administrar los nuevos desarrollos informáticos que se vienen adelantando, como el RUA-RETC y el Sistema de Declaración y Trazabilidad de RESPEL.
- ❖ Otro actor del nivel central en la implementación de la Política es la ANLA, con un papel importante desde el 2012. En la actualidad, es la entidad competente para autorizar los movimientos transfronterizos de RESPEL y para evaluar y realizar el

seguimiento y control ambiental a los planes y sistemas de devolución de residuos posconsumo.

- ❖ En el nivel territorial se encuentran las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible y las autoridades ambientales urbanas a quienes, como máxima autoridad ambiental en cada jurisdicción, les compete vigilar la generación y el manejo de RESPEL, implementar los sistemas de información relacionados, aprobar las licencias ambientales a las empresas gestoras de RESPEL, entre otras funciones. Así mismo, los municipios deben identificar y localizar áreas potenciales para la ubicación de la infraestructura para el manejo de RESPEL en los planes de ordenamiento territorial (POT), así como apoyar los programas sobre RESPEL que establezcan las autoridades ambientales y la realización de campañas de sensibilización y educación a la ciudadanía que promuevan la gestión integral de estos residuos.
- ❖ Otros actores a nivel sectorial que desde sus competencias ejercen funciones sobre los RESPEL, a nivel central y descentralizado, son las autoridades de los sectores de salud, agricultura, minas y energía, transporte —relacionado con el transporte de mercancías peligrosas; entre ellas, residuos o desechos—, aduanas, entre otros.
- ❖ Finalmente, el sector productivo, las empresas de servicios —como los gestores de RESPEL—, los laboratorios de ensayo, las entidades certificadoras, la academia y la sociedad civil son actores de relevancia en el desarrollo de la gestión integral de RESPEL.

***Marco normativo aceites minerales usados colombia.*** Colombia se ha destacado por la protección al medio ambiente, como se advierte desde la expedición de la Constitución Política del año 1991 en la cual se crearon entes para vigilar el buen manejo de los recursos naturales y la prevención de la contaminación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Los aceites lubricantes usados son clasificados como residuos peligrosos en el Anexo I, numerales 8 y 9 del Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) del 22 de marzo de 1989 y vigente a partir del 5 de mayo de 1992. En Colombia este Convenio fue ratificado mediante la Ley 253 de enero 9 de 1996, que considera el aceite lubricante usado como uno de los desechos peligrosos para controlar, debido a los contaminantes altamente tóxicos que lo componen y que afectan a los seres vivos y al ambiente en su conjunto.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la expedición del Decreto 4741 de 2005, clasificó los aceites usados como residuos peligrosos y reglamentó parcialmente su manejo, guardando relación con el artículo 79 de la Constitución Política Nacional que establece que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. El anexo I del Decreto 4741 de 2005 se clasifica bajo las siglas Y8 y Y9 los aceites usados o sus emulsiones como residuos o desechos peligrosos y que además el Artículo 32 del mismo decreto prohíbe quemar residuos o desechos peligrosos a cielo abierto. Este decreto es ratificado en el Título 6, Anexo I del Decreto 1076 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Según la Resolución 1446 de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial “Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998, que establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma, como combustible único o mezclado con otros en hornos y calderas. Esta normativa no obliga a retirar los compuestos y moléculas más peligrosas que se encuentran presentes en los aceites lubricantes usados, lo cual permite su quema bajo condiciones no controladas que emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial, según estudios desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental–EPA” (Jacinto, 2008). Específicamente la resolución 1446 del 2005 describe los procesos en los cuales los aceites lubricantes usados pueden

ser sometidos a combustión, sus condiciones técnicas para ser utilizados bajo este proceso al mezclarse con otros combustibles, y fija los límites máximos de contaminantes que se admiten en aceites usados tratados sin hacer mención específica a contaminantes que puedan generarse por su combustión en cualquier forma o cantidad (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

Según lo referenciado en el artículo 2 de la resolución 1446 del 2005, los **aceites lubricantes usados sin tratar** pueden ser utilizados a) En el caso de calderas y hornos de tipo industrial o comercial, se podrá emplear mezclado con otros combustibles, en una proporción menor o igual al 5% en volumen de aceite usado; b) En hornos cementeros, en la industria metalúrgica o en plantas de generación de energía, siempre y cuando tengan sistemas de control de emisiones de material particulado de alta eficiencia (mayor al 95%), como combustible único o mezclado con otros tipos de combustibles en cualquier proporción, y c) En ninguno de los casos anteriores, el aceite usado podrá contener concentraciones de bifenilos policlorados (PCB) o terfenilos policlorados (PCT) mayores a 50 ppm ni concentración de halógenos totales (expresado como HCl) mayores a 1.000 ppm. Por otra parte, **el aceite lubricante usado tratado** puede ser utilizado en: a) En calderas y hornos de tipo industrial o comercial, se podrá emplear mezclado con otros combustibles, teniendo en cuenta los porcentajes y los límites máximos de contaminantes consagrados en la Tabla 2; b). Debe tener como mínimo tratamiento primario; c) Los sistemas o equipos de alimentación de combustible deberán poseer mecanismos para su pulverización o atomización y control de alimentación de oxígeno. A continuación, se presentan los límites en concentración de contaminantes (ppm) establecidos para los diferentes tipos de mezclas, que establece la resolución 1446 de 2005:

**Tabla 2.**

*Límites máximos de contaminantes para mezcla de aceites usados tratados en Colombia para uso como combustibles establecidos en la Resolución 1446 de 2005.*

<b>Contaminante</b>	<b>Máxima concentración de contaminante (ppm)</b>	
	<b>Para mezcla hasta del 40%</b>	<b>Para mezcla hasta del 80%</b>
<i>PCB</i>	15	5
<i>Halógenos orgánicos totales (como HCl)</i>	0	0
<i>Halógenos totales (Como HCl)</i>	650	400
<i>Cadmio</i>	2	1
<i>Cromo</i>	8	3
<i>Plomo</i>	50	10
<i>Arsénico</i>	2	1
<i>Níquel</i>	1.5	1
<i>Zinc</i>	120	60
<i>Estaños</i>	5	3
<i>Bario</i>	3	1
<i>Punta de chispa (°F, valor mínimo)</i>	> 170	>170

*Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial ,2005)*

La violación a lo dispuesto en la presente disposición dará lugar a la imposición de las medidas preventivas y sancionatorias a que haya lugar, de conformidad con lo consagrado en el artículo 85 de la Ley 99 de 1993. Por otra parte, es importante impartir una revisión puntual de los límites de emisión definidos en la resolución 1309 del 2010 que establece los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas de actividades industriales resumidos en esta puesto que la combustión de los aceites lubricantes puede sobrepasar los límites descritos en la Resolución 1309 y adicional, se puede observar que aunque ambas resoluciones hablan respecto a los

límites de contaminantes permitidos en procesos de combustión , en la resolución 1446 no mencionan los límites de contaminantes importantes como los son el material particulado, Dióxido de azufre, Óxidos de nitrógeno, Dioxinas y furanos entre otros que lo menciona la resolución 1309. De igual forma, una situación particular se logra referenciar en lo establecido en la resolución 2254 de 2017 que establece modificaciones a la resolución 601 de 2006 denominada la norma de calidad del aire o nivel de inmisión en condiciones de referencia y la Resolución 1541 de 2013 para emisiones de olores ofensivos al aire, cuando estos son quemados sin los controles adecuados (Muñoz, 2020).

El Decreto 1076 de 2015 - Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en su artículo 2.2.5.1.9.1, numeral 2.2.2 prohíbe la combustión de los aceites usados en los casos de material particulado y dióxido de azufre fuera de norma. Adicional, el proceso de combustión de aceites minerales usados debe estar en concordancia con la Resolución 909 de 2008 que establece los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas puntuales de actividades industriales; así mismo con la Resolución 610 de 2010 establece modificaciones a la Resolución 601 de 2006 la cual a su vez establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, en condiciones de referencia; y con la Resolución 1541 de 2013 por la cual se establecen los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión y el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones.

En el Decreto 4741 de 2005 en su capítulo IV, establece que los fabricantes o importadores de productos que al desecharse se conviertan en residuos peligrosos, deberán presentar ante el Ministerio de Ambiente, Planes de gestión de devolución de productos posconsumo para plaguicidas en desuso, sus envases o empaques y los embalajes que se hayan contaminado con plaguicidas (Corriente Y4) , fármacos o medicamentos vencidos (Corriente Y3) y Baterías usadas plomo-ácido (Corriente Y31) (Decreto 4741, 2005). Esto indica que en la actualidad no existe en Colombia un plan de gestión posconsumo para los aceites lubricantes usados y su embalaje.



La Ley 1252 del 2008 de nombre “Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones”, contiene los lineamientos para regular todo lo relacionado con la importación y exportación de residuos peligrosos en el territorio nacional según lo establecido en el convenio de Basilea, previendo la disposición adecuada de los residuos peligrosos generados en Colombia y su eliminación responsable. Al ser los aceites usados categorizados como un residuo peligroso según el Decreto 4741, a continuación, se detallan los principios más importantes de la Ley 1252 que aplican al manejo adecuado de los aceites lubricantes usados dado su peligrosidad (Muñoz, 2020):

- Artículo 2. Numeral 2: Minimizar la generación de residuos peligrosos mediante la aplicación de tecnologías ambientalmente limpias y la implementación de los planes integrales de residuos peligrosos.
- Artículo 2 numeral 4. Diseñar planes, sistemas y procesos adecuados, limpios y eficientes de tratamiento, almacenamiento, transporte, reutilización y disposición final de residuos peligrosos que propendan al cuidado de la salud humana y el ambiente.
- Artículo 2 numeral 5. Implementar estrategias y acciones para sustituir los procesos de producción contaminantes por procesos limpios; inducir la innovación o reconversión tecnológica, las buenas prácticas de manufactura o la transferencia de tecnologías apropiadas; formar los recursos humanos especializados de apoyo; estudiar y aplicar los instrumentos económicos adecuados a las condiciones nacionales para inducir al cambio en los procesos productivos y en los patrones de consumo.
- Artículo 2 numeral 7. Aprovechar al máximo los residuos peligrosos susceptibles de ser devueltos al ciclo productivo como materia prima, disminuyendo así los costos de tratamiento y disposición final.
- Artículo 2 numeral 8. Desarrollar planes y actividades acordes con la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos que

resuelvan los graves problemas que conllevan la generación y el manejo inadecuado de los residuos peligrosos.

- Artículo 2 numeral 12. Generar modelos eficientes de gestión de residuos peligrosos, que, con apoyo de la ingeniería y la tecnología disponible, se aproximen a la realidad ambiental del país y sirvan como herramientas de prevención, vigilancia y contingencia.

Actualmente el Congreso de la República, y desde hace tres legislaturas, viene trabajando un proyecto de ley, a través de la comisión 5ª de la Cámara de Representantes, “por la cual se establecen las condiciones de disposición final segura de los aceites lubricantes usados y de los aceites industriales usados en el territorio nacional y se prohíbe la combustión de estos o su reutilización parcial o total sin tratamiento de transformación”.

La normatividad principal para los aceites lubricantes usados en Colombia se presenta en el Anexo 1 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

Evaluar el impacto ambiental de los aceites lubricantes e industriales usados en el proceso de refinación de una planta de disposición final de residuos industriales utilizando la metodología de ciclo de vida en Cartagena.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- ❖ Delimitar el ciclo de vida del aceite lubricante e industrial usado recuperado a partir del balance de entradas y salidas del proceso de aprovechamiento en una planta de Re-refinación en Cartagena, y determinar los impactos generados al medio ambiente asociados a este.
- ❖ Determinar las categorías de impactos ambientales que son afectados en el proceso de Re-refinación de aceite usado lubricante en el análisis de ciclo de vida.
- ❖ Hallar el aporte del proceso de re-refinación de aceite lubricante usado como proceso de disposición final sostenible para este residuo peligroso.
- ❖ Proponer recomendaciones enfocadas a la economía circular de un recurso no renovable como lo son los aceites lubricantes usados y a la reducción de este residuo peligroso como contaminante en Colombia.

## **4. MARCO METODOLÓGICO**

El análisis de ciclo de vida desarrollado en el presente trabajo de grado fue realizado para determinar el desempeño ambiental del proceso de re-refinación de aceites usados llevado a cabo en la planta de ATICA ubicada en Cartagena y se guio bajo los lineamientos de la norma ISO 14044 como se detalla a continuación.

### **4.1. Fase I: Definición de Objetivo y Alcance ACV Re-Refinación Aceites Usados Planta ATICA**

#### ***4.1.1. Modelo ACV proceso re-refinación ATICA***

En la presente investigación se aplicó un análisis tipo descriptivo modelo “cradle to gate” o “Cuna-Puerta” (Ruiz, 2016) para la tecnología de re-refinación por tecnología de capa fina: La actividad de reciclaje de aceites usados mediante re-refinación, comprende el momento desde el cual se recoge el aceite lubricante en los sitios de generación y se transporta posteriormente a la planta de tratamiento de ATICA (cuna), hasta el momento en el cual se generan cuatro tipos de subproductos de combustibles alternativos (Puerta).

#### ***4.1.2. Sistema función para ACV***

El sistema objeto de este estudio es el proceso de re-refinación por destilación de capa fina implementado por la compañía Industria Ambiental SAS - ATICA, la cual se encuentra ubicada en la Entrada de la Zona Franca de La Candelaria, Sector de Mamonal, Cartagena, Departamento de Bolívar. La empresa ATICA se encuentra localizada sobre la margen derecha de la vía que comunica a la zona industrial de Mamonal con la zona franca de la Candelaria, en un área total de 20.000 m<sup>2</sup>, bajo la siguiente nomenclatura km 10, Cra 56 No 5-33 como se muestra en la Figura 5.

### Figura 5.

Ubicación de la planta Industria Ambiental sede Cartagena. (10.324646211317615, -75.49586437906596). Fuente: Google Earth



#### 4.1.3. Descripción proceso refinera ATICA

El ciclo de vida del aceite lubricante usado analizado en el presente estudio inicia en el momento que se recogen en las ciudades principales del país y son transportados a la planta ATICA en Cartagena; En esta etapa el aceite usado finaliza su ciclo de vida reciclado en la planta de re-refinación, para convertirse en subproductos que se incorporan en el mercado de los combustibles sustitutos como son fondo sustituto de Fuel Oil, sustituto de base parafínica, sustituto de ACPM y sustituto de Nafta. Se describe el

ciclo de vida en la etapa del fin de vida del aceite usado bajo tecnología de re-refinación de capa fina con enfoque cuna-puerta.

**Alimentación a proceso refinería.** Una de las variables más importantes en el proceso de re-refinación de aceite usado es la humedad, la cual tiene un impacto significativo en el rendimiento del proceso. El aceite usado alimentado en la refinería del proceso de ATICA debe contener un porcentaje de humedad <1%. La alimentación de aceite usado es enviada con la ayuda de bombas hacia el Flash-Tank, donde previamente pasan por un sistema de filtrado con el objetivo de retener los sedimentos y suciedad que pueda traer el alimento. Posterior a esto el aceite para destilar recircula a través de un intercambiador de calor a presión atmosférica, donde los aceites más livianos y agua entran en ebullición y sus vapores emergentes pasan a un sistema de enfriamiento rápido, y de esta manera se convierten en estado líquido para su posterior almacenamiento.

**Evaporación refinería.** Posterior a la etapa de deshidratación, alcanzando una temperatura en el Flash-Tank superior a los 200 °C, el producto es enviado hacia el evaporador, en donde se obtiene como destilado Gas Oil o ACPM. El Gas Oil compuesto de aceites medios de destilación hierve a partir de los 190°C a presión atmosférica. En esta etapa de evaporación se obtienen principalmente los vapores de hidrocarburos saturados o parafínicos (Gas Oil), los cuales pasan a través de un sistema de enfriamiento que los convierte a estado líquido y son recibidos en un tanque de recuperación de Gas Oil. El producto base es enviado por gravedad hacia el sistema de destilación principal. El proceso de evaporación es efectuado al vacío.

**Destilación refinería.** El equipo de destilación es el principal proceso para la recuperación de aceite en refinería de ATICA. Básicamente son destiladores de película delgada los cuales se encuentran enchaquetados y por donde circula acetite térmico (Calefactor). Por el interior de los destiladores principales se encuentra un agitador película de barrido de corto recorrido que cumple una doble funcionalidad, garantizar la homogeneidad de la película delgada en las paredes internas de los destiladores y enfriar el destilado que es arrastrado con la ayuda del sistema de vacío al interior del agitador.

Los productos de la destilación son un aceite base y un fondo denominado residuo (Fuel Oil). El aceite base re-refinado obtenido como producto principal es almacenado en el tanque a la salida respectiva de cada destilador, los cuales son transportados a estos por medio de bombas, las cuales se activan cuando se alcanza un nivel establecido en cada uno de los tanques. De la misma manera el residuo obtenido durante el proceso de destilación en cada equipo de destilación es almacenados en tanques de residuo que funcionan con un lazo de control igual al de los tanques de aceite base, los cuales se bombean hacia el tanque intermedio en el cual se aprovecha la temperatura con la cual sale el residuo del proceso.

Finalmente, el aceite base obtenido de la re-refinación del aceite usado pasa a través de un sistema de mejora en donde se remueve cualquier impureza con la que venga el producto y se le retira el olor, obteniendo así un producto listo para comercializar.

**Almacenamiento producto terminado.** Una vez se obtienen los productos del proceso de Re-refinación del aceite mineral usado, pasarán los tanques de producto terminado para su posterior venta como combustibles alternativos. Las propiedades de estos se observan en el Anexo 2.

#### **4.1.4. Unidad funcional ACV aceites minerales usados planta ATICA Cartagena**

Se definió como unidad funcional dentro del estudio **1 kg de aceite mineral usado** y recolectado, que ya cumplió su función como aceite mineral según su aplicación y es potencialmente recuperable mediante procesos tecnológicos de Re-refinación con la finalidad de obtener subproductos diferentes al ALU con aplicaciones útiles en el sector industrial.

#### **4.1.5. Calidad de datos ACV planta ATICA**

La información primaria asociada al proceso tecnológico de re-refinación necesaria para realizar el análisis de ciclo de vida para esta tecnología fue suministrada directamente por Industria Ambiental SAS – ATICA a través de registros propios de la compañía en cuanto a información logística y proceso de transformación para su posterior comercialización de los productos de refinerías.

Adicionalmente, la revisión del proceso industrial fue apoyada por el ingeniero químico de la empresa ATICA quien es el director de producción de aceites y refinación junto con el coordinador de producción y jefe de mantenimiento de la planta.

El proceso de sustitución de consumo de materias primas e impactos generados fue modelado en el Software OPENLCA con información secundaria proveniente de la base de datos ECOINVENT 3.8, de la cual esta última se apoyó su información para procesos que no se contaba detallado en la Tabla 3.



**Tabla 3.**

*Procesos usados de la base de datos Ecoinvent para modelos en el Software OPENLCA*

<b>Nombre de proceso</b>	<b>Nombre proceso OPENLCA</b>	<b>Periodo de Tiempo</b>	<b>Geografía</b>	<b>Tipo</b>
<i>Producción Base lubricante de Crudo</i>	base oil production, petroleum refinery operation   base oil   Cutoff, U	2013 - 2021	CO: Colombia	Sustitución de materia prima
<i>Producción Fuel oil a partir de Crudo</i>	heavy fuel oil production, petroleum refinery operation   heavy fuel oil   Cutoff, U – CO	2013 - 2021	CO: Colombia	Sustitución de materia prima
<i>Producción Diesel a partir de Crudo</i>	diesel production, low-sulfur, petroleum refinery operation   diesel, low-sulfur   Cutoff, U	2013-2021	CO: Colombia	Sustitución de materia prima
<i>Producción Nafta a partir de Crudo</i>	naphtha production, petroleum refinery operation   naphtha   Cutoff, U	2013-2021	CO: Colombia	Sustitución de materia prima
<i>Producción de energía eléctrica</i>	electricity production, medium voltage, petroleum refinery operation   electricity, medium voltage   Cutoff, U	2013-2021	CO: Colombia	Suministro de energía eléctrica
<i>Producción gas natural</i>	natural gas, high pressure   Cutoff, U	2015-2021	South Africa	Suministro gas natural

**Fuente:** *Elaboración propia.*

#### **4.1.6. Objetivo del ACV proceso ATICA**

El objetivo de este estudio fue evaluar los beneficios ambientales del tratamiento de 1 kg de aceites lubricantes usados mediante el uso de la tecnología de re-refinación por destilación de capa fina llevado a cabo en la planta de tratamiento de residuos industriales de la empresa Industria Ambiental SAS – ATICA, desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida para la fase de fin de la vida, como una manera de ampliar la base de información de las tecnologías de reciclaje de ALU aprobadas por la normatividad colombiana.

#### **4.1.7. Audiencia objetivo**

La audiencia objetivo comprende los usuarios directos e indirectos de la tecnología presentada en este análisis de Re-refinación por película de barrido (capa fina) de aceites usados. Si bien la información publicada en este análisis se encuentra en un contexto académico, cualquier parte interesada tiene la posibilidad de consultar los resultados generados en la esta investigación para utilizarlos en análisis comparativos con otros sistemas de tratamiento de aceites minerales usados.

#### **4.1.8. Alcance de ACV proceso ATICA**

Se realizó un análisis tipo descriptivo del sistema de tratamiento de aceites lubricantes usados utilizando la tecnología de re-refinación (modelo Cuna-Puerta) por destilación de película fina, como sistema de referencia para tratamiento de ALU y disposición final de estos, mostrando un perfil ambiental característico de la tecnología evaluada a partir de las categorías de impacto ambiental estudiadas para los flujos de referencia y las fases de proceso de ATICA.

#### 4.1.9. Metodología de evaluación de impacto de ciclo de vida y tipos de impactos

Se implementó para el Análisis de Ciclo de Vida y la evaluación de impactos el software OpenLCA versión 1.11 lanzado el año 2022. OpenLCA que es un software de código abierto para la evaluación del ciclo de vida (LCA) y la evaluación de la sostenibilidad.

La evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA) se realizó con base en la aplicación del método de punto medio de ReCiPe 2016 (H) V1.13. La tabla 4 muestra las 12 categorías de impactos consideradas en el proceso de Re-refinación de aceites usados en planta ATICA.

**Tabla 4.**

*Categorías de impactos consideradas para proceso de re-refinación aceites usados planta ATICA bajo método Recipe punto medio (H) V1.13*

<b>Categoría de Impacto</b>	<b>Unidad de Referencia</b>
cambio climático	kg CO <sub>2</sub> -Eq
agotamiento de fósiles	kg oil-Eq
ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4-DCB-Eq
eutrofización de agua dulce	kg P-Eq
toxicidad humana	kg 1,4-DCB-Eq
ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB-Eq
eutrofización marina	kg N-Eq
agotamiento del ozono	kg CFC-11-Eq
formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC-Eq
acidificación terrestre -	kg SO <sub>2</sub> -Eq
ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-Eq
agotamiento del agua	m <sup>3</sup> water-Eq

## **4.2. Fase II: Análisis de Inventario ACV Proceso ATICA**

El procedimiento sucesivo para realizar el análisis de inventario incluyó establecer el método de recolección de información y calidad de los datos, definir los límites del sistema de análisis del proceso de ATICA, la construcción del diagrama de flujo (entradas y salidas) y el cálculo de balance de masa y de energía para la transformación de 1 kg de aceite usado. En este análisis se establecieron los distintos supuestos del proceso y análisis de ciclo de vida tipo atribucional, a partir de los cuales se determinaron los límites para el proceso evaluado.

### **4.2.1. *Datos recolección aceites lubricantes usados proceso ATICA***

El aceite lubricante usado estudiado materia prima para Re-refinación, inicia el proceso siendo recogido en las ciudades principales de Colombia donde ATICA cuenta con sucursales, como lo son Cartagena, Barranquilla, Bogotá, Cali, Medellín y Bucaramanga con un recorrido promedio de 264 Km, el cual es recogido en vehículo tipo succionador EURO IV con capacidad entre 3,5-7,5 toneladas métricas en diferentes puntos de cada ciudad (Lubricentros, servitecas, Etc.) y plantas industriales; una vez se cuenta con la capacidad total en cada recolección, estos son llevados a cada planta para ser almacenados y enviarse posteriormente en tractocamión cisterna a Cartagena.

Cuando en cada sucursal de ATICA según la capacidad de acopio cuenta con un viaje de 10.000 galones aproximadamente, se despacharán los aceites desde cada ciudad en vehículo tractocamión de 30 toneladas métrica euro III a la refinería ubicada en Mamonal-Cartagena con un recorrido promedio de 696,8 Km.

#### 4.2.2. **Sustitución de productos refinación aceites planta ATICA para acv**

El proceso de Re-refinación en la planta de ATICA es un proceso multifuncional tal como lo describe (Duđak et al., 2021), es decir, produce varios coproductos y esto se puede resolver con el método de sustitución de LCA. En esta etapa de sustitución, los subproductos derivados del proceso de re-refinación de aceites minerales usados generados en ATICA se sustituyen en una relación 1:1 con otros productos de la misma naturaleza que son elaborados con materias primas derivadas del petróleo virgen. La sustitución se realizó en equivalencias de masa, calidad y funcionalidad, sin embargo, el menor precio de estos subproductos son el principal criterio de decisión para el consumo de productos provenientes de la re-refinación (ver Tabla 5).

**Tabla 5.**

*Relación de sustitución de subproductos de la re-refinación de aceites minerales planta ATICA.*

<b>TECNOLOGÍA</b>	<b>SUBPRODUCTO</b>	<b>PRODUCTO DE SUSTITUCIÓN</b>
<i>Re-refinación aceites minerales usados planta ATICA</i>	Base de lubricante	Base lubricante Refinación de petróleo
	Base fondo proceso	Base Fuel Oil Refinación de petróleo
	Base Gasóleo (ACPM)	ACPM de Refinación de petróleo
	Base liviana Nafta	Nafta de Refinación de petróleo

#### **4.2.3. Datos flujos de referencia ACV aceites usados planta ATICA**

Los flujos de referencia se asignaron a partir de lo que establece la norma ISO 14044 para procesos multifuncionales. En este caso, los procesos evaluados de re-refinación es un sistema multifuncional, con una única entrada de 1kg de ALU que equivale a la unidad funcional del proceso, con generación de varios subproductos a partir de la materia prima de entrada, los cuales se consideran en la ACV como flujos de referencia a los cuales se les realizó la evaluación ambiental para poder obtener el consolidado por modelo (Tabla 6). Estos datos fueron suministrados por ATICA según la producción de su planta para refinar los ALU que entran a proceso.

**Tabla 6.**

*Flujos de referencia proceso re-refinación ALU planta ATICA Cartagena para 1 Kg de ALU*

<b>TECNOLOGÍA</b>	<b>FLUJO DE REFERENCIA SUBPRODUCTO</b>
<b>Re-refinación aceites minerales usados planta ATICA</b>	0,533 kg Base de lubricante
	0,229 kg Fuel Oil
	0,155 kg Gasóleo (ACPM)
	0,063 kg Base liviana Nafta

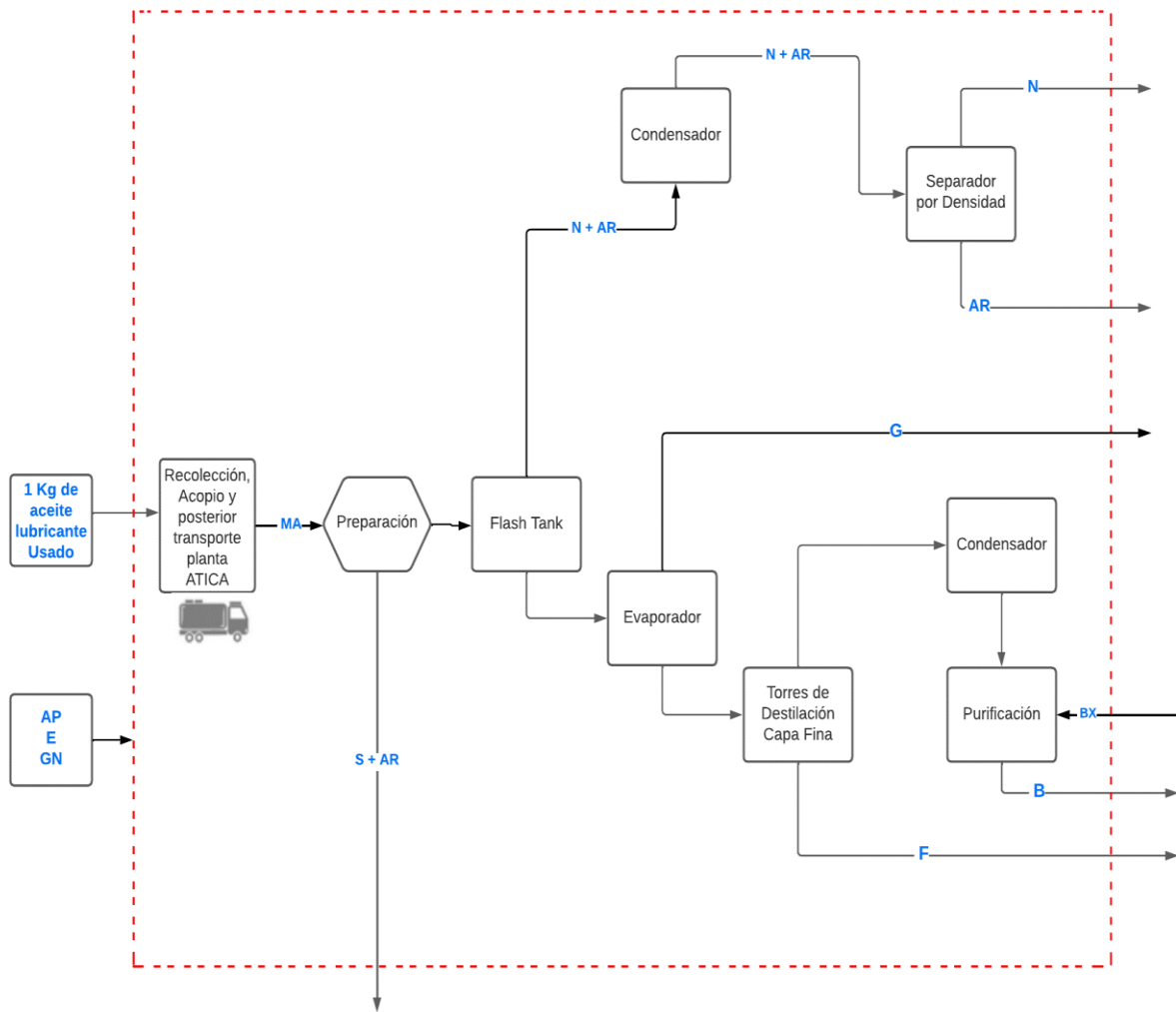
#### **4.2.4. Límites proceso evaluado**

- Los límites geográficos del sistema se definirán como “puerta – puerta”, es decir, desde que entran las materias primas al proceso, hasta que se obtiene el producto final de una planta de Re-refinación de aceites lubricantes e industriales usados.

- El proceso estudiado cumple con lo establecido en la ley colombiana.
- Se excluye de este análisis los requerimientos materiales y energéticos, así como las emisiones asociadas a la construcción de infraestructura productiva y a la fabricación de equipos utilizados para el proceso de re-refinación en ATICA.
- Se excluye de este análisis los aceites de origen animal y vegetal, así como los aceites con contenido de bifenilpoliclorados (PCB).
- Los aceites usados recuperados en Colombia por parte de ATICA deben cumplir con las condiciones de recepción establecidas en sus procedimientos corporativos.
- Las tasas de sustitución de los subproductos se asumen en una relación 1:1
- Los subproductos de Re-refinación son recogidos directamente por los clientes en planta ATICA.
- No se incluyen aceites que son puestos en planta ATICA por medio de gestores con sus vehículos propios.

#### **4.2.5. Diagrama general del flujo de proceso**

Se presenta el diagrama general del flujo de proceso de ATICA y las convenciones usadas para este, con los límites del sistema delimitados. Ver la Figura 6 y Tabla 7.



**Figura 6.**

*Diagrama de flujo que delimita las fronteras del sistema para el sistema de producto. Fuente: Construcción propia con datos de los procesos industriales analizados de ATICA.*



**Tabla 7.**

*Convenciones de las corrientes del diagrama de flujo que delimita las fronteras del sistema.*

<b>CORRIENTE/FLUJO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>MA</i>	Masa de aceite usado que ingresa al sistema: 1 kg
<i>S</i>	Masa de sólidos en suspensión que se retiran del proceso de filtración
<i>AR</i>	Masa de agua que es llevada a tratamiento en PTAR
<i>AP</i>	Agua de proceso
<i>E</i>	Energía de proceso
<i>GN</i>	Gas natural de proceso utilizado para calentamiento
<i>N</i>	Masa de producto de sustituto de Nafta
<i>B</i>	Masa de producto de sustituto de Base lubricante
<i>F</i>	Masa de producto de sustituto de Fuel oil
<i>G</i>	Masa de producto de sustituto de Gas oil/ACPM
<i>BX</i>	Masa de arcilla utilizada para blanqueo de aceite base

*Nota: Elaboración propia*

#### **4.2.6. Datos entradas y salidas para el modelo de re-refinación ATICA**

A continuación, se presentan en la tabla 8 los balances de entradas y salidas para el proceso de re-refinación de 1 kg de aceite usado que se utilizaron en OPENLCA suministrados por ATICA de su proceso de refinación de ALU. Se presentan los

inventarios de entradas y salidas para las etapas que comprenden la tecnología de ATICA, desde la etapa de recolección del ALU, así como la etapa de procesamiento.

**Tabla 8.**

*Datos de flujos entradas y salidas proceso de re-refinación de aceites ATICA*

<b>Entradas</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Material Diagrama de Flujo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Flujo referencia estudio</b>	MA	Aceite usado que entra a proceso	1	K
<b>Calentamiento proceso</b>	GN	Gas Natural	0,1099	m <sup>3</sup>
<b>Agua enfriamiento proceso</b>	AP	Agua enfriamiento reutilizada infinitas veces	0,503	L
<b>Energía eléctrica proceso</b>	E	Consumo Eléctrico	0,0356	kWh
<b>Transporte 1</b>		Transporte vehículo 3.5 – 7.5 ton, euro IV	1*264	K*km
<b>Transporte 2</b>		Transporte vehículo 16 – 32 ton, euro III	1*697	K*km
<b>En Bauxita</b>	BX	Bauxita utilizada para blanqueo de aceites producto re.refinación	0,0159	K
<b>Salidas</b>				

<b>Subproducto Re-refinación</b>	B	Base lubricante genérica para uso en formulación de lubricantes	0,533	K
<b>Subproducto Re-refinación</b>	F	Hidrocarburos pesados de composición semejante a Fuel oil	0,229	K
<b>Subproducto Re-refinación</b>	G	Gasoil/ACPM para uso como combustible	0,155	K
<b>Subproducto Re-refinación</b>	N	Hidrocarburos livianos de composición semejante a Nafta	0,063	k
<b>Residuos para tratamiento</b>	AR	Masa de agua que se lleva a disposición final en PTAR	0,011	K
<b>Residuos para tratamiento</b>	S	Masa de sólidos en suspensión que se retiran por filtración y posteriormente llevados a incineración	0,0015	K
<b>Emisión al agua</b>		Masa de DBO que se libera directamente al agua	2,88*E-06	K
<b>Emisión al agua</b>		Masa de DQO que se libera directamente al agua	8,01E-06	K

<b>Emisión al agua</b>	Masa de sólidos totales que se libera directamente al agua	0,0011	K
<b>Emisión al agua</b>	Masa de aceites y grasas	6,7E-07	K
<b>Emisión al aire</b>	Masa de SO <sub>2</sub> que se libera directamente en el aire	2,35	mg
<b>Emisión al aire</b>	Masa de NO <sub>x</sub> que se libera directamente al aire	0,401	mg
<b>Emisión al aire</b>	Masa de CO <sub>2</sub> que se libera directamente al aire	0,2174	K

**Fuente:** *Elaboración propia.*

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Fase III y Fase IV: Evaluación de Impactos e Interpretación de Resultados

Se calculan en el presente trabajo de grado los impactos ambientales potenciales utilizando los datos del inventario en el programa OPENLCA para el proceso de re-refinación por destilación de capa fina de aceites minerales usados en la planta de ATICA ubicada en Cartagena.

Los resultados de las contribuciones directas finales por flujo y proceso de la evaluación del impacto del ciclo de vida de los procesos de tratamiento de ALU considerados en los niveles de punto medio y punto final se resumen en la Tabla 9 para las 12 categorías de impacto evaluadas por el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.13.

**Tabla 9.**

*Resultado de las categorías de impacto evaluadas por el proceso re-refinación de aceites usados en la planta ATICA*

<b>Categoría de Impacto</b>	<b>Unidad de Referencia</b>	<b>Resultado</b>
<i>Cambio climático</i>	kg CO <sub>2</sub>	0,123235148
<i>Agotamiento de fósiles</i>	kg oil-Eq	0
<i>Ecotoxicidad en agua dulce</i>	kg 1,4-DCB-Eq	-5,3599E-05
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	kg P-Eq	-1,25261E-06
<i>Toxicidad humana</i>	kg 1,4-DCB-Eq	-0,026541587
<i>Ecotoxicidad marina</i>	kg 1,4-DB-Eq	-0,00059736
<i>Eutrofización marina</i>	kg N-Eq	1,7306E-05
<i>Agotamiento del ozono</i>	kg CFC-11-Eq	0
<i>Formación de oxidantes fotoquímicos</i>	kg NMVOC-Eq	0,000534883
<i>Acidificación terrestre -</i>	kg SO <sub>2</sub> -Eq	9,35041E-05
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4-DCB-Eq	-4,81813E-05
<i>Agotamiento del agua</i>	m <sup>3</sup> water-Eq	-0,000933794

Los resultados obtenidos de la evaluación ambiental muestran que, de las 12 categorías evaluadas, dos arrojaron como resultado un valor igual a cero las cuales son:

agotamiento de fósiles (AF) y agotamiento del ozono (AO), lo que indica que la relación de entradas y salidas del análisis de inventario según el proceso estudiado no contiene materiales que se relacionen con estas categorías de impacto ambiental y por lo tanto los flujos de referencia evaluados arrojan un valor igual a cero. Estas categorías de impacto serán omitidas en los análisis posteriores.

Por el contrario, las categorías de impacto ambiental evaluadas para los flujos de referencia de los modelos del proceso de re-refinación de aceites usados en planta ATICA que arrojaron resultados diferentes de cero son: cambio climático (CC), ecotoxicidad en agua dulce (ET), eutrofización de agua dulce (UAD), ecotoxicidad marina (ETM), eutrofización marina (EUM), toxicidad humana (TH), formación de partículas (FP), formación de oxidantes fotoquímicos (F0F), acidificación terrestre (AT), ecotoxicidad terrestre (ET) y agotamiento del agua (AA). En esta misma tabla, se observan valores positivos y negativos como resultado de la evaluación de los flujos de referencia en cada categoría de impacto ambiental que su significado será descrito posteriormente.

De las categorías con valores diferentes a cero, se puede evidenciar que la incidencia geográfica del ciclo de vida del aceite usado hasta el fin de la vida como materia prima para el proceso de re-refinación de capa fina tiene lugar a escala regional y local, las cuales son: toxicidad humana, acidificación terrestre, eutrofización marina y ecotoxicidad marina, las cuales registran mayor impacto a una escala regional; por otra parte la ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad terrestre, eutrofización del agua, agotamiento del agua y formación de oxidantes fotoquímicos tiene mayor incidencia local. Por último, el cambio climático es la única categoría de impacto ambiental con incidencia global.

Los valores positivos indican el aporte cuantitativo del flujo de referencia a la generación del impacto ambiental evaluado, en otras palabras, este valor puede denominarse impacto generado por el flujo de referencia. Dentro de los impactos generados se destaca que el de mayor valor es el asociado con el cambio climático con un valor de 0,1232 kg CO<sub>2</sub>-Eq con relación a los impactos formación de oxidantes fotoquímicos,

acidificación terrestre, formación de partículas, eutrofización marina y agotamiento de metales que también arrojaron valores positivos.

Kanokkantapong et al. (2009) realizaron un estudio de ciclo de vida sobre diferentes esquemas de manejo de aceites lubricantes usados (ALU) para su regeneración y valorización energética. En su investigación, encontraron que el potencial de calentamiento global para la regeneración mediante extracción por solventes fue de aproximadamente 0,3 kg-eq CO<sub>2</sub>/kg, mientras que para la regeneración con arcilla ácida fue de 0,15 kg-eq CO<sub>2</sub>/kg, similar al proceso ATICA, aunque este último no es ampliamente utilizado debido a su alta contaminación en países en vía de desarrollo. Además, el estudio mostró que la valorización energética en calderas y hornos de cemento produjo mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, alrededor de 3 kg-eq CO<sub>2</sub>/kg y 31 kg-eq CO<sub>2</sub>/kg, respectivamente, en comparación con el proceso de regeneración ATICA. La reducción de emisiones en el proceso de valorización energética en cementeras se atribuye a la captura de algunos carbonos en el Clinker durante la combustión, según lo indicado por los autores.

La misma tendencia se muestra en trabajo desarrollado por Silva et al. (2022) en Brasil para regeneración de 1 kg de aceite usado en tecnología de recuperación de aceite con unidades de deshidratación y craqueo, sulfonación y lodos ácidos, neutralización y destilación, deshidratación y fraccionamiento de aceite ligero, obteniendo un impacto de 96,3 kg-eq CO<sub>2</sub>/kg muy superior al proceso de ATICA.

Por otro lado, los números negativos en la tabla 9 indican que hay un beneficio neto del proceso de gestión de desechos analizado, ya que el impacto general del tratamiento de desechos está más que compensado por los impactos evitados de los procesos sustituidos con los coproductos. El impacto con mayor relevancia en ser evitado por el proceso de re-refinación de ATICA es la toxicidad humana con un valor de -0,0265 kg 1,4-DCB-Eq, consiguiente a agotamiento del agua, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad en agua dulce, ecotoxicidad terrestre y eutrofización de agua dulce que arrojaron también valores negativos. El valor de toxicidad obtenido está mayoritariamente relacionado con

la prevención de las emisiones provenientes de la producción y uso de combustibles fósiles, y esto se ve reflejado en las figuras 6 a la 15 en donde los flujos sustitutos para la producción de base lubricante, nafta, gasoil y Fuel oil contribuyen de manera positiva a evitar impactos en la categoría donde es significativo su resultado.

Además, evitar por el método de re-refinación impactos como ecotoxicidad terrestre es muy significativo ya que estudios revelan que el aceite cuando entra en contacto con el suelo, la porción que permanece en este sufre una lenta volatilización debido a bajas presiones de vapor ( $<0.001$  mm Hg a 25 C), lenta hidrólisis y / o degradación microbiana (Speight & Exall, 2014). Adicional esta contaminación induce cambios sustanciales en los organismos vivos, principalmente los involucrados en el ciclo del nitrógeno ya que rellena los poros entre las partículas impidiendo el acceso al oxígeno, induciendo un número importante de zonas anaeróbicas y, por tanto, también a la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos.(John et al., 2011) ; sumado a lo anterior, evita que las plantas pueden absorber los hidrocarburos policíclicos aromáticos HPA presentes en el suelo, especialmente las moléculas de bajo peso molecular, que se trasladan rápidamente a los tejidos de la superficie (Klamerus-Iwan et al., 2015).

La demanda de altos costos de gestión para la eliminación de aceites usados conduce al vertido ilegal de aceites usados en cuerpos de agua. El proceso de re-refinación al igual que en el suelo, evita que este residuo peligroso sea vertido en cuerpos de aguas colocando en peligro la vida marina y, en su mayoría, provocando la muerte de aves marinas debido a la hipotermia. Además, los aceites minerales usados manifiestan naturaleza hidrofóbica inhibiendo la disolución de oxígeno y aumenta la demanda química de oxígeno (DQO) en el agua (Mishra et al., 2020).

De la figura 7 a la figura 16 se presentan los impactos ambientales para las 10 categorías evaluadas con resultado diferente de cero por flujos de procesos, acorde al inventario de ACV tenido en cuenta para el proceso de re-refinación de ATICA. Se observa en cada categoría , que el flujo asociado al sustituto de producción de base lubricante genera en todas impactos evitados como se muestra en la Tabla 10 (todos los resultados son



negativos para este flujo de proceso en cada impacto analizado), lo cual indica que esta tecnología es una alternativa importante en la mitigación de impactos y que desde la perspectiva de una economía circular, el proceso es muy completo ya que procesa aceite usado para obtener aceite base que se puede reutilizar para el mismo uso inicial o uno similar (Duđak et al., 2021). Se destaca impacto más significativo es la mitigación de la acidificación terrestre.

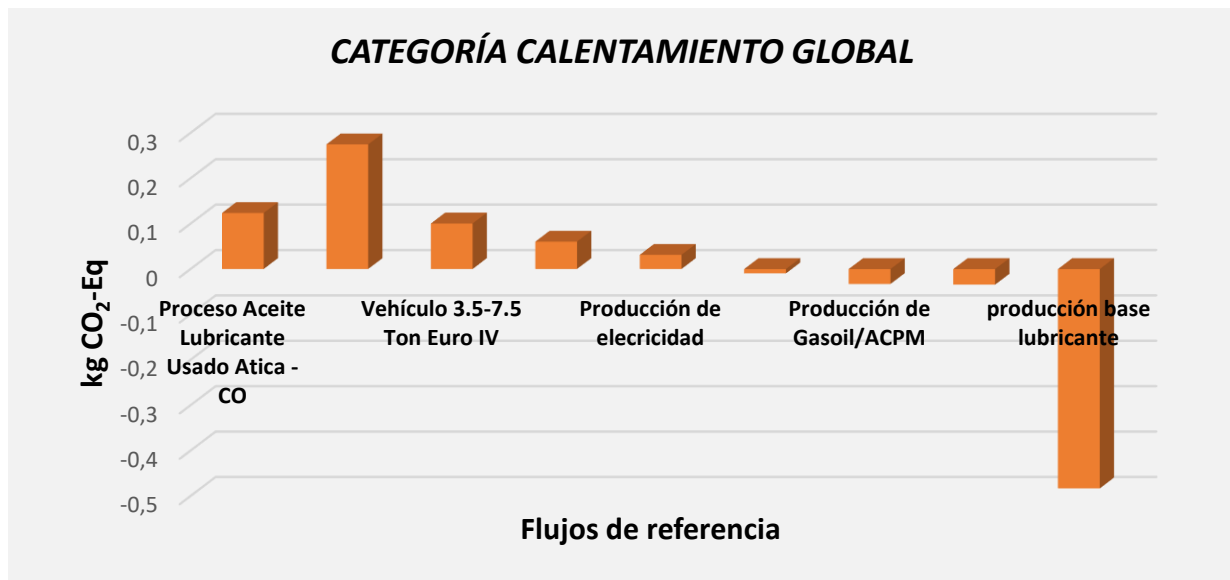
**Tabla 10.**

*Impactos evitados flujo sustituto de base lubricante proceso Re-refinación ATICA*

<b>Categoría de Impacto</b>	<b>Unidad de Referencia</b>	<b>Resultado Total Impacto</b>	<b>Resultado Flujo sustituto aceite base</b>	<b>% Contribución evitar el impacto</b>
<i>cambio climático</i>	kg CO <sub>2</sub> -Eq	0,123235148	-0,48313	392.04%
<i>agotamiento de fósiles</i>	kg oil-Eq	0	0	
<i>ecotoxicidad en agua dulce</i>	kg 1,4-DCB-Eq	-5,3599E-05	-5,4E-05	94.31 %
<i>eutrofización de agua dulce</i>	kg P-Eq	-1,252E-06	-1,3E-06	96.25%
<i>toxicidad humana</i>	kg 1,4-DCB-Eq	-0,0265415	-0,02654	100.75%
<i>ecotoxicidad marina</i>	kg 1,4-DB-Eq	-0,0005973	-0,0005493	91.96%
<i>eutrofización marina</i>	kg N-Eq	1,7306E-05	-3.58E-05	206.87%
<i>agotamiento del ozono</i>	kg CFC-11-Eq	0	0	0
<i>formación de oxidantes fotoquímicos</i>	kg NMVOC-Eq	0,000534883	-0.000839	156.90%
<i>acidificación terrestre</i>	kg SO <sub>2</sub> -Eq	9,35041E-05	-0.00144	1540.15%
<i>ecotoxicidad terrestre</i>	kg 1,4-DCB-Eq	-4,81813E-05	-4.475E-05	92.90%
<i>agotamiento del agua</i>	m <sup>3</sup> water-Eq	-0,000933794	-0.0011	118.28%

De la Figura 7 se puede observar que la contribución del flujo de generación de gas natural (flujo asociado a la necesidad de calentamiento del proceso) genera un impacto de 0.237 Kg de CO<sub>2</sub>-Eq, 0.020 Kg de CO<sub>2</sub>-Eq por encima del proceso de re-refinación de ATICA. Además, junto con los transportes, desde la recolección en las ciudades principales y posterior envío de estos a la planta de Cartagena una vez se cuenten con la cantidad de 10.000 galones, son los flujos de referencia con mayor incidencia en la

categoría de calentamiento global (aporte del 81.25% para vehículo Euro IV capacidad de 3.5 a 7.5 ton y 48.83% para vehículo Euro III capacidad de 16 a 32 ton), influyendo en el aumento de la temperatura promedio debido a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (derretimiento de los glaciares, aumento del nivel de los océanos, cambios en los fenómenos meteorológicos), por lo que resalta que el flujo sustituto de producción de base lubricante bajo este proceso permita disminuir -0.472 Kg de CO<sub>2</sub>-Eq; un resultado muy importante de tener en cuenta según los objetivos que tiene Colombia para 2030 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022) de reducir los efectos de gas invernadero en un 20% las emisiones de gases que lo generan.



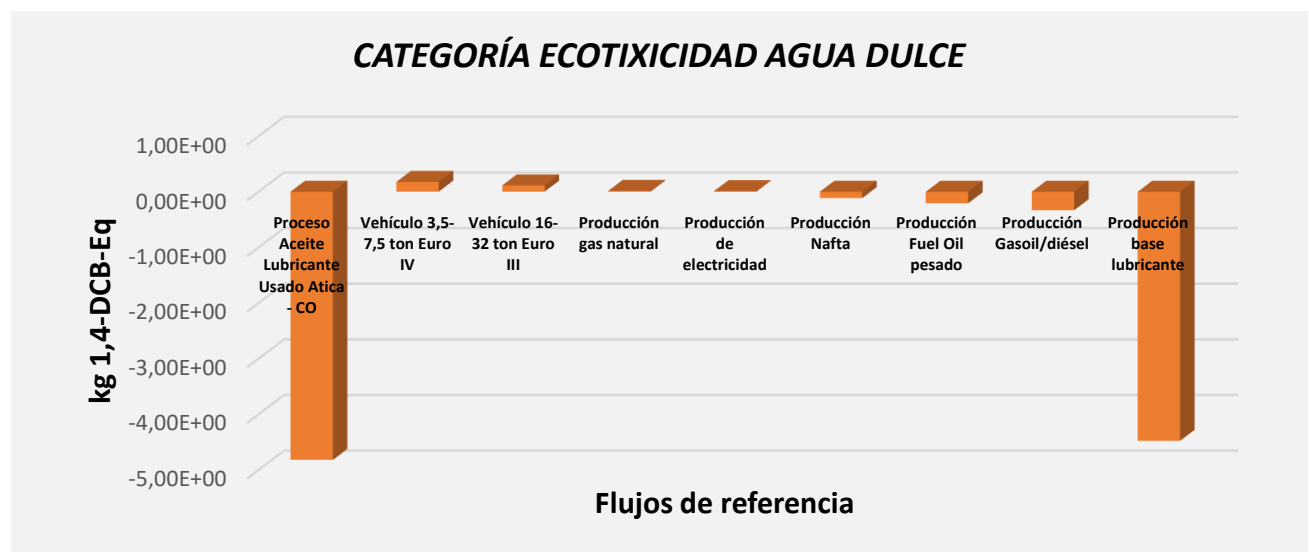
**Figura 7.**

*Impacto Calentamiento Global por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

De la figura 8 a la figura 12 se muestra los impactos asociados a los flujos de referencia para las categorías ecotoxicidad agua dulce, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad marina, eutrofización marina y agotamiento del agua. Se destaca que para los impactos en las categorías de ecotoxicidad de agua dulce y marina, los flujos de referencia

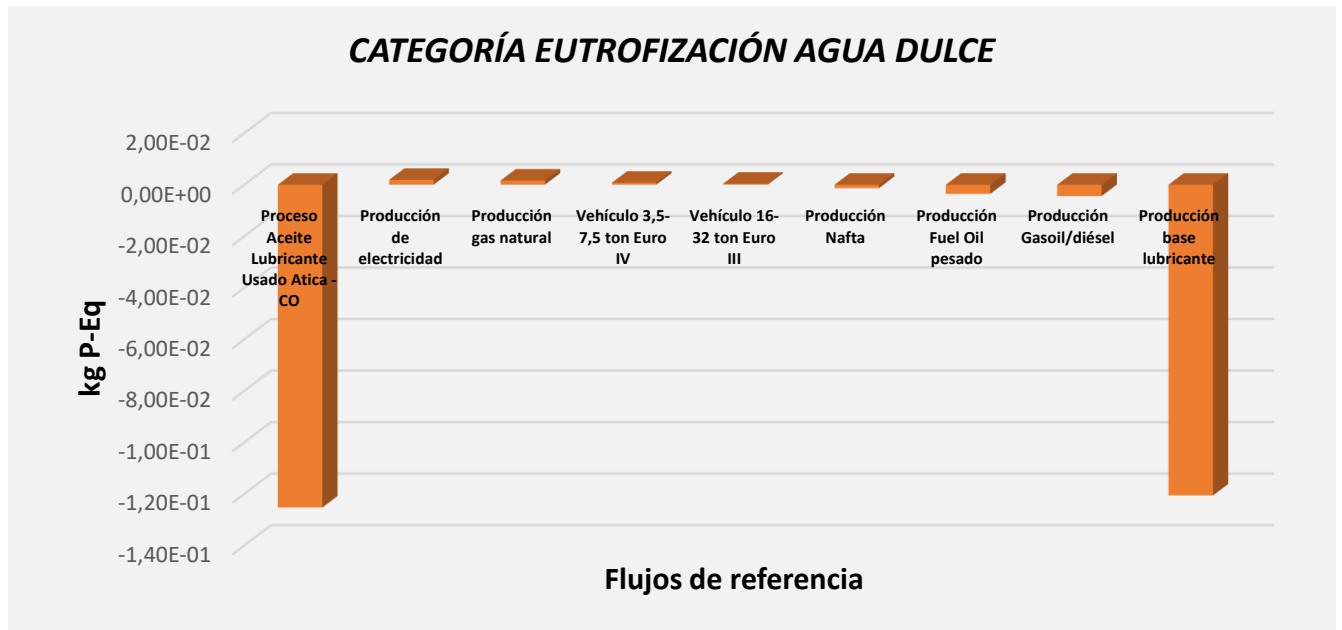
sustitutos para los subproductos de refinación de aceites usados (Sustituto base lubricante, sustituto de Fuel oil, sustituto de nafta y sustituto de diésel) son evitados , y la producción de combustible diésel con contenido bajo en azufre por refinación de crudo para ser consumido por los vehículos que transportan los aceites usados tanto regional como interdepartamental hasta Cartagena, genera el mayor impacto ambiental en estas 2 categorías, característica similar en un estudio llevado a cabo en un proceso de re-refinación adoptado en la región Sudeste de Brasil (Silva et al., 2022) por el método de arcilla ácida.

Los flujos de referencia sustitutos de diésel, aceite base y fuel oil evitan impactos en la eutrofización de agua dulce y sólo los flujos sustitutos de diésel y base lubricante evitan impactos de eutrofización marina. El flujo de generación de energía eléctrica (consumida por la refinería y consumida en procesos de destilación de crudo) generan el mayor impacto en la eutrofización de agua dulce y en el caso de la eutrofización marina, los impactos con mayor relevancia en la afectación de esta categoría son la producción de gas natural y los transportes para los aceites los aceites.



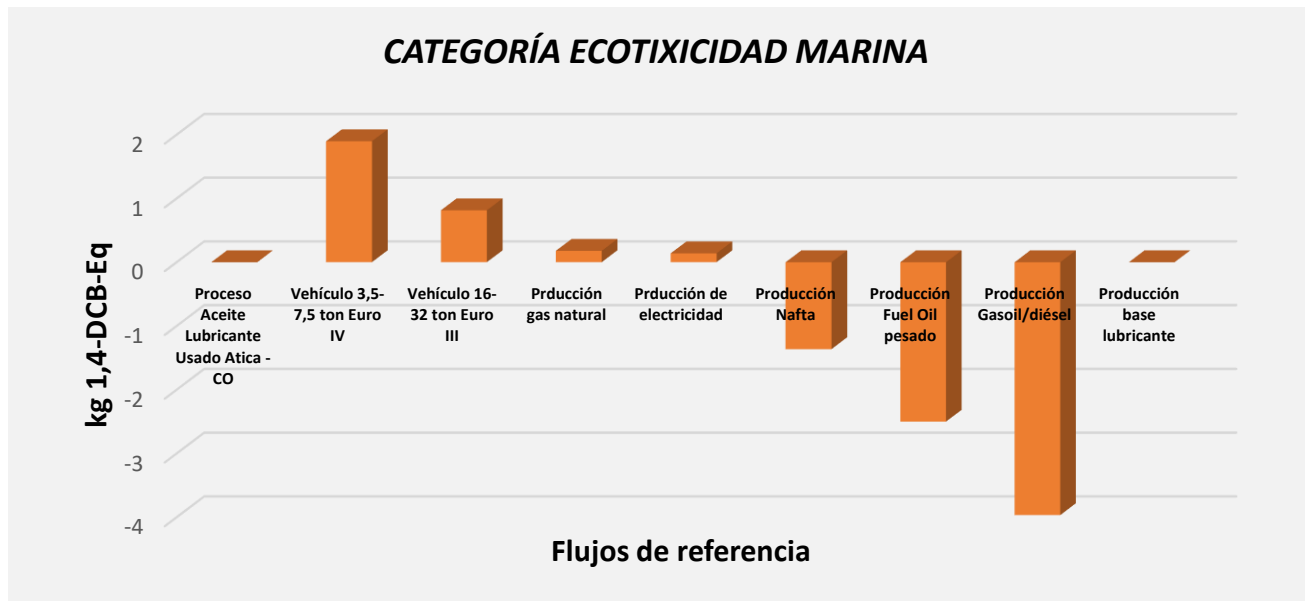
**Figura 8.**

*Impacto ecotoxicidad agua dulce por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*



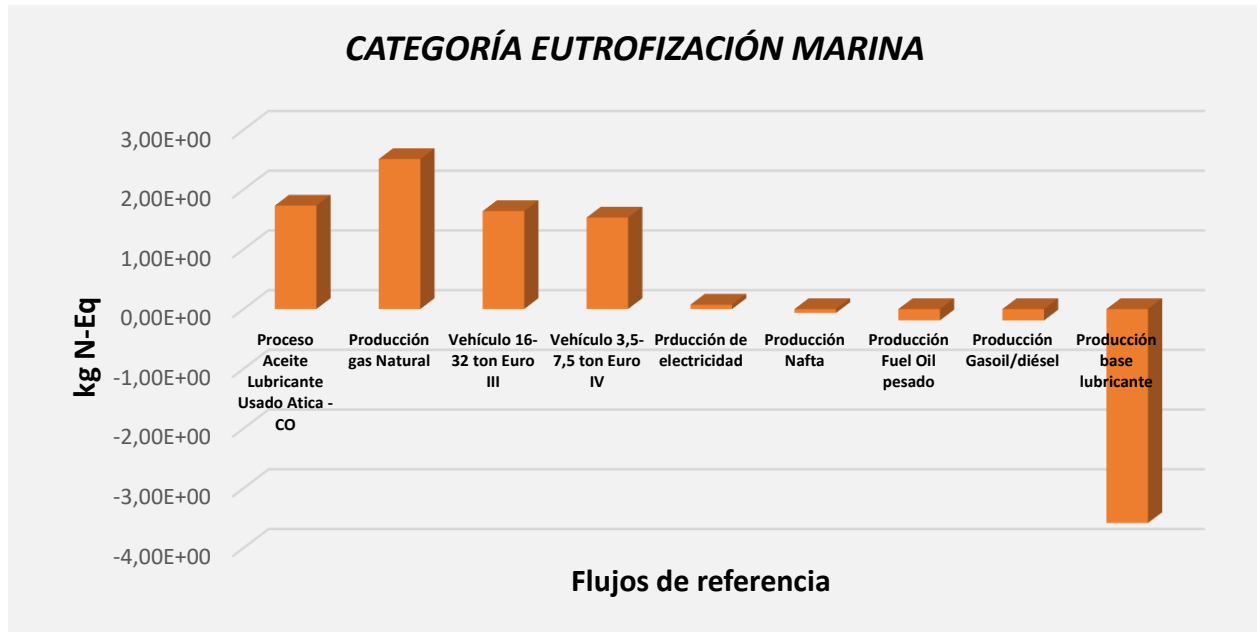
**Figura 9.**

*Impacto eutrofización de agua dulce por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*



**Figura 10.**

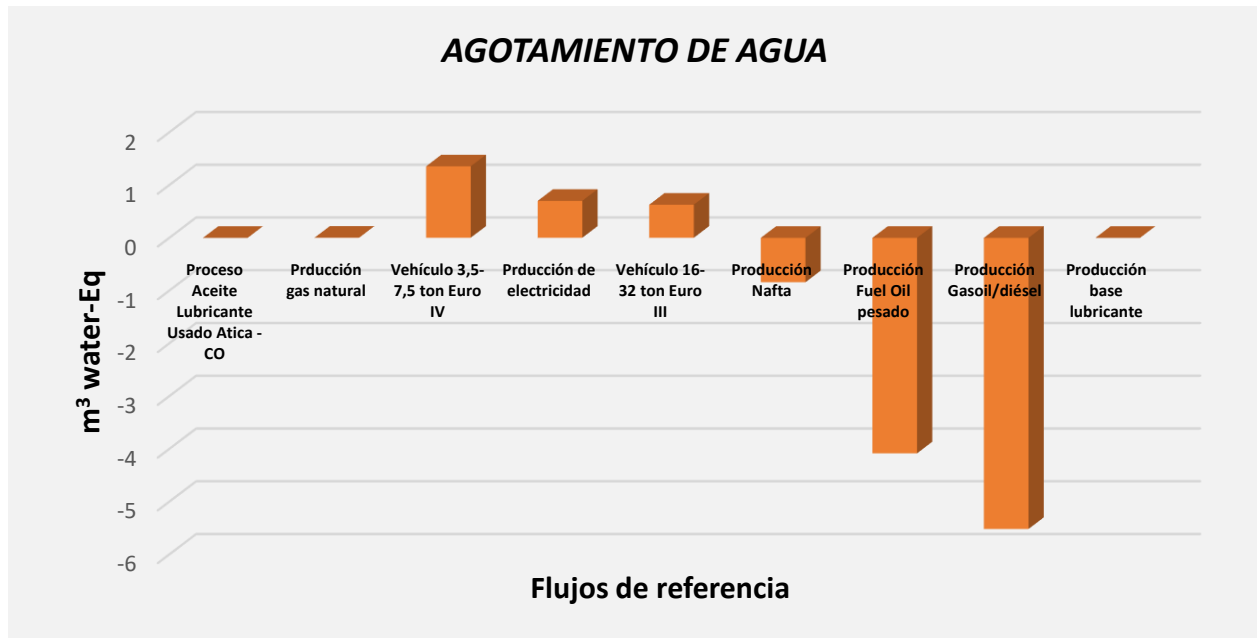
*Impacto ecotoxicidad marina por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*



**Figura 11.**

*Impacto eutrofización marina por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

Respecto a la categoría de agotamiento del agua, vista en la figura 12, los impactos con mayor relevancia son los generados en la producción de gas natural con un aporte del 26.60 %, seguido de la producción diésel con bajo contenido en azufre (utilizado como combustible en vehículos) y generación de energía eléctrica ; por otra parte, los flujos sustitutos de Nafta, fuel oil, gasoil (ACPM), y base lubricante permiten evitar el agotamiento de esta si se obtienen como productos de la refinación de aceites lubricantes (aportes de 0.9%, 4.37% , 5.91% y 118.28 % respectivamente), lo cual implica que el proceso va muy alineado al aspecto relacionado con la mitigación del agua dentro de la Política Ambiental para la gestión integral de residuos peligrosos en Colombia, y que desde la perspectiva de innovación y nuevas tecnologías donde se busca fomentar la adopción de procesos nuevos que permitan un uso más eficiente del agua en la gestión de residuos peligrosos, la re-refinación por destilación de capa fina muestra ser eficiente evitando consumos comparados con la producción de derivados combustibles proveniente de petróleo (MADS, 2022).

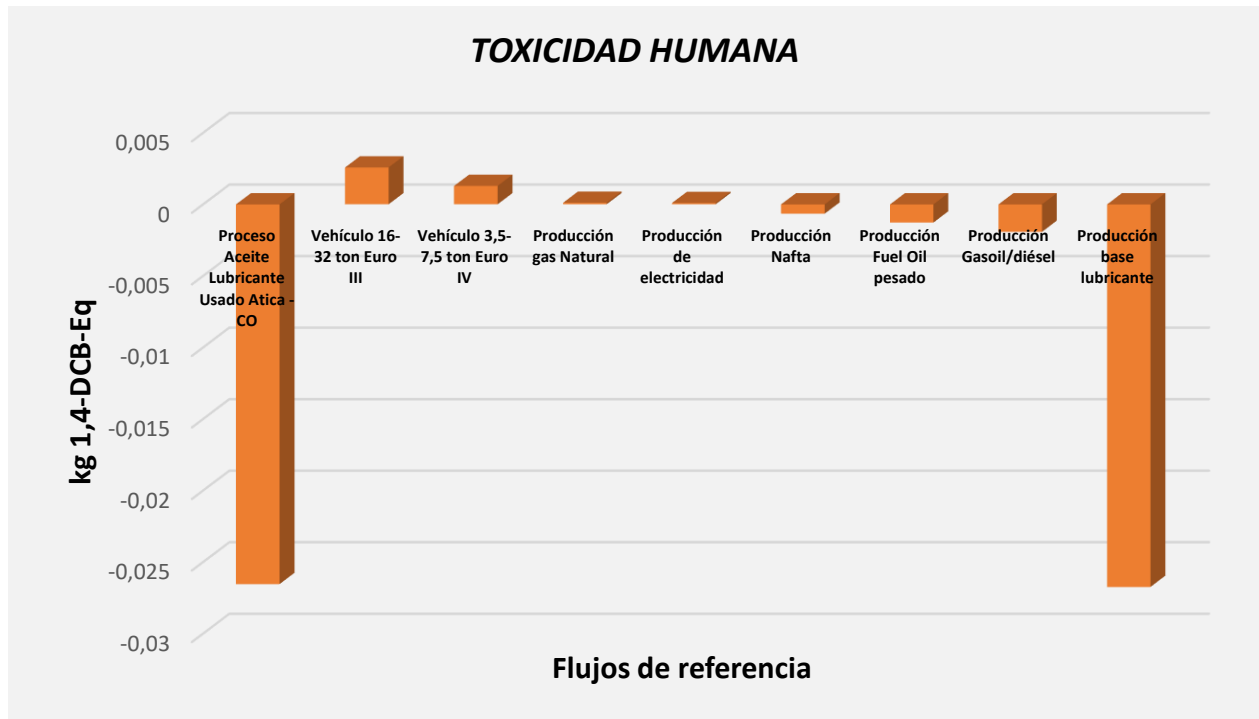


**Figura 12.**

*Impacto agotamiento del agua por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

La figura 13 muestra la categoría de toxicidad humana, la cual cuantifica cualquier efecto toxicológico potencialmente generado por la exposición a sustancias químicas y biológicas en humanos. Los flujos de referencia con mayor afectación en esta categoría son el uso de vehículos tractocamión 16 – 32 ton euro III con un aporte de 9.70% y la producción del combustible diésel bajo en azufre desde el petróleo que este consume con un aporte de 4.81%, por lo que el proceso de combustión llevado a cabo durante el transporte interdepartamental rige tal impacto, muy seguramente por la distancia promedio de 697 km y el tipo de estándar de emisiones euro III. Por otra parte, los flujos sustitutos de nafta, fuel oil, gasoil (ACPM) y base lubricante permiten evitar la toxicidad en humanos si se obtienen como productos de la refinación de aceites lubricante (aportes de 2.46%, 4.78%, 7.24% y 100.75%). Es importante tener en cuenta que tratar aceites vpia re-refinación por destilación de capa fina mitiga riesgos como el que se presenta por ejemplo, en procesos de combustión de aceites usados, el cual si no hay una combustión total de estos conlleva a la generación de subproductos que pueden provocar la

acumulación de compuestos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHA), los cuales constan de múltiples anillos, como el benzo[a]pireno, que están clasificados como cancerígenos para los seres humanos por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 2021) .

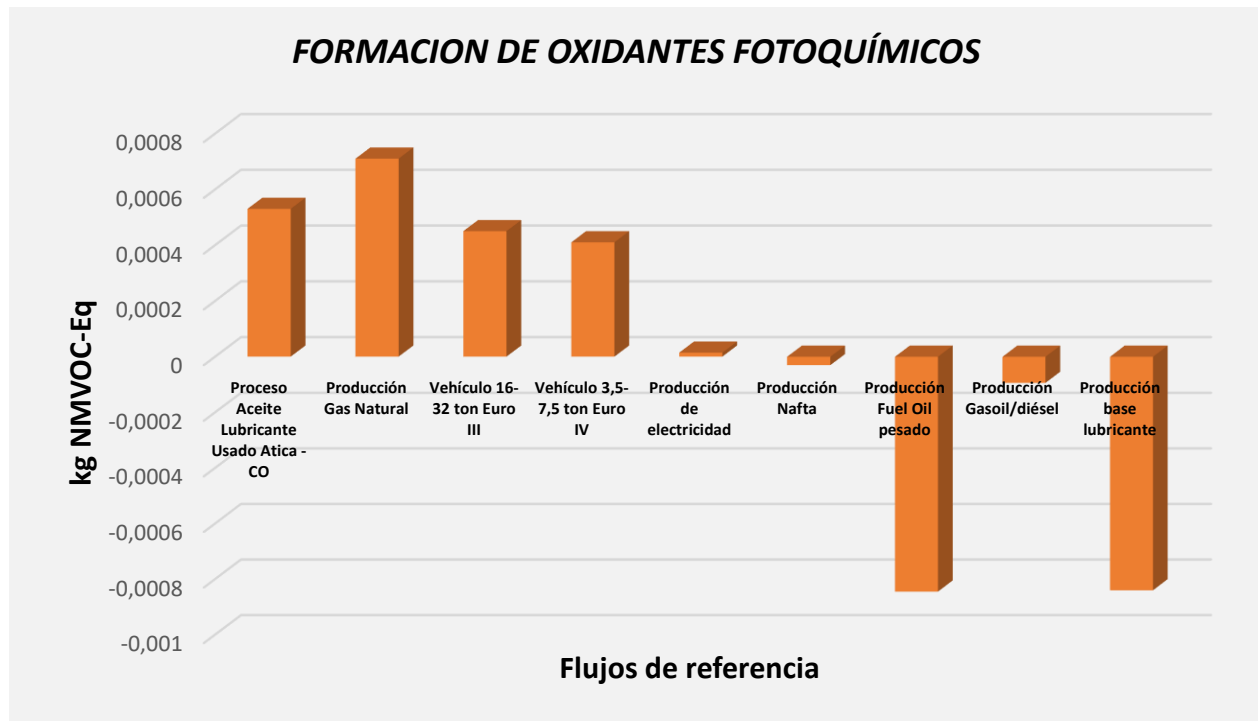


**Figura 13.**

*Impacto toxicidad humana por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

La figura 14 muestra que los flujos de referencia que más impactan la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos es la producción de gas natural con un porcentaje superior al 100% del resultado total para esta categoría, seguido por el transporte en vehículo de capacidad 16- 32 ton euro III y transporte en vehículo de capacidad 3.5-7.5 ton euro IV (aporte del 83.51 % y 76.3% respectivamente).

Este impacto muestra ser evitado por los flujos de referencia de producción de sustituto de fuel oil y producción de base lubricante, contribuyendo este último en evitar el impacto de esta categoría en un 156.9% respecto al resultado global.



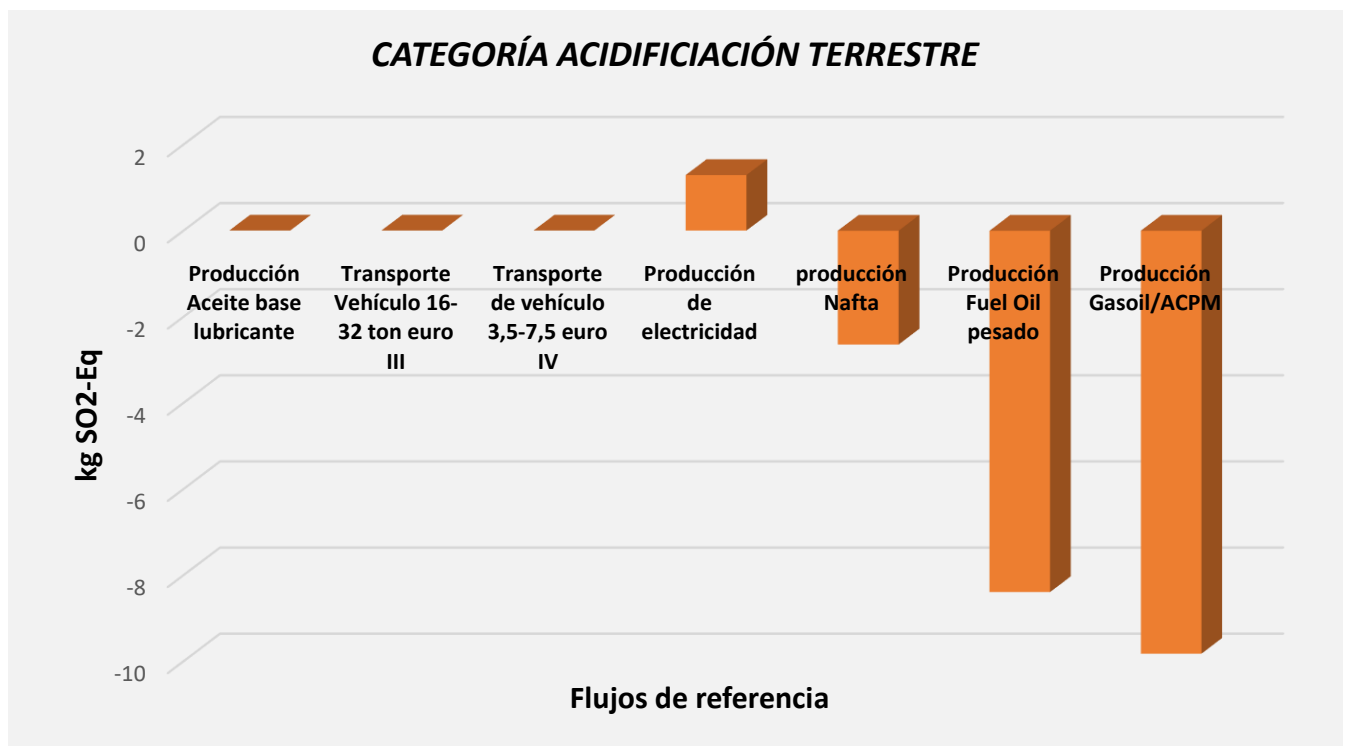
**Figura 14.**

*Impacto formación de oxidantes fotoquímicos por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

Las figura 15 y 16 muestra los impactos asociados a los flujos de referencia en las categorías de acidificación (Impacto vinculados a la precipitación de tres tipos de compuestos contaminantes: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y amoníaco, generando "lluvia ácida") y ecotoxicidad terrestres (Impacto que depende de la exposición y los efectos que provocan las sustancias químicas y biológicas en función de las tasas de degradación, bioacumulación, evaporación y deposición en los ecosistemas). El flujo con mayor relevancia para la categoría de acidificación terrestre es la producción



de gas natural, seguida por por el transporte en vehículo de capacidad 16- 32 ton euro III y transporte en vehículo de capacidad 3.5-7.5 ton euro IV (aportes superiores al 100% respecto al resultado obtenido), procesos estrechamente relacionados con el uso de combustibles fósiles y que consumen una gran cantidad de energía procedente de fuentes no renovables (Botas et al., 2017), los cuales se compensan con el aporte de los flujos de sustituto de nafta, fuel oil, diésel y base lubricante que arrojas valoren negativos y que, sólo el flujo de sustituto de base permite evitar una generación de -0.00144 Kg de SO<sub>2</sub>-Eq (un valor 10 veces superior al resultado de esta categoría).



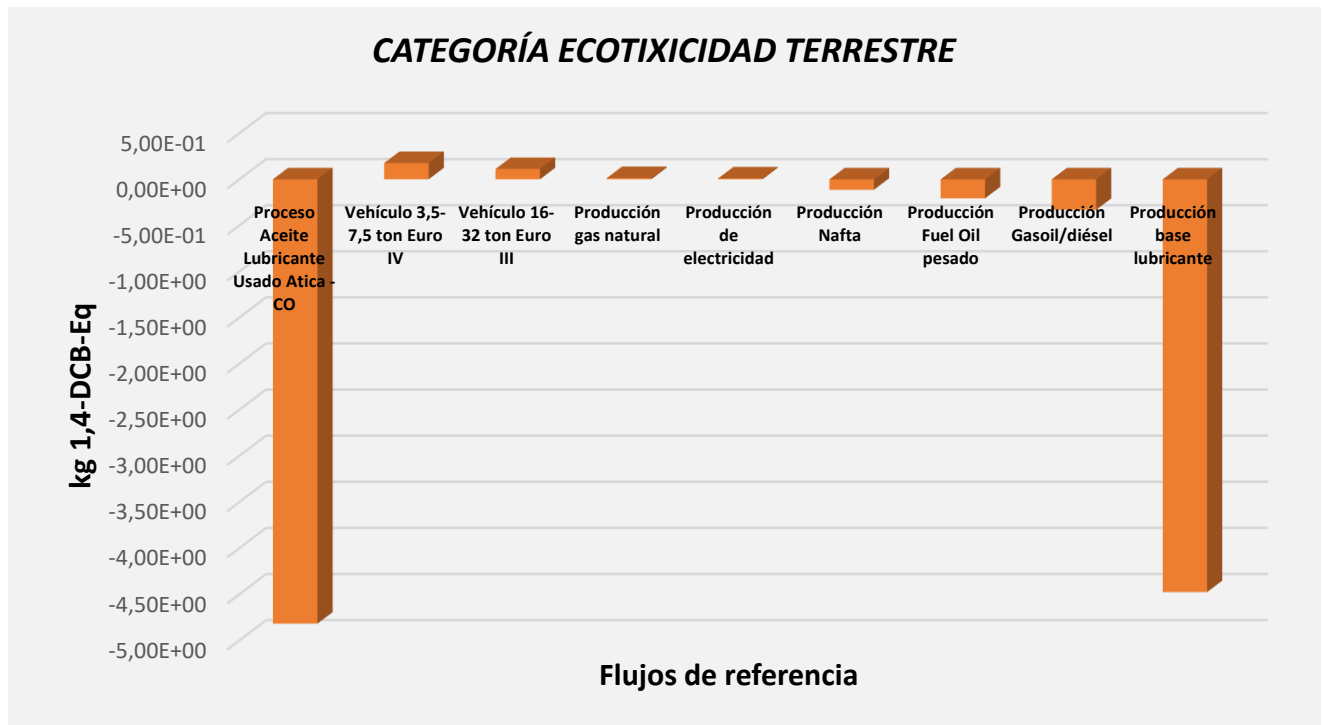
**Figura 15.**

*Impacto acidificación terrestre por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

Respecto a la categoría de ecotoxicidad terrestre, el flujo que tiene mayor impacto es la producción de diésel con contenido bajo en azufre como combustible para vehículos (no

más de un 4%), resultado muy diferente al obtenido por (Silva et al., 2022) donde 83,8% de los impactos están asociados al envío de aceites usados al sitio de tratamiento, aunque para ambos estudios el diésel es el combustible usado por los vehículos para el transporte hacia las plantas de tratamientos.

Para esta categoría sólo los flujos de sustituto de diésel y base lubricante evitan impactos asociados a la acidificación terrestre, esto está relacionado con la reducción en el consumo de energía y combustibles respecto a la producción de una masa equivalente de materia prima nueva, en todo el ciclo de vida.



**Figura 16.**

*Impacto ecotoxicidad terrestre por flujo de referencia proceso re-refinación ATICA.*

A pesar de que los aceites lubricantes usados son considerados un residuo peligroso en Colombia, la base de composición química del aceite generalmente se conserva. Por ello

el proceso de re-refinación de capa fina implementado por ATICA muestra según el resultado de los impactos, que esta tecnología evita impactos ambientales para la recuperación y posterior reutilización de sus derivados combustibles a partir de su aprovechamiento para su posterior comercialización, permitiendo garantía de economía circular de estos.

Los aceites minerales usados por proceso de re-refinación no ofrecen sólo evitar gran parte de los impactos evitados como muestra el proceso de ATICA, sino son una gran oportunidad de emprendimiento en el país, creando nuevos puestos de trabajo y dinamizando la economía de los combustibles alternativos, permitiendo suplir en mayor proporción las necesidades de todas las regiones del país para el manejo de este residuo que hoy en día no es suficiente. Actualmente, los aceites lubricantes usados el 31% son aprovechados (re-refinación y obtención de energía), 11,5% son dispuestos finalmente acorde para prevenir contaminación ambiental y el 57% son manejados por biorremediación, tratamientos fisicoquímicos y tratamientos térmicos, como la incineración o el uso de autoclaves (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Alrededor del 50% del aceite lubricante nuevo (resultante del cambio cuando el aceite ha sido degradado por su uso) resulta ser un desecho debido a sustancias no deseadas, tóxicas y ambientalmente peligrosas que podrían tener un impacto antagónico tanto en la salud humana como en el medio ambiente según (Mishra et al., 2020). La tecnología de re-refinación estudiada es un proceso clave para que los aceites usados puedan manejarse ambientalmente mucho mejor y se puedan evitar impactos asociados a su inadecuada eliminación por las sustancias peligrosas producto de su contaminación al ser usados como metales, cloro, PCB o incluso terfenilos policlorados y bifenilos polibromados (IARC, 2021).

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el impacto ambiental de los aceites lubricantes e industriales usados en el proceso de refinación de una planta de disposición final de residuos industriales en Cartagena utilizando la metodología de ciclo de vida acorde con los lineamientos de la norma ISO 14044 por medio del Software Openlca, y se destacan las siguientes conclusiones:

La tecnología de re-refinación por destilación de capa fina para tratamiento de aceites lubricantes usados, muestra beneficios ambientales significativos en la reducción de impactos ambientales las siguientes categorías: toxicidad humana, agotamiento del agua, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad en agua dulce, ecotoxicidad terrestre y eutrofización de agua dulce, siendo una alternativa viable para ser considerada como disposición final de los aceite minerales usados que hoy Colombia legislativamente promueve su uso vía valorización energética.

En 10 de las 12 categorías de impactos simuladas, el proceso de producción de base lubricante demostró beneficios ambientales en la etapa de sustitución, que evita la generación de impactos ambientales en la fabricación de este producto producido principalmente del proceso de destilación de petróleo y permitiendo indirectamente la posibilidad de aumentar la disponibilidad futura de crudo como consecuencia de mayores tasas de reciclaje presentes. Este puede permitir que el proceso de re-refinación en Colombia desde el punto de vista de economía circular, pueda maximizar el valor y la vida útil de los aceites lubricantes manteniéndolos en circulación el mayor tiempo posible, en lugar de desecharse o destruirse una vez usados.

El mayor impacto ambiental del proceso estudiado es asociado a la categoría de cambio climático con un valor de 0,1232 kg CO<sub>2</sub>-Eq con relación a los impactos formación de

oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre, formación de partículas, eutrofización marina y agotamiento de metales que también arrojaron valores positivos.

El impacto con mayor relevancia en ser evitado por el proceso de re-refinación de ATICA es la toxicidad humana con un valor de -0,0265 kg 1,4-DCB-Eq, consiguiente a agotamiento del agua, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad en agua dulce, ecotoxicidad terrestre y eutrofización de agua dulce que arrojaron también valores negativos.

Los flujos sustitutos asociados a la producción de derivados combustibles obtenidos en la refinación por destilación de capa fina generan en todas las categorías con resultados distintos a cero impactos evitados en comparación con si se obtuvieran por procesos de destilación de petróleo.

## 7. RECOMENDACIONES

Para trabajos de análisis de ciclo de vida se recomienda el uso de programas software y bases de datos completas que permitan realizar un análisis de ciclo de vida lo más robustos posible, y además debe tener en cuenta su uso en programas como por ejemplo, ingeniería química, la formación de competencias en el área ambiental para complementar el amplio conocimiento de procesos que son impartidos a sus estudiantes, ya que la tendencia del mundo que nos rodea es la sostenibilidad y la forma de que seamos partícipes de operaciones sostenibles es teniendo la formación complementaria adecuada para la toma de decisiones que nos permitan obtener procesos económicos y ambientales camino hacia la economía circular.

A futuro esta aplicación podría implementarse como modelo de economía circular ya que de los aceites minerales usados se obtienen combustible alternativo al diésel, al fueloil, Nafta, y base lubricante (recuperación del más del 50%) minimizando la demanda de productos de refinación de petróleo, donde efectivamente se aprovecha un residuo que genera bastantes problemas de contaminación por su inadecuada disposición, y es aquí donde el gobierno puede implementar modelos posconsumo para garantizar los objetivos planteados a 2030.

Para implementar estrategias gestión ambiental de residuos de acuerdo con las leyes establecidas para su correcta disposición final y los requisitos de la norma ISO 14044, Colombia debe adoptar leyes y regulaciones apropiadas para cumplir su objetivo descrito en la política ambiental para gestión de residuos peligrosos de recuperar aceites minerales usados en un porcentaje de 20% para 2030 en tecnologías de re.refinación, y mejorar el desarrollo e implementación de sistemas de gestión de residuos, contribuyendo así a la renovación de materiales y energía. Por esto, esta trabajo de grado permite conocer de primera mano la importancia del proceso de una alternativa de re-refinación utilizado en una compañía Colombiana, de forma generalizada su

funcionamiento y los beneficios ambientales cuantificados bajo un análisis de ciclo de vida, donde es clave que el gobierno promueva la implementación de tecnologías de punta diferente a las convencionales que conlleven a la valorización de este residuo peligroso sin comprometer el ambiente, e incentivando una cultura enfocada a la economía circular y sostenibilidad de un recurso no renovable como son los aceites lubricantes usados.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado pueden llegar a ser tomada como aporte y contribución de política pública colombiana, siendo una referencia para servir como instrumento de toma de decisión para las autoridades competentes en las medidas respectivas a las condiciones de disposición final segura y sostenible de aceites lubricantes usados.

A partir de la metodología anterior, este trabajo puede ser continuado y mejorado con mayor cantidad de datos que incorporen más compañías en Colombia y Latinoamérica, y que permita la modelación completa de toda la cadena del tratamiento de aceites minerales usados, y profundizar en el estudio de sustitución en todos los flujos de referencia, vía comparación con los productos sustituidos, ya que lo que se obtiene en este estudio es un potencial de sustitución de cada flujo de referencia que debe ser ajustado con información primaria de los productos que se sustituyen.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ankit, Saha, L., Kumar, V., Tiwari, J., Sweta, Rawat, S., Singh, J., & Bauddh, K. (2021). Electronic waste and their leachates impact on human health and environment: Global ecological threat and management. *Environmental Technology and Innovation*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102049>
- Aresti, L., Christodoulides, P., & Florides, G. A. (2021). An investigation on the environmental impact of various Ground Heat Exchangers configurations. *Renewable Energy*, 171, 592–605. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.120>
- Asociación Colombiana de petróleo ACP. (2022). ASOCIACION COLOMBIA DEL PETROLEO, ACP FONDO DE ACEITES USADOS, FAU INFORME FAU 2021. <https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/todos-los-documentos-acp/informes/informes-del-fau/847-fau-informe2021-w/file>
- Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). Lubricant use and disposal. In *Biolubricants* (pp. 755–823). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.755>
- Botas, J. A., Moreno, J., Espada, J. J., Serrano, D. P., & Dufour, J. (2017). Recycling of used lubricating oil: Evaluation of environmental and energy performance by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.010>
- Callao, C., Martínez-Nuñez, M., & Latorre, M. P. (2019). European Countries: Does common legislation guarantee better hazardous waste performance for European Union member states? *Waste Management*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.014>
- DANE. (2021). ENCUESTA ANUAL MANUFACTURERA (EAM).
- Deshpande, R. S., Sundaravadivelu, D., Techtmann, S., Conmy, R. N., Santo Domingo, J. W., & Campo, P. (2018). Microbial degradation of Cold Lake Blend and Western Canadian select dilbits by freshwater enrichments. *Journal of Hazardous Materials*, 352, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.030>
- Duđak, L., Milisavljević, S., Jocanović, M., Kiss, F., Šević, D., Karanović, V., & Orošnjak, M. (2021). Life Cycle Assessment of Different Waste Lubrication Oil Management Options in Serbia. *Applied Sciences*, 11(14), 6652. <https://doi.org/10.3390/app11146652>



- Echeverry, H. (2012). Re-refinación de Aceites Usados en Colombia: Primer Paso hacia la Sostenibilidad de un Recurso No Renovable.
- El-Fadel, M., & Houry, R. (2001). Strategies for vehicle waste-oil management: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 33(2). [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00058-1)
- Hassanain, E. M., Yacout, D. M. M., Metwally, M. A., & Hassouna, M. S. (2017). Life cycle assessment of waste strategies for used lubricating oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(8), 1232–1240. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1255-x>
- Huijbregts, M. A. J. (2016). ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization.
- IARC. (2021). Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–130 – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. In Who.
- Islam, M. S., Sanzida, N., Rahman, M. M., & Alam, M. D. (2021). From the value chain to environmental management of used lube oil: A baseline study in Bangladesh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100159>
- ISO. (2006). ISO 14040 International Standard. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO), Geneva. Switzerland.
- Jacinto, H. (2008). Potencial contaminación por cromo en el proceso de refinación del petróleo. American Nuclear Society - 12th International High-Level Radioactive Waste Management Conference 2008, 2.
- Jafari, A. J., & Hassanpour, M. (2015). Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.026>
- John, R. C., Itah, A. Y., Essien, J. P., & Ikpe, D. I. (2011). Fate of Nitrogen-Fixing Bacteria in Crude Oil Contaminated Wetland Ultisol. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 87(3), 343–353. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0320-1>
- Kalnes, T. N., Shonnard, D. R., & Schuppel, A. (2006). LCA of a spent lube oil Re-refining process (pp. 713–718). [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(06\)80129-X](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(06)80129-X)
- Kanokkantung, V., Kiatkittipong, W., Panyapinyopol, B., Wongsuchoto, P., & Pavasant, P. (2009). Used lubricating oil management options based on life cycle

thinking. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(5), 294–299.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.01.002>

Kapoor, V., Li, X., Elk, M., Chandran, K., Impellitteri, C. A., & Santo Domingo, J. W. (2015). Impact of Heavy Metals on Transcriptional and Physiological Activity of Nitrifying Bacteria. *Environmental Science & Technology*, 49(22), 13454–13462.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02748>

Kapustina, V., Havukainen, J., Virkki-Hatakka, T., & Horttanainen, M. (2014). System analysis of waste oil management in Finland. *Waste Management and Research*, 32(4). <https://doi.org/10.1177/0734242X14523663>

Kapustina, V., & Horttanainen, M. (2016). A REVIEW OF THE EXISTING WASTE OIL MANAGEMENT SYSTEMS. *Journal of Solid Waste Technology & Management*, 42(1).

Karpan, B., Abdul Raman, A. A., & Taieb Aroua, M. K. (2021). Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 655–664.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.009>

Klamerus-Iwan, A., Błońska, E., Lasota, J., Kalandyk, A., & Waligórski, P. (2015). Influence of Oil Contamination on Physical and Biological Properties of Forest Soil After Chainsaw Use. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(11), 389.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-015-2649-2>

MarketsandMarketsTM. (2022). *Lubricants Market by Base Oil (Mineral Oil, Synthetic Oil, Bio-based Oil), Product Type (Engine Oil, Hydraulic Fluid, Metalworking Fluid), End-use industry (Transportation and Industrial lubricants), Region - Global Forecast to 2027*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lubricants-market-182046896.html>

Minelgaité, A., & Liobikienė, G. (2019). Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours. *Science of the Total Environment*, 667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.313>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Aceites Lubricantes Usados de origen automotor e industrial* (2nd ed.).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005). Decreto 4741, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. *Diario Oficial No. 46.137 de 30 de diciembre de 2005*.

- Resolución 1446, Pub. L. No. 1446 (2005). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-1446-de-2005.pdf>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Resolución 1446 de 2005.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Manual Técnico para el manejo de Aceites Lubricantes Usados de origen automotor e industrial (2nd ed.). <https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/todos-los-documentos-acp/manuales/276-manual-tecnico-para-el-manejo-de-aceites-usados/file>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Política ambiental para la gestión integral de residuos peligrosos y plan de Acción 2022-2030 (N. Bedoya Rdríguez, Ed.).
- Mishra, A., Kumari, U., Turlapati, V. Y., Siddiqi, H., & Meikap, B. C. (2020). Extensive thermogravimetric and thermo-kinetic study of waste motor oil based on iso-conversional methods. *Energy Conversion and Management*, 221, 113194. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113194>
- Morkunas, I., Woźniak, A., Mai, V., Rucińska-Sobkowiak, R., & Jeandet, P. (2018). The Role of Heavy Metals in Plant Response to Biotic Stress. *Molecules*, 23(9), 2320. <https://doi.org/10.3390/molecules23092320>
- Muñoz, A. (2020). Beneficios ambientales de un proceso de re-refinación de aceites lubricantes usados en Colombia. [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/80446/43253671.2021.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Nyholm, N., & Espallargas, N. (2023). Functionalized carbon nanostructures as lubricant additives – A review. *Carbon*, 201, 1200–1228. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.10.035>
- ÖZBAY, H. (2016). The effects of motor oil on the growth of three aquatic macrophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 36(6), 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.08.005>
- Pinheiro, C. T., Ascensão, V. R., Reis, M. S., Quina, M. J., & Gando-Ferreira, L. M. (2017). A data-driven approach for the study of coagulation phenomena in waste lubricant oils and its relevance in alkaline regeneration treatments. *Science of The Total Environment*, 599–600, 2054–2064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.124>

- Pinheiro, C. T., Quina, M. J., & Gando-Ferreira, L. M. (2021). Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach. In *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 51, Issue 18, pp. 2015–2050). Bellwether Publishing, Ltd. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1771887>
- Pires, A., & Martinho, G. (2013). Life cycle assessment of a waste lubricant oil management system. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0455-2>
- Ruiz, E. (2016). El análisis de ciclo de vida . Metodología de desición y evaluacion ambiental en el sector de la edificación. Universidad de los Andes.
- Sadala, S., Dutta, S., Raghava, R., Jyothsna, T. S., Chakradhar, B., & Ghosh, S. K. (2019). Resource recovery as alternative fuel and raw material from hazardous waste. In *Waste Management and Research* (Vol. 37, Issue 11). <https://doi.org/10.1177/0734242X19854124>
- Salam, L. B. (2016). Metabolism of waste engine oil by *Pseudomonas* species. 3 *Biotech*, 6(1), 98. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0419-5>
- Sánchez-Alvarracín, C., Criollo-Bravo, J., Albuja-Arias, D., García-Ávila, F., & Raúl Pelaez-Samaniego, M. (2021). Characterization of used lubricant oil in a latin-american medium-size city and analysis of options for its regeneration. *Recycling*, 6(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/recycling6010010>
- Silva, N. R., Rodrigues, T. O., Braga, T. E. N., Christoforo, A. L., & Silva, D. A. L. (2022). Re-refining of Lubricant Oil Used and Contaminated (LOUC) or its combustion in cement plants? An exploratory study in Brazil based on the life cycle assessment and circularity indicators. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.07.017>
- Speight, J., & Exall, D. I. (2014). *Refining Used Lubricating Oils*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16745>
- Speight, J. G. (2016). *Environmental Organic Chemistry for Engineers*. In *Environmental Organic Chemistry for Engineers*.
- Srivastava, V., Sarkar, A., Singh, S., Singh, P., de Araujo, A. S. F., & Singh, R. P. (2017). Agroecological Responses of Heavy Metal Pollution with Special Emphasis on Soil Health and Plant Performances. *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00064>
- Tsambe, M. Z. A., de Almeida, C. F., Ugaya, C. M. L., & de Abreu Cybis, L. F. (2019). Environmental assessment of used lubricant oil in southern brazilian region.

Journal of Environmental Accounting and Management, 7(4).  
<https://doi.org/10.5890/JEAM.2019.09.003>

- Vershinina, K., Nyashina, G., & Strizhak, P. (2022). Combustion, Pyrolysis, and Gasification of Waste-Derived Fuel Slurries, Low-Grade Liquids, and High-Moisture Waste: Review. *Applied Sciences*, 12(3), 1039.  
<https://doi.org/10.3390/app12031039>
- Wozniak, M., Batory, D., Siczek, K., & Ozuna, G. (2020). Changes in Total Friction in the Engine, Friction in Timing Chain Transmissions and Engine Emissions Due to Adding TiO<sub>2</sub> Nanoparticles to Engine Oil. *Emission Control Science and Technology*, 6(3), 358–379. <https://doi.org/10.1007/s40825-020-00167-x>
- Xu, L., Yu, J., Wang, W., Wan, G., Lin, L., & Sun, L. (2023). Upgrading and PAHs formation during used lubricant oil pyrolysis at different heating modes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169, 105813.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105813>
- Xue, J., Yu, Y., Bai, Y., Wang, L., & Wu, Y. (2015). Marine Oil-Degrading Microorganisms and Biodegradation Process of Petroleum Hydrocarbon in Marine Environments: A Review. *Current Microbiology*, 71(2), 220–228.  
<https://doi.org/10.1007/s00284-015-0825-7>
- Zhou, Z., Tang, Y., Chi, Y., Ni, M., & Buekens, A. (2018). Waste-to-energy: A review of life cycle assessment and its extension methods. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 36(1), 3–16.  
<https://doi.org/10.1177/0734242X17730137>

## ANEXOS

## ANEXOS

### ANEXO 1. NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA GESTIÓN E ACEITES LUBRICANTES USADOS

A continuación, se presentan la normatividad principal para los aceites lubricantes usados en Colombia, contenida en las siguientes tablas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014):

**Tabla 11.** Normativa aplicable a la gestión de aceites usados: Generación.

<b>NORMA</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>ARTÍCULO (Art.)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>Ley 1252 de 2008</i>	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones	Art. 12	El generador debe realizar la caracterización fisicoquímica y/o microbiológica; formular e implementar planes de gestión integral de residuos peligrosos con su respectivo plan de contingencia; garantizar que el envasado o empaçado, embalado o encapsulado, etiquetado y gestión externa de los residuos peligrosos que genera, se realice conforme a lo establecido por la normativa vigente; poseer y actualizar las respectivas hojas de seguridad; registrarse ante la Autoridad Ambiental.
<i>Decreto 4741 de 2005</i>	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.	Art. 8, párrafo 3	El generador debe actualizar la caracterización de sus residuos o desechos peligrosos.
		Art. 10	El generador debe garantizar la gestión y manejo integral de los residuos o

desechos peligrosos que genera; elaborar un plan de gestión integral de los residuos o desechos peligrosos; identificar las características de peligrosidad de cada uno de los residuos o desechos peligrosos; registrarse ante la Autoridad Ambiental competente; capacitar al personal encargado de la gestión y el manejo; contar con un plan de contingencia actualizado; conservar las certificaciones de almacenamiento, aprovechamiento, tratamiento o disposición final que emitan los respectivos receptores, hasta por un tiempo de 5 años; tomar todas las medidas de carácter preventivo o de control previas al cese, cierre, clausura o desmantelamiento de su actividad.

*Decreto  
4741 de  
2005*

Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral

Art. 14

Se debe garantizar el manejo seguro y responsable de los envases, empaques, embalajes y residuos del producto o sustancia química con propiedad peligrosa; declarar a los consumidores y a los receptores el contenido químico o biológico de los residuos o desechos peligrosos que su producto o sustancia pueda generar; comunicar el riesgo de sus sustancias o productos con propiedad peligrosa a los diferentes usuarios o consumidores.

Art. 28

Los generadores de residuos o desechos peligrosos están obligados a inscribirse en el Registro de Generadores de la Autoridad Ambiental



			competente de su jurisdicción, de acuerdo con la categorías y plazos establecidos y reglamentados mediante la Resolución 1362 de 2007 por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, a que hacen referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 de 2005.
<i>Resolución Ministerio del Medio Ambiente 415 de 1998</i>	Por la cual se establecen los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho y las condiciones técnicas para realizar la misma	Art. 6	El generador está obligado a conocer la destinación última que se le esté dando a los volúmenes generados o manejados del mismo.

**Tabla 12.** Normativa aplicable a la gestión de aceites usados para Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento: Gestores.

<b>NORMA</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>ARTÍCULO (Art.)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>Ley 1252 de 2008</i>	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones	Art. 2	Se deben diseñar planes, sistemas y procesos adecuados, limpios y eficientes de tratamiento, almacenamiento, transporte, reutilización y disposición final de residuos peligrosos que propendan al cuidado de la salud humana y el ambiente; implementar estrategias y acciones para sustituir los procesos de producción contaminantes por procesos limpios; y aprovechar al

			máximo los residuos peligrosos susceptibles de ser devueltos al ciclo productivo como materia prima
<i>Decreto 4741 de 2005</i>	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral	Art. 5, inciso 3	La mezcla de un residuo o desecho peligroso con uno que no lo es, le confiere a este último características de peligrosidad y debe ser manejado como residuo o desecho peligroso.
<i>Decreto 4741 de 2005</i>		Art. 17	El receptor debe tramitar y obtener las licencias, permisos y autorizaciones de carácter ambiental a que haya lugar; brindar un manejo seguro y ambientalmente adecuado de los residuos o desechos recibidos; expedir al generador una certificación; indicar en su publicidad el tipo de actividad y tipo de residuos o desechos peligrosos que está autorizado a manejar; contar con un plan de contingencia actualizado; tomar todas las medidas de carácter preventivo o de control previas al cese, cierre, clausura o desmantelamiento de su actividad.
		Art. 19	El responsable de la contaminación de un sitio por efecto de un manejo o una gestión inadecuada de residuos o desechos peligrosos estará obligado entre otros, a diagnosticar, remediar y reparar el daño causado a la salud y el ambiente.
<i>Resolución 1446 de 2005.</i>	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998, que	Art. 2	Establece los requisitos y condiciones para aprovechar el aceite de desecho o usado generado en el

	establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma	Art. 3	país, como combustible. El tratador de aceites de desecho o usados deberá realizar cada cuatro meses la caracterización del aceite usado tratado o sin tratar según el caso, y archivar hasta por 3 años los resultados de los análisis de laboratorio.
<i>Resolución 415 de 1998</i>	Por la cual se establecen los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho y las condiciones técnicas para realizar la misma	Art. 5	Todas las industrias, obras o actividades que pretendan utilizar en sus hornos o calderas, aceites de desecho como combustible único o mezclados con otros tipos de combustibles, requerirán permiso previo de emisión atmosférica o la modificación parcial del permiso vigente con que cuenten.
<i>Resolución 909 de 2008</i>	Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones	Art. 102	Establece los residuos permitidos mediante tratamiento térmico en instalaciones de incineración de residuos y/o desechos peligrosos que realicen coprocesamiento.
<i>Decreto 2820 de 2010</i>	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales	Art. 9, numeral 10	Necesidad de obtener licencia ambiental para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos.

**Tabla 13.** Normativa aplicable a la gestión de aceites usados para Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento: Transportadores.

<b>NORMA</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>ARTÍCULO (Art.)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>Decreto 4741 de 2005</i>	Por el cual se reglamenta parcialmente a prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral	Art. 16	Obligación de garantizar la gestión y manejo integral de los residuos o desechos peligrosos que recibe para transportar; entregar la totalidad de los residuos o desechos peligrosos recibidos; realizar el embalaje y etiquetado (cundo sea el caso); contar con un plan de contingencia actualizado; no movilizar residuos o desechos peligrosos que sean incompatibles; realizar las actividades de lavado de vehículos que haya transportado residuos o desechos peligrosos o sustancias o productos que pueden conducir a la generación de los mismos, responsabilizarse solidariamente con el remitente de los residuos en caso de contingencia
<i>Decreto 1609 de 2002</i>	Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera	Art. 4	Rotular y etiquetar los embalajes y envases; no transportar cargas que sobresalgan por su extremo delantero; garantizar la seguridad y estabilidad de la carga durante su transporte; asegurar cada contenedor al vehículo; dar cumplimiento a lo establecido en las Normas Técnicas Colombianas NTC.
		Art. 5	El vehículo y la unidad que transporte mercancías peligrosas debe poseer rótulos de identificación (NTC 1692); identificar en una placa el número de las Naciones Unidas (UN) para cada material que se transporte; contar con

los elementos básicos para atención de emergencias; tener el sistema eléctrico con dispositivos que minimicen los riesgos de chispas o explosiones; portar mínimo dos extintores tipo multipropósito; contar con un dispositivo sonoro o pito que se active en el momento en el cual el vehículo se encuentre en movimiento de reversa.

Art. 11 El remitente o propietario de mercancías peligrosas debe diseñar y ejecutar un programa de capacitación y entrenamiento sobre el manejo de procedimientos operativos normalizados y prácticas seguras para todo el personal que interviene en las labores de embalaje, cargue, descargue, almacenamiento, manipulación, disposición adecuada de residuos, descontaminación y limpieza; no despachar el vehículo llevando simultáneamente mercancías peligrosas, con personas, animales, medicamentos o alimentos destinados al consumo humano o animal, o embalajes destinados para alguna de estas labores; portar la tarjeta de emergencia en idioma español y entregarla al conductor; solicitar al fabricante, propietario, importador o representante de la mercancía peligrosa la hoja de seguridad en idioma español y enviarla al destinatario antes de despachar el material; entregar la carga debidamente etiquetada; entregar la

carga debidamente embalada y envasada; diseñar el plan de contingencia para la atención de accidentes durante las operaciones de transporte de mercancías peligrosas; exigir al conductor la capacitación necesaria y la tarjeta de registro nacional para el transporte de mercancías peligrosas; adquirir póliza de responsabilidad civil extracontractual.

Art. 13

La empresa que transporte debe diseñar el plan de contingencia para la atención de accidentes; diseñar y ejecutar un programa de capacitación y entrenamiento sobre el manejo de procedimientos operativos normalizados y prácticas seguras para todo el personal; exigir la carga debidamente etiquetada, rotulada, embalada y envasada; garantizar la identificación de las unidades de transporte y del vehículo; garantizar que el vehículo vaya dotado de equipos y elementos de protección para atención de emergencias; mantener un sistema de información estadístico sobre movilización; exigir la tarjeta de emergencia; adquirir póliza de responsabilidad civil extracontractual.

**Tabla 14.** Normativa aplicable a la gestión de aceites usados para Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento: Prohibiciones.

<b>NORMA</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>ARTÍCULO (Art.)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<i>Constitución Política</i>		Art. 81	Queda prohibida la fabricación, importación, posesión y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, así como la introducción al territorio nacional de residuos nucleares y desechos tóxicos. El Estado regulará el ingreso al país y la salida de él de los recursos genéticos, y su utilización, de acuerdo con el interés nacional.
<i>Ley 1252 de 2008</i>	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones	Art. 2, numeral 1	Principios. Con el objeto de establecer el alcance y contenido de la presente Ley, se atenderán los siguientes principios:  1. Atender con debida diligencia la prohibición del ingreso y tráfico de residuos peligrosos provenientes de otros países. El Estado será responsable frente a la entrada de mercancías que con otra nominación pretenda introducir cualquier forma de residuo o desecho peligroso y sancionará, de acuerdo con la ley, a las personas que con su conducta intenten ingresar desechos peligrosos bajo otra nominación.
		Art. 4	Queda prohibida la introducción, importación o tráfico de residuos o desechos peligrosos al territorio nacional por parte de cualquier persona natural o jurídica, de carácter público o privado. De igual forma, será

			prohibida la disposición o recepción final de residuos peligrosos en rellenos sanitarios que no cumplan con la capacidad o condiciones físicas y técnicas adecuadas para tal fin.
<i>Resolución 1402 de 2006</i>	Por la cual se desarrolla parcialmente el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, en materia de residuos peligrosos	Art.3	Ninguna persona natural o jurídica podrá introducir al territorio nacional residuos o desechos peligrosos si no cumple con lo consagrado en el Convenio de Basilea, Ley 253 de 1996, Ley 430 de 1998, Ley 99 de 1993 y sus disposiciones reglamentarias. En consecuencia, cualquier movimiento transfronterizo de residuos o desechos peligrosos, deberá dar cumplimiento a lo establecido en las mencionadas disposiciones.
<i>Decreto 4741 de 2005</i>	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral	Art. 32	Prohibiciones. Se prohíbe: <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Introducir al territorio nacional residuos nucleares y desechos tóxicos;</li> <li>b) Importar residuos o desechos que contengan o estén constituidos por contaminantes orgánicos persistentes (Aldrín, Clordano, Dieldrín, Endrín, Heptacloro, Hexaclorobenceno, Mirex, Toxafeno, Bifenilos Policlorados, DDT);</li> <li>c) Importar equipos o sustancias que contengan bifenilos policlorados (PCB), en una concentración igual o superior a 50 mg/kg;</li> <li>d) Quemar residuos o desechos peligrosos a cielo abierto;</li> <li>e) Ingresar residuos o desechos peligrosos en rellenos</li> </ul>



			<p>sanitarios, sino existen celdas de seguridad dentro de éste, autorizadas para la disposición final.</p> <p>f) Transferir transformadores o equipos eléctricos en desuso con aceite y aceites dieléctricos usados mediante remates, bolsas de residuos, subastas o donaciones públicas o privadas sin informar previamente a la autoridad ambiental competente los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas efectuadas para determinar el contenido o no de bifenilos policlorados;</p> <p>g) La disposición o enterramiento de residuos o desechos peligrosos en sitios no autorizados para esta finalidad por la autoridad ambiental competente;</p> <p>h) El abandono de residuos o desechos peligrosos en vías, suelos, humedales, parques, cuerpos de agua o en cualquier otro sitio.</p>
<i>Resolución 415 de 1998</i>	Por la cual se establecen los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho y las condiciones técnicas para realizar la misma	Art. 4	Se prohíbe que las fábricas de alimentos para humanos y para animales utilicen aceites de desecho como combustible en hornos y calderas.
<i>Decreto 1609 de 2002</i>	Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas.	Art. 48	Está prohibido el transporte de mercancías peligrosas en vehículos destinados al transporte de pasajeros. En los vehículos de transporte de pasajeros, los equipajes solo pueden contener mercancías peligrosas de

uso personal (medicinal o de tocador), en una cantidad no mayor a un kilogramo (1 kg.) o un litro (1 L), por pasajero. Así mismo, está totalmente prohibido el transporte de mercancías de la clase 1 (explosivos), clase 7 (radiactivos) y clase 8 (corrosivos).

**ANEXO 2. PROPIEDADES PRODUCTO DE RE-REFINACIÓN POR DESTILACIÓN DE CAPA FINA  
PROCESO ATICA**

**Tabla 15.** Propiedades sustituto de Fuel Oil Re-refinación aceites usados (Fuente: ATICA)

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>RESULTADO</b>
<b>GRAVEDAD API</b>	° API	ASTM D 4052	24
<b>VISCOSIDAD@50°C</b>	cSt	ASTM D-445	250-450
<b>PODER CALORÍFICO</b>	Btu/lb	ASTM D-240	17.450
<b>PUNTO DE CHISPA</b>	°C	ASTM D-93	114
<b>CONTENIDO DE AGUA Y SEDIMENTO</b>	% Vol	ASTM D-2709	1 %
<b>DESTILACIÓN</b>	% Vol	ASTM D 86	< 0,5 %

**Tabla 16.** Propiedades sustituto de ACPM Re-refinación aceites usados (Fuente: ATICA).

<b>PARÁMETROS</b>	<b>METODO</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>AGUA</b>	D-2709	0,1	%m/m
<b>GRAVEDAD API A 15°C</b>	D-287	32	°API
<b>FLASH POINT</b>	D-93	>70	°C
<b>DENSIDAD A 15°C</b>	D-1298	863	Kg/m3
<b>AZUFRE</b>	D 4294	0,511	% m/m
<b>SEDIMENTO</b>	D 1796	0,01	% m/m
<b>CENIZAS</b>	D-482	0,01	%m/m
<b>VISCOSIDAD A 50°C</b>	D-445	12	CSt
<b>PCB</b>	D 4059	< 0,05	Ppb

**Tabla 17.** Propiedades Aceite sustituto base proceso Re-refinación aceites usados (Fuente: ATICA)

<b>PARÁMETROS</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>GRAVEDAD API</b>	D-976	32	°API
<b>VISCOSIDAD@50°C</b>	D-445	28	cSt
<b>FLASH POINT</b>	D-93	>70	°C
<b>AGUA</b>	D-2709	0,05	%Vol
<b>CALCIO</b>	AA-Llama	11,31	Ppm
<b>FOSFORO</b>	AA-Llama	2,76	Ppm
<b>ZINC</b>	AA-Llama	8,23	Ppm
<b>ALUMINIO</b>	AA-Llama	4,78	Ppm
<b>SÍLICE</b>	AA-Llama	14,07	Ppm
<b>VANADIO</b>	AA-Llama	38,77	Ppm
<b>SEDIMENTO</b>	ASTM D 1796	<0,01	% m/m
<b>TOTAL HALOGENS</b>	ASTM D 3230	10,32	Ppm
<b>CADMIUM</b>	AA-Horno de grafito	< 0,001	Ppm
<b>POUR POINT</b>	ASTM D 93	- 11,8	°F
<b>LEAD</b>	ASTM D 3237	0,15	Ppm
<b>ARSÉNICO</b>	AA-Generador hidruros	< 0,005	Ppm
<b>SULFUR</b>	ASTM D 4294	0,41	% m/m
<b>CHROMIUM</b>	AA-Horno de grafito	< 0,05	Ppm
<b>PCB</b>	ASTM D 4059	< 0,05	Ppb

El corte de sustituto de Nafta, como su cantidad es muy inferior en comparación con los demás sustitutos, dado que su API es mínimo de 35 se utiliza para subir el grado API del demás sustituto de combustibles para la comercialización.