

**Envases plásticos en Pesticidas: uso y disposición en busca de minimizar el impacto
ambiental**

Evelyn Cecilia Villamil Barandica

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI
Química
Barranquilla, marzo 2023

Envases plásticos en Pesticidas: uso y disposición en busca de minimizar el impacto ambiental

Evelyn Cecilia Villamil Barandica

Trabajo de grado para optar el título de Química

Directora:

PhD Paula Andrea Méndez Morales

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Química

Barranquilla, marzo 2023

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto en lo profesional y como en lo personal.

Así mismo, una dedicatoria especial a mi madre por las veces que me vio caer y que con sus palabras llenas de amor me levantó y me dio fuerzas para continuar, aunque ya no esté en esta vida, la encuentro cada vez en mis pensamientos. A mi padre, quien ha sido una fortaleza en mi vida; al apoyo de mis hijos, quienes con una sonrisa me daban razones para continuar llenando mi vida de luz y color.

Agradecimientos

A mi familia, por haberme impulsado a continuar día a día en esta universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial, a mi tutora de proyecto de grado, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de titulación, con sus palabras de impulso y enseñanza para continuar y así poder desarrollarme profesionalmente.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

Agradecimiento a mi universo, al Dios todopoderoso que guía mi camino todo el tiempo.

Resumen

Desde que el plástico fue desarrollado, el volumen de producción ha aumentado y con ello el volumen de los desechos. Ante ello, se ha iniciado una búsqueda para reducir su impacto sobre el planeta, y la reutilización de estos ha sido una alternativa, sin embargo, se encuentra la limitante de la descontaminación, como es el caso de los envases plásticos de uso en pesticidas, siendo estos tratados como residuos peligrosos.

En la presente investigación documental se desarrolla la revisión bibliográfica acerca del tratamiento de los residuos plásticos que han sido utilizados en el envasado de productos plaguicidas con la finalidad de identificar el aporte a la huella de carbono que generan dichos residuos.

Se parte de que los materiales utilizados hasta el momento son los mismos implementados para el desarrollo de otros productos y que, por tanto, deberían seguir la ruta de las tres “R”: reducir, reutilizar y recuperar. También se tiene en cuenta el tipo de residuo que se genera en dichos materiales luego de haber contenido un tipo de producto plaguicida.

La investigación documental se realizó basada en una metodología de investigación mixta, que incluye elementos cualitativos y cuantitativos, donde la información se ha obtenido a través de los instrumentos de revisión documental y comunicaciones con expertos de la industria. De igual manera, se contrastó la información teórica con la experiencia de la investigadora y con el caso particular.

Palabras clave: contaminación, huella de carbono, polietileno, medio ambiente, residuos peligrosos, reciclaje, plástico.

Abstract

Since the development of plastic, the volume of production has increased, and consequently the volume of waste. In response, a search began to diminish its impact on the planet, and the reuse of these has been an alternative. However, decontamination is limited, as it is with plastic containers used in pesticides which are treated as hazardous waste.

In the present documentary research, there is a bibliographic review about the treatment of plastic waste that has been used in the packaging of pesticide products is developed in order to identify the contribution to the carbon footprint that generate said waste.

It is assumed that the materials used so far are the same implemented for the development of other products and that, therefore, they should follow the path of the three "R": reduce, reuse and recover. It also takes into consideration the type of residues that are produced in those materials after they contain a type of pest control product.

The documentary research was carried out based on a mixed research methodology, which includes qualitative and quantitative elements, where the information has been obtained through documentary review instruments and communications with industry experts. In the same way, the theoretical information was contrasted with the experience of the researcher and with the particular case.

Keywords: pollution, carbon footprint, polyethylene, environment, hazardous waste, recycling, plastic

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN	11
Planteamiento del Problema	13
Justificación	14
OBJETIVOS.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
CAPÍTULO I. PESTICIDAS.....	17
Definición	17
Clasificación	18
¿Qué contienen los pesticidas y cuál es su función?.....	20
Usos.....	22
Efectos secundarios y consecuencias de su uso	24
Características de la formulación de pesticidas	27
Tiempo de vida útil de los productos pesticidas	27

Materiales utilizados en el envasado de pesticidas	28
Almacenamiento seguro y transporte de pesticidas	32
CAPÍTULO 2. MATERIALES POLIMÉRICOS.....	35
Definición	35
Clasificación	35
Usos.....	36
CAPÍTULO 3. LA HUELLA DE CARBONO.....	47
CAPÍTULO 4. DISPOSICIÓN DE ENVASES.....	52
Métodos para descontaminar los envases	52
Posible tratamiento para su disposición final y/o reciclado	54
Otras técnicas aplicadas	56
CONCLUSIONES.....	63
PERSPECTIVAS.....	66
REFERENCIAS.....	67

Lista de Figuras

Figura 1. Pasos iniciales en la deformación del polietileno.	22
Figura 2. Estructura de Thiacloprid.	24
Figura 3. Estructura química del Glifosato.	24
Figura 4. Efectos de la humedad sobre resistencia a la tracción del Nylon 66.	30
Figura 5. Efectos de la humedad sobre resistencia a la tracción del nylon 66	30
Figura 6. Fórmula y estructura del polímero polietileno.	37
Figura 7. Tres formas de representación de la estructura del polietileno (PE); a) Modelo como sólido tridimensional, b) espaciado tridimensional y c) simple bidimensional	37
Figura 8. Síntesis del PE a partir de metallocenos.	38
Figura 9. Esquema de polimerización del polietileno.	39
Figura 10. Agentes comunes de la solvólisis.	42
Figura 11. Oxidación, tomado de la degradación de los plásticos.	43
Figura 12. Cómo se debe realizar la técnica de triple lavado.	53
Figura 13. Código de identificación de resinas del Plástico.	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Uso de los tipos de pesticidas.	23
Tabla 2. Poder calorífico guía ambiental 2004.	57

Introducción

La presente investigación se realiza con la intención de conocer los tipos de envases utilizados en pesticidas de tipo insecticida y herbicida (en ambos se tomó un tipo específico), y cómo podemos aportar en la disminución de plástico, el cual impacta en la huella de carbono sobre el planeta. Para abordar esta problemática, es importante conocer sobre los polímeros y los pesticidas agrícolas que se integran en estos envases.

La industria del plástico es actualmente responsable del 4 – 6% del consumo mundial de petróleo crudo (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos -OCDE-, 2022). Una cantidad proporcional a la consumida por la industria de la aviación. Se proyecta que para el 2050 el consumo de plástico incrementará un 20% el consumo de petróleo y con ellos un aumento del 15% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Organización de las Naciones Unidas, 2018). Lo anterior, evidencia las implicaciones y el impacto que tiene la fabricación de plásticos.

En la actualidad muchos pesticidas de uso agrícola son empacados en contenedores plásticos, que, por su grosor de pared, son asignados como empaques “resistentes” sin profundizar en los requerimientos del producto. Esto lleva a cuestionar si el producto puede generar ciertas reacciones con el empaque y desestabilizar el polímero ocasionando fuga del producto, contaminación en el ambiente y riesgo para la salud de los seres vivos. De esta manera, se puede pensar en un aumento de materiales no necesarios y su impacto en el medio ambiente. Además, dada esta problemática no se puede hablar de sostenibilidad ambiental debido a que el residuo ambiental que se genera de los envases plásticos de uso en pesticidas no son materiales reciclables, generando un costo económico y ambiental alto (Spiegel y Maystre, 2012).

Para poder solventar la situación ambiental generada por los desechos plásticos no reciclados y al tiempo reducir la huella de carbono provocada por éstos contaminados con pesticidas es necesario el apoyo de las entidades gubernamentales. Con la creación e implementación de políticas estatales dirigidas al correcto tratamiento de envases de uso en pesticidas, a nivel mundial se combate el cambio climático y sus efectos. Un ejemplo de esto es el promover energía verde o apostar por la adaptación y no sólo por la mitigación, o el desechar menos y reciclar más, sin duda lo anterior ayuda a reducir los contaminantes; de esta manera, es posible obtener energía renovable y aportar en la disminución de los gases de efecto invernadero, esto como efectos positivos que se tendría.

Por ello, ante la importancia de conocer acerca de las alternativas y tratamientos del envase de plástico utilizado en el envasado, transporte y almacenamiento de los pesticidas, y las propuestas medioambientales para reducir su uso e impacto, se desarrolló una revisión documental a partir de la recopilación de información en bases de datos, como por mencionar algunos tales como “información básica de pesticidas”, “Ciencia e ingeniería de materiales”, “Guía para la gestión de manejo de residuos”, “Uso de pesticidas en la agricultura”, “Situación actual del plástico en Colombia” y “Campo Limpio, una solución para el Agro”, entre otros. Así igual y de mucho valor, las experiencias de la empresa Nardiplast SAS, fabricante de envases plásticos en Colombia, revisadas durante las comunicaciones establecidas con su Gerente Comercial.

Planteamiento del Problema

La huella de carbono se aporta desde diferentes actividades, siendo las principales el transporte, la quema de carbón, la ganadería, la deforestación, uso de electricidad, ocasionando un daño irreversible en el planeta. Además, la fabricación de envases para pesticidas es una de estas actividades, directamente relacionada con la industria del plástico. La problemática de este uso se evidencia en la cantidad de polímero sintético que se está utilizando en los envases y en el tipo de material utilizado para su fabricación, además de la contaminación e imposibilidad del reciclaje. Por otro lado, el proceso de fabricación de envases requiere un consumo energético y por ende una huella de carbono bastante amplia (Rodríguez et al, 2020)

Así mismo, empresas como Pepsi, Coca-Cola, Nestle, son grandes aportantes a la contaminación por plástico, esto de acuerdo con el informe Global Commitment Spring 2019, donde se da a conocer la huella ambiental de la empresa Coca-Cola, la cual produce 3 millones de toneladas de plástico al año, cifra reportada por MacArthur (2021), activista en pro de la reducción de plástico en las grandes empresas (Carbono News, 2021).

Por otra parte, los programas enfocados al posconsumo de envases plaguicidas son regulados por la resolución 1675 de 2013 de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -en adelante Minambiente-, y es estricta responsabilidad del fabricante la devolución de los envases a centros de acopio, sin embargo, esto no se cumple en su totalidad, lo que conlleva al aumento de residuos peligrosos no controlados (Minambiente, 2013). Con esta revisión bibliográfica se pretende dar respuesta a la pregunta ¿Cuál es el aporte de los envases plásticos de uso en pesticidas a la huella de carbono sobre el planeta, desde una perspectiva de su producción, uso y limitante para su reciclaje?

Justificación

Teniendo en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible (ODS- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos), es importante contribuir para mantener el equilibrio de los ecosistemas y preservar el ambiente. Por ello, por medio de la identificación de problemáticas y posibles soluciones se logra identificar rutas para generar acciones futuras que contribuyen a la preservación del medio ambiente.

El plástico es un material no biodegradable, afectando los ecosistemas acuáticos, terrestres y aéreos. Cuando se habla de reciclaje, se busca reutilizar y darle otra forma al plástico que ha sido moldeado para otro uso. En la actualidad el consumo y producción del plástico se ha convertido en una problemática, dada su presencia en sistemas acuíferos y terrestres, como microplástico (Koelmans et al, 2019), considerándose un material peligroso dado que ha sido declarado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) sus efectos en la disrupción endocrina (Estévez, 2021).

Los envases plásticos son materiales derivados de hidrocarburos, de allí la cadena de contaminación que aporta a la huella de carbono, la fuente de materia prima, la producción, uso y disposición final. Para ser producidos, pasan por procesos de destilación en refinerías (proceso de separación y obtención de la materia virgen), de allí se obtienen los polímeros y de acuerdo con su necesidad, es clasificado para luego ser moldeado (proceso de fabricación del producto final). Las emisiones de CO₂ son generadas en ambos procesos mencionados, a su vez, cuando se utilizan en el envasado y transporte de sustancias químicas, se genera un problema adicional, de contaminación y desuso de los recipientes contaminados (Huici et al, 2017).

La presente revisión bibliográfica se enfoca en ayudar en la aprehensión del conocimiento sobre embalajes plásticos de uso en pesticidas desde su consumo, aplicado en la reducción del impacto al medio ambiente que deja éste como huella, explorando las metodologías implementadas en la reducción del plástico utilizado en su fabricación, sin que esto afecte al producto final y ponga en riesgo el medio ambiente. De esta forma se aporta en la revisión del panorama actual de fuentes que contribuyen a la huella de carbono y posibles alternativas para su disminución.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un estado del arte que permita identificar el aporte a la huella de carbono de los plásticos utilizados como envases de pesticidas y los métodos actuales para mitigar esta problemática.

Objetivos específicos

Identificar los materiales poliméricos que constituyen los envases de uso en el empaqueo de pesticidas en cuanto al tipo y cantidad de material utilizado.

Analizar el aporte de los polímeros sintéticos no reciclables, a la huella de carbono sobre el planeta.

Identificar las metodologías actuales que han sido implementadas para mitigar el efecto del uso de plásticos en el envasado de pesticidas.

Capítulo I. Pesticidas

Definición

De acuerdo con el Departamento de Reglamentación de Pesticidas de California -CDPR por sus siglas en inglés- (s.f.a) un pesticida es cualquier sustancia elaborada para controlar, matar, repeler o atraer a una plaga. Tal plaga puede ser cualquier organismo vivo que provoque daño o pérdidas económicas o que transmita o produzca alguna enfermedad. Las plagas pueden ser animales (como insectos o ratones), plantas no deseadas (malas hierbas, malezas) o microorganismos como enfermedades y virus de las plantas.

Otras sustancias afines que se encuentran inmersas en la palabra pesticida pueden ser:

- Exfoliadores, provocan la caída de las hojas o follaje de las plantas, generalmente se usan para facilitar la cosecha.
- Secantes, promueven la deshidratación de tejidos vivos, como insectos o partes específicas de una planta.
- Reguladores del crecimiento de insectos, interfieren con la acción de ciertas hormonas que controlan la muda de la piel, la madurez desde la etapa de la pupa hasta el adulto y otros procesos de desarrollo.
- Reguladores del crecimiento de las plantas, sustancias (sin incluir fertilizantes y otros nutrientes para las plantas) que alteran el crecimiento esperado, la floración o el ritmo de reproducción de las plantas, a través de acciones hormonales en vez de físicas (CDPR, s.f.a).

El Real Decreto nº. 3349/83 de 30 de noviembre de 1983 sobre "Reglamentación técnico-sanitaria para la fabricación, comercialización y utilización de plaguicidas" establece una serie de

definiciones, dentro de las cuales cabe resaltar la siguiente (Presidencia del Gobierno Español, 1984.):

Los pesticidas son productos destinados a cualquiera de los fines siguientes:

- a. Combatir los agentes nocivos para los vegetales y productos vegetales o prevenir su acción.
- b. Favorecer o regular la producción vegetal, con excepción de los nutrientes y los destinados a la enmienda de suelos.
- c. Conservar los productos vegetales, incluida la protección de las maderas.
- d. Destruir los vegetales indeseables.
- e. Destruir parte de los vegetales o prevenir un crecimiento indeseable de los mismos.
- f. Hacer inofensivos, destruir o prevenir la acción de otros organismos nocivos o indeseables distintos de los que atacan a los vegetales. (Real Decreto nº. 3349/83, Artículo 2, numeral 1).

Clasificación

Existen muchos tipos de plaguicidas o pesticidas, y su clasificación puede ser efectuada con base en diversos aspectos. De acuerdo con Navas y García (2020) se pueden clasificar de la siguiente forma:

Según el destino de su aplicación pueden considerarse:

- a. Pesticidas de uso o productos fitosanitarios: los destinados a su utilización en el ámbito de la sanidad vegetal o el control de vegetales.
- b. Pesticidas de uso ganadero: los destinados a su utilización en el entorno de los animales o en actividades relacionadas con su explotación.

c. Pesticidas de uso en la industria alimentaria: los destinados a tratamientos de productos o dispositivos relacionados con la industria alimentaria.

d. Pesticidas de uso ambiental: los destinados al saneamiento de locales u otros establecimientos públicos o privados.

e. Pesticidas de uso en higiene personal: aquellos preparados útiles para la aplicación directa sobre el hombre.

f. Pesticidas de uso doméstico: cualquier preparado destinado para aplicación por personas no especialmente cualificadas en viviendas o locales habitados. (p. 2).

Así igual, se clasifican según su estado

a. Gases o gases licuados

b. Fumigantes y aerosoles

c. Polvos, sólidos, cebos

d. Líquidos

Y bajo aspecto del rango de acción:

En el presente documento se trabajan los pesticidas de uso agrícola, que de acuerdo con el CDPR (s.f.b) se clasifican en:

Insecticidas: Mata o extermina insectos que atacan a los vegetales, semillas y frutos.

Fungicidas: Destruyen hongos (Muchos tipos pueden infectar y causar enfermedades en plantas, animales y personas; dos ejemplos son la roya, mildió y el tizón).

Herbicidas: Destruyen las malas hierbas, malezas y otras plantas no deseadas.

Larvicidas: Producto que puede ser aplicado directamente al agua para controlar larvas de mosquito.

Acaricidas: sustancia especialmente efectiva en el combate de los ácaros y las garrapatas.

Rodenticidas: Controlan a los ratones y a otros roedores de semillas.

Molusquicidas: Utilizado para exterminar caracoles y babosas.

Nematicidas: Destruyen nematodos (organismos microscópicos en forma de lombriz que se alimentan de las raíces de las plantas).

¿Qué contienen los pesticidas y cuál es su función?

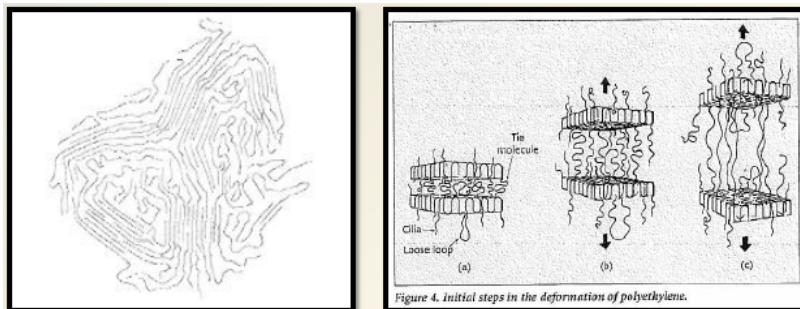
Los plaguicidas o como se nombran comúnmente, agroquímicos, pesticidas de uso agrícola o fitosanitarios, contienen un ingrediente activo el cual permite eliminar, controlar o repeler una plaga; y pueden estar en diferentes concentraciones, así como un ingrediente inerte u otros. Químicamente estos ingredientes activos están compuestos por elementos inorgánicos como el arsénico, derivados del cobre, sales de zinc, magnesio, entre otros. Por su parte, dentro de los compuestos orgánicos se tienen: Organoclorados; carbamatos; derivados de cumarina; organosforados; piretroides; tiocarbamatos; triazinas; neonicotinoides; benzoilúrea.

El resto de ingredientes inertes u otros pueden tener una variedad de funciones, dentro de ellas atraer la plaga, dispersar los ingredientes activos en el entorno y/o reducir los derivados de este. Entre estos ingredientes se tienen los coadyuvantes que tienen como finalidad modificar positivamente algunas características físicas y químicas del producto pesticida. Entre estos tenemos los tensoactivos o surfactantes (permite la absorción del agroquímico en la hoja); adherentes (mucilago que aumenta la viscosidad del producto y su adherencia a la superficie en contacto); dispersantes (homogeneidad del producto) y estabilizantes (protegen el ingrediente activo de la degradación). Todos estos ingredientes no se listan en la etiqueta de los productos

fitosanitario, ya que su identidad es considerada de carácter confidencial para la compañía productora de pesticida (OMS, 2017).

Algunos datos sobre los otros ingredientes: pueden desempeñar una variedad de trabajos, tal como aumentar la vida útil del producto final, atraer la plaga, y dispersar el producto de manera más uniforme sobre las superficies. Algunos ingredientes inertes son el queroseno, el propano y otros productos derivados del petróleo, el aceite de girasol, cacahuete o maní, cera de abejas y sal. Entre los inertes existen también los surfactantes, los cuales corresponden a compuestos químicos adyuvantes, muchos de los cuales son utilizados para mejorar la efectividad de sustancias biológicamente activas como los plaguicidas. La mayoría actúa en las interfaces de fluidos y tiene una estructura bipolar con porciones hidrofílicas e hidrofóbicas que les permite interactuar con las superficies celulares y con las membranas biológicas de las plantas, causando efectos sobre la tensión superficial y la movilización de moléculas entre los medios extra e intracelular. Es decir, este corresponde a sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases, utilizado para crear el puente entre ingredientes de diferentes familias que pudieran verse afectados y con tendencia a reaccionar de forma negativa dentro de la solución final (ver figura 1). Realmente es aquí donde se da la interacción de los ingredientes de los pesticidas y el plástico de las botellas (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2021). En este sentido la tensión poliaxial en el material afecta su estabilidad (Howard, 1959, citado por Balarim, s.f.).

Figura 1.
Pasos iniciales en la deformación del polietileno.



Nota. Adaptado de Requisitos Funcionales: Escr [ilustración] de Balarim, s.f., quien cita a Howard, 1959.

Usos

Desde la antigüedad se han usado sustancias químicas para combatir las plagas. Muchos tipos de sustancias químicas fueron descubiertas hacia finales de los años 40, las cuales ayudaron a incrementar la producción agrícola y a obtener una abundante variedad de granos, frutas y verduras, a bajo costo. Sin embargo, durante los años 60, se inició el proceso de materialización de las consecuencias del uso de pesticidas, por lo que aumentó la preocupación sobre posibles efectos sobre la salud, la contaminación ambiental e impacto a la vida silvestre. Algunas plagas se volvieron inmunes a muchos pesticidas (Patarasiriwong et al, 2013). Ver tabla 1.

Puesto que la mayoría de los pesticidas están diseñados para ser tóxicos a la plaga que se busca controlar, y dado que cualquier sustancia puede ser dañina si se usa de manera incorrecta, el uso de pesticidas se controla de manera estricta. Se tienen regulaciones que deben cumplir los productos y sus fabricantes. (CDPR, s.f.b).

Tabla 1.
Uso de los tipos de pesticidas.

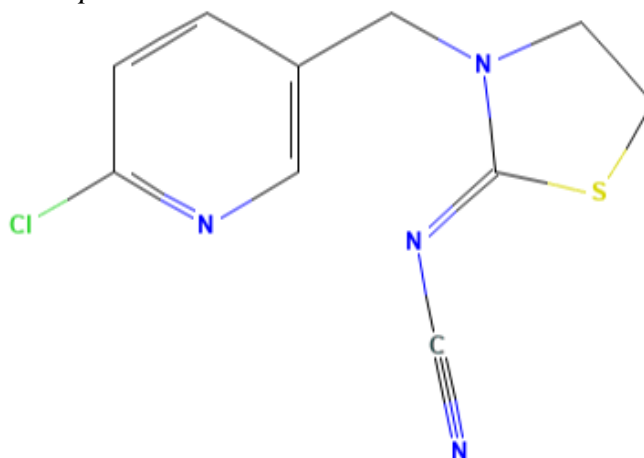
Tipos de pesticidas	Uso
Algicidas	Controlar el crecimiento de algas.
Antimicrobiano	Mata bacterias y virus
Desinfectante	Desinfectar microorganismos en objetos inanimados
Fungicidas	Mata hongos como tizón, moho, moho y óxido.
Herbicidas	Matar plantas no deseadas como la maleza
Insecticidas	Matar insectos y otros artrópodos como ácaros
Molusquicidas	Mata caracoles y babosas
Nematicidas	Mata nematodos
Ovicidas	Mata huevos de insectos y ácaros
Regulador de crecimiento vegetal	Altera el ritmo de crecimiento, floración y reproducción de las plantas
Rodenticidas	Mata roedores como ratas, ratones y topos.
Repelentes	Repele plagas no deseadas como mosquitos y pájaros.

A lo largo de la historia en el planeta tierra se han presentado hambrunas ocasionadas por plagas que se han vuelto muy resistentes ante pesticidas y de esa forma se han reproducido aceleradamente y han ocasionado daños en ecosistemas; como consecuencia de estos hechos se han desarrollado muchos productos de origen químico, que han sido vendidos en grandes cantidades como forma de solucionar el hambre y la pobreza (Gil et al, 2020).

En la presente revisión bibliográfica se analiza el impacto de un insecticida, el Proteus OD 170 y un herbicida, como es el Roundup SL, para los cuales se toma la composición química de su ingrediente activo y se ilustra a continuación. El principal ingrediente activo del Proteus OD

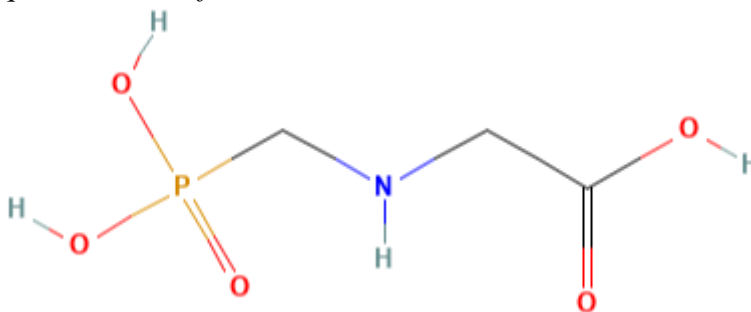
170 es el Thiacloprid con fórmula molecular $C_{10}H_9ClN_4S$ (ver figura 2). Por su parte, el Roundup SL tiene como ingredientes activos el Glifosato – sal de isopropilamina y su fórmula es $C_6H_{17}N_2O_5P$ (ver figura 3).

*Figura 2.
Estructura de Thiacloprid.*



Nota. Adaptado de Pubchem (s.f.) [ilustración] Thiacloprid.

*Figura 3.
Estructura química del Glifosato.*



Nota. Adaptado de Pubchem (s.f.) [ilustración] Glifosato.

Efectos secundarios y consecuencias de su uso

Los agroquímicos en general son productos utilizados en la agricultura y pueden ser altamente tóxicos y perjudiciales en diferentes aspectos. Los ingredientes que contienen dentro de su estructura química (Ej. Triazinas, Piretroides, Aminados, Clorados, etc.) al ser aplicados

continuamente y en forma excesiva a los cultivos, llegan a generar impacto dentro de un ecosistema y se vuelven residuales. Estos elementos sufren una serie de transformaciones posteriores a su manipulación en campo; es así como cerca del 98% de los insecticidas y el 95 % de los herbicidas utilizados no cumple el objetivo de llegar a la planta y son dispersados a través del viento y el agua. Los componentes tóxicos pueden movilizarse a grandes distancias como residuos volátiles que pasan a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO_2), óxido de nitroso (N_2O), hidrogenofluorocarburo (HFC), Óxido de azufre (SO_2), entre otras y regresan con la lluvia mediante deposición húmeda o seca o a través del suelo (escorrentía, lixiviación o lavado) por medio del agua de riego y lluvia para contaminar fuentes de agua tanto superficial (ríos, lagos y mares) como subterránea. (Ramírez, 2018)

El uso del pesticida debe hacerse bajo los controles de un agrónomo, no puede hacerse de forma desmedida, siendo esto último el mayor problema en la aplicación de los productos. Su uso abusivo o inadecuado, puede provocar graves problemas para la salud y el medio ambiente.

Uno de los efectos irreversibles en los ecosistemas es dado por la falta de conocimiento de los usuarios en la aplicación del producto pesticida, lo cual ocasiona pérdida en la fertilidad de los suelos, contaminación de los ecosistemas, aparición de nuevas plagas y enfermedades, disminución de la diversidad genética, resistencia genética de organismos perjudiciales, producción de alimentos con residuos tóxicos y eliminación de especies silvestres (Gil et al, 2020)

La pérdida en la fertilidad de los suelos se realiza sobre elementos indispensables como el fósforo, nitrógeno, potasio y otros que forman parte de la nutrición de las plantas. Estas sustancias reaccionan con los elementos del suelo y forman compuestos no deseados, como complejos de coordinación difíciles de remover por su afinidad al suelo; cambian los valores de

pH y por ende alteran la fauna microbiana producto del desbalance en el medio que los rodea. Los compuestos formados por sustitución isomérica como los filosilicatos, por ejemplo, crean descompensación iónica, responsables de cargas negativas lo cual se ve en resultados de suelos ácidos y básicos. La formación de SO_4Ca , CO_3Ca , aluminosilicatos (mezclas de Al_2O_3 y SiO_2), los óxidos hidratados de hierro ($\text{FeO}\cdot\text{OH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$) común Limonita, y óxidos hidratados de aluminio ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{OH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$), sales solubles y CO_2 , son contribución a los cambios de pH de los suelos por descompensación de cargas entre aniones y cationes.

Con el tiempo, los residuos químicos se acumulan y reducen la actividad edáfica y microbiana que sustenta toda actividad agrícola. Por otra parte, la acumulación de residuos puede generar toxicidad en plantas y como parte de este proceso, la fauna silvestre también se ve afectada significativamente por efectos de contaminación de fuentes de agua y por escases de alimentos que mantienen su existencia (Gil et al, 2020).

De la misma forma, son contaminados los sistemas acuáticos por el aporte de sustancias contaminantes y por el incremento de actividades antropogénicas en áreas adyacentes que alteran las condiciones naturales. Los residuos químicos permanecen en el ambiente y pueden llegar hasta los espacios más lejanos afectando principalmente a peces y animales silvestres.

La contaminación generada por agroquímicos se debe a los siguientes factores:

- a. Aplicación directa en los cultivos agrícolas.
- b. Derrames accidentales.
- c. Uso inadecuado de los envases y de los propios productos.
- d. Filtraciones en depósitos de almacenamiento.
- e. Limpieza o lavado inadecuado de maquinaria de aplicación y tanques contenedores.
- f. Residuos descargados o vertidos en el suelo. (Gavidia, 2020)

De acuerdo con este mismo autor, son todos los factores los que generan la dispersión en el ambiente. Esto se traduce en potenciales contaminantes bióticos (Animales y plantas) y abióticos (Aire, agua y suelo), poniendo en peligro la salud pública (Gavidia, 2020).

Características de la formulación de pesticidas

Las formulaciones de pesticidas son la combinación de uno o más ingredientes activos (i.a), que controlan las plagas, y varios ingredientes inertes. Muchos no son solubles en agua. Algunos pueden ser tóxicos o peligrosos para manejar. Otros pueden ser inestables durante el almacenamiento y es aquí donde juega un papel importante la formulación estabilizada; entonces los ingredientes inertes se incluyen en un producto formulado para resolver estos problemas. En las formulaciones también se tienen los ingredientes inertes, algunos de ellos presentan riesgos para la salud de las personas que los manipula, por lo que sus características, junto con las del ingrediente activo, determinan la palabra clave que aparece en la etiqueta del producto.

Tiempo de vida útil de los productos pesticidas

Generalizando, y a menos que se estipule lo contrario en la etiqueta, los plaguicidas normalmente tienen una vida útil entre dos y cinco años a partir de la fecha de fabricación. Esto quiere decir que, bajo condiciones de almacenamiento estipuladas por el fabricante, el producto es funcional para el objetivo sobre el cual fue fabricado (OMS, 2017).

Durante este período, el fabricante garantiza la calidad del producto, a condición de que este sea almacenado siguiendo las instrucciones establecidas en la etiqueta. Para que el producto sea estable durante el tiempo de vigencia, así almacenado y/o comercializado, los embalajes deben cumplir con requerimientos que le infiera seguridad bajo las condiciones reguladas (OMS, 2017). A nivel Latinoamérica se adopta el Manual Técnico Andino para el Registro y Control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola a través de la Resolución 2075 de la Comunidad Andina

(2015), que tiene como objetivo establecer los lineamientos y procedimientos armonizados para el registro y control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola (PQUA); orientar su uso y manejo correcto en el marco de las buenas prácticas agrícolas; prevenir y minimizar riesgos a la salud y el ambiente; asegurar la eficacia biológica del producto; y, facilitar su comercio en la subregión (FAO, 2017).

Los productos pesticidas en el mercado deben permanecer estables durante la vigencia que garantiza el fabricante. Dentro de las condiciones para su estabilidad se encuentra el embalaje de origen, el cual para poder contener y transportar plaguicidas se requiere más que un simple envase, este debe cumplir determinados requerimientos para que estos productos que tienen un alto nivel de toxicidad puedan ser contenidos (Greenpeace, 2019).

Materiales utilizados en el envasado de pesticidas

En las formulaciones de los pesticidas se tienen especificaciones de empaques definidas por sus fabricantes. Esto se tiene así establecido de acuerdo con las necesidades de cada producto desarrollado. Para el fabricante de los envases, es vital conocer la molécula del ingrediente activo; así como los componentes dentro de la fórmula, tal como surfactantes, solventes y origen de estos. Por ejemplo, la razón biológica, tal como herbicida e insecticidas.

La gran mayoría de los agroquímicos son envasados en PEAD (polietileno de alta densidad) si la base de su fórmula es solvente agua y si posiblemente contiene un surfactante agresivo, en estos casos para envases de 1L se maneja un gramaje de entre 90g y 115g en la mayoría de los casos, por ser envases genéricos (Zalazar et al, 2021).

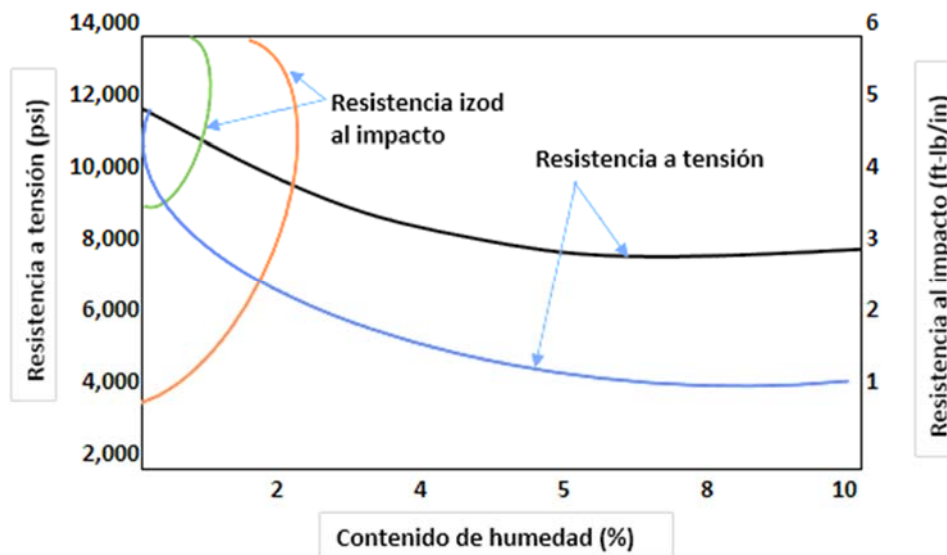
En el caso de plaguicidas formulados con solvente en base agua, pero en suspensión oleosa, es necesario que el contenedor de 1L en PEAD tenga algún tipo de recubrimiento interior que no permita la salida de olores, exposición, ni mucho menos que este producto se posicione

sobre su superficie. En Colombia, los recubrimientos más utilizados corresponden a Nylon (una poliamida) y EVOH (Etileno Vinil Alcohol). Este último tiene la capacidad de minimizar el paso de oxígeno y ofrece una alta resistencia química.

Vale la pena aclarar que el EVOH se usa normalmente acompañado de capas de resinas adhesivas (Poliolefinas químicamente injertadas con anhídrido maléico), para lograr que un material polar como el EVOH se una a poliolefinas no-polares, como es el caso del Polietileno (Zalazar et al, 2021).

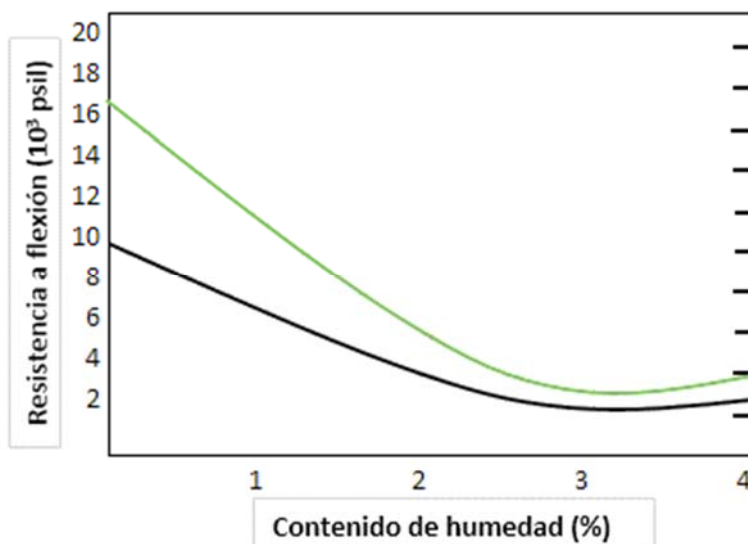
Estos dos tipos de plaguicidas requieren de polímeros sintéticos específicos en sus contenedores, por el tipo de fórmula que maneja cada uno. En el caso del insecticida en fórmula de suspensión oleosa, se utilizan envases fabricados en Poliamida (PA) o EVOH ya que en su fórmula base agua y aceite el requerimiento va encaminado en dos sentidos. En el primero caso, sobre el producto, el cual puede tener degradación de su ingrediente activo por oxidación de este, además de la afectación por degradación; y en el segundo caso, al tener agua dentro de la fórmula, se crea una afectación negativa en el envase, esto se debe a la resistencia mecánica y al hecho de que las poliamidas con una mayor concentración de grupos amino en cadena, tienden a absorber más agua (Zalazar et al, 2021). Esto implica una disminución en las características mecánicas a nivel de tracción debido a que el agua, un dipolo altamente efectivo, que se interpone entre los enlaces de hidrógeno hace que las cadenas se deslicen más y por lo tanto reduce la temperatura de transición vítrea del material. El agua interacciona con la molécula y solventa la poliamida volviendo al envase más flexible, grupos hidroxilo libres derivados del ácido 5-hidoxiisoftálico (5OH), y de la diamina 2,4-diaminofenol (2,4DPH). Los grupos -OH son muy afines con el agua lo que crea reacción interna (Nylon, 2005). En las figuras 4 y 5 se esquematiza este segundo caso.

Figura 4.
Efectos de la humedad sobre resistencia a la tracción del Nylon 66.



Nota. Adaptado de Figura 1 [ilustración], Beatriz Posada, 2012, Revista Universidad EAFIT.

Figura 5.
Efectos de la humedad sobre resistencia a la tracción del nylon 66



Nota. Adaptado de Figura 1 [ilustración], Beatriz Posada, 2012, Revista Universidad EAFIT.

La apreciación de los usuarios de este tipo de productos es que el envase debiera ser muy resistente para contenerlos, y se relaciona resistencia con la cantidad de polímero en las paredes

de los envases siendo más rígidos. Pero es importante tener en cuenta que además de las necesidades del cliente, en el desarrollo de estos envases se requiere conocer las características del producto que va a contener el envase y las reacciones que puedan ocasionar para luego definir el material a utilizar los componentes del envase. Así como la peligrosidad del producto, modo de uso, forma de presentación (polvo, líquido, etc.), transporte, cadena de distribución, etc. Para cumplir con las necesidades de acuerdo con el producto, las compañías fabricantes de estos pesticidas guardan muy celosamente las especificaciones de sus empaques, porque al final estos envases dan respuesta a las características de sus productos (*Impacto ambiental del polietileno*, 2005; Martínez-Romo et al, 2015).

Los fabricantes de pesticidas se aseguran de utilizar un diseño de envase que cumpla pautas o especificación de su producto. De acuerdo con Vidal (2014):

Las pautas de gestión incluyen el diseño de los envases, cuyas características, deben minimizar los riesgos de volcado durante su transporte y almacenamiento, los riesgos de exposición a las personas, los aplicadores y la contaminación ambiental luego de su uso (p. 33).

En este sentido, recomienda ciertas particularidades que deben cumplir los materiales en tema de construcción y el formato de los envases, así como, las posibilidades de disponerlos. Para lo primero se resalta la importancia de conocer de mano de un fabricante de envases la razón por la cual la estructura, en tema de gramaje, de éstos, varia y para ello se realiza entrevista con el Gerente Comercial de la compañía Nardiplast SAS.

Todo se alinea con la necesidad del producto en el lugar geográfico donde es envasado. Cuando el producto es envasado en un lugar costero, es decir a nivel del mar, es diferente que envasarlo en una zona alta de cualquier país. La diferencia de la presión ayuda a decidir el gramaje del envase a utilizar. Recordemos que a mayor altitud menor es la presión atmosférica y

en la mecánica del plástico esto es tenido en cuenta durante el diseño de los envases, pues éste debe tener las paredes tan fuertes para no colapsar durante su traslado entre zonas (Nardei, B., entrevista Nardiplast SAS, 2022).

En el mercado es posible tener envases plásticos desde 70g hasta 125g en la presentación de 1L y es viable bajar su gramaje manteniendo un polietileno de alto peso molecular, utilizando un diseño que ayude en la mecánica del envase, sin poner en riesgo el producto ahí envasado, utilizando ayudas en el proceso tal como es la inyección de nitrógeno gaseoso o líquido, o el uso de membranas de veteo que ayudan a equilibrar la presión interna en el envase luego de su sellado (Nardei, B., entrevista Nardiplast SAS, 2022).

Y con respecto a la disposición, en Colombia, al igual que en todos los países, los embalajes de este tipo de fabricados deben cumplir normativas y regulaciones que den cumplimiento, en un principio, a resguardar los productos del ambiente en el que se encuentren, para ello la Norma Técnica Colombiana 844:2003/ Envases Plásticos para plaguicidas de uso agrícola, establece estos requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los envases plásticos destinados a contener plaguicidas de uso agropecuario. La salud de las personas a su alrededor también debe estar protegida (Norma Técnica Colombiana 844, 2019).

Almacenamiento seguro y transporte de pesticidas

El desarrollo de pesticidas amigables con el medio ambiente para la agricultura sostenible es un enfoque clave en la industria agroquímica. Identificar nuevos ingredientes activos y mejorar el sistema de entrega de un pesticida son los principales desafíos en el desarrollo de nuevos pesticidas. Las estrategias para el control de los sistemas de entrega para la liberación lenta y sostenida de agroquímicos son de gran interés para los científicos ambientales. En este

contexto, la selección de materiales que se utilizarán como agentes portadores en las formulaciones de pesticidas es crucial, lo cual juega un papel muy importante durante la estabilidad de los productos durante su almacenamiento. En los últimos años, los investigadores han evaluado la eficacia de varios materiales para formulaciones agroquímicas. Estos materiales tienen propiedades únicas, como ser biodegradables y biocompatibles, tener baja toxicidad y un proceso de preparación simple. La aplicación de los materiales puede encapsular o unir eficazmente los ingredientes activos del plaguicida en la matriz del material con un perfil de liberación sostenida y movilidad lenta en el suelo (Yusoff et al, 2016)

En Colombia, en el almacenamiento de plaguicidas para comercializar, debe cumplir con el régimen aplicable al uso y manejo de plaguicidas. El uso y manejo de plaguicidas estarán sujetos a las disposiciones contenidas en la Ley 09 de 1979, el Decreto 2811 de 1974, Reglamento Sanitario Internacional, el Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas de la FAO, las demás normas Complementarias previstas en Decreto 1843 de 1991/ por el cual se reglamentan parcialmente los títulos III, V, VI, VII y XI de la ley 09 de 1979, sobre uso y manejo de plaguicidas y las que dicten los Ministerios de Salud y de Agricultura o sus institutos adscritos.

El Decreto 1843 de 1991, en el capítulo VI menciona el almacenamiento de los plaguicidas para empresas que tengan dentro de sus procesos la comercialización o distribución de los plaguicidas, la cual debe obtener Licencia Sanitaria de Funcionamiento expedida por la Dirección Seccional de Salud.

En el Decreto 1843 de 1991, se dictan los lineamientos para poder almacenar este tipo de producto entre ellos: la separación entre almacén y oficinas; separación identificada de los tipos de plaguicidas; medidas en caso de emergencia por incendio o derrames; demarcación de áreas;

cumplimiento de “rotulación y transporte de sustancias peligrosas”; aplicar un sistema que evite contacto directo del producto con el piso y cumplir con las operaciones de aseo indicada en el decreto.

Con respecto al transporte de pesticidas, la forma más segura es en la parte trasera de un camión o camioneta y nunca en el compartimiento de pasajeros del vehículo. Si se trata de un camión este debe tener una cama de madera, con revestimiento impermeable como plástico o un revestimiento de láminas de cartón antes de cargar pesticidas. Se prefieren los lechos no porosos porque se pueden descontaminar fácilmente en caso de un derrame accidental. Se debe asegurar que el camión esté en buenas condiciones de funcionamiento para ayudar a reducir la posibilidad de un accidente (Hygnstrom, J., 2019).

Los productos pesticidas siempre deben estar sujetos dentro del carro de carga en todo su transporte. Finalizado el recorrido de traslado y descargado del vehículo, se debe inspeccionar este nuevamente para verificar si no hubo fuga del producto. Dentro de la revisión bibliográfica se tiene el artículo Safe Transport, Storage and Disposal of Pesticides (EC2507) el cual, a pesar de estar enfocado en aplicaciones dadas en Nebraska, sigue siendo una guía útil para cualquier otro país (Ogg et al, 2019), ya que los pesticidas se transportan en vías públicas, el documento se enfoca en los cuidados que se deben tener durante el traslado de estos productos hasta su destino. Importante cubrir todo el panorama en caso de un accidente, ya que el daño potencial de este tipo de producto es muy grande.

Capítulo 2. Materiales Poliméricos

Definición

Estos materiales tienen como característica principal, y que además los diferencia de los materiales cerámicos y metálicos, que están formados por macromoléculas llamadas polímeros. Estos materiales poliméricos están formados (en su mayor parte) por átomos de elementos no metálicos unidos entre sí por enlaces covalentes y son moléculas gigantes compuestas de unidades repetitivas (Brindis, 2002)

Clasificación

Dependiendo de las condiciones de la reacción de polimerización (temperatura y presión) y del sistema catalítico se pueden obtener cinco diferentes tipos de polietileno: Polietileno de baja densidad (PEBD), Polietileno de alta densidad (PEAD), Polietileno lineal de baja densidad (PELBD), Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM), y Polietileno de ultra baja densidad (PEUBD). De acuerdo con algunos factores a considerar para trabajar coextruidos, tales

como se encuentran la flexibilidad, la resistencia química, la permeabilidad y la ubicación ideal de las capas, por nombrar algunos, así será el tipo de polietileno utilizado. (García, 2008).

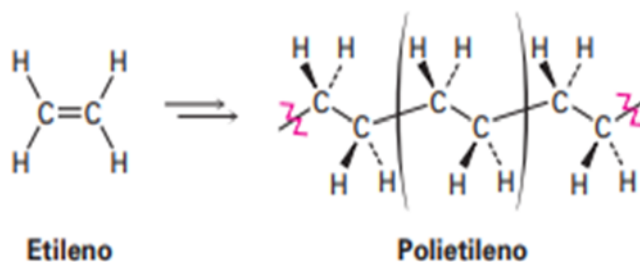
Usos

De acuerdo con el tipo de polímero se elaboran diferentes elementos para uso en la vida diaria. Para el caso puntual del envasado de plaguicidas que cumpla con la función de resguardarlo del entorno, así como proteger a todo quien lo manipula, se tienen diferentes tipos de polímeros en el mercado, siendo el más común el Polietileno de Alta densidad.

Polietileno (PE): El polietileno (ver figuras 6 y 7) es un polímero sintético termoplástico muy sencillo, se denomina termoestable ya que requiere calor para poder moldearlo y luego al enfriarse este material queda con la forma en que fue moldeado. Su estructura es $-(CH_2 - CH_2-)_n$ y conformada por largas cadenas de átomos de Carbono – Carbono (C-C) y Carbono – Hidrógeno (C-H) unidas por enlaces covalentes (σ enlaces) cuya energía de enlace es del orden de 300 a 600 KJ/mol. Esta unidad básica tiene la posibilidad de agregar ramificaciones de cadena corta o larga en la cadena principal para generar estructuras complejas. La síntesis de los diversos tipos de polietileno que se encuentran actualmente en el mercado depende del tipo de catalizador usado en la reacción y condiciones de operación en la que se lleva a cabo la reacción de polimerización (la temperatura y la presión del sistema) (Gomez et al, 2021).

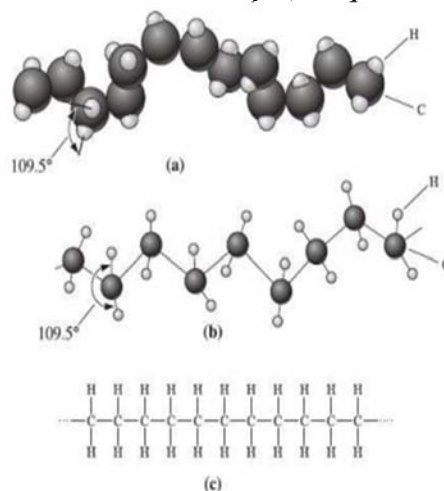
Figura 6.
Fórmula y estructura del polímero polietileno.

Polietileno, un polímero sintético del etileno



Nota. Adaptado de química orgánica [Fotografía], por Mc Murry 2008

Figura 7.
Tres formas de representación de la estructura del polietileno (PE); a) Modelo como sólido tridimensional, b) espaciado tridimensional y c) simple bidimensional

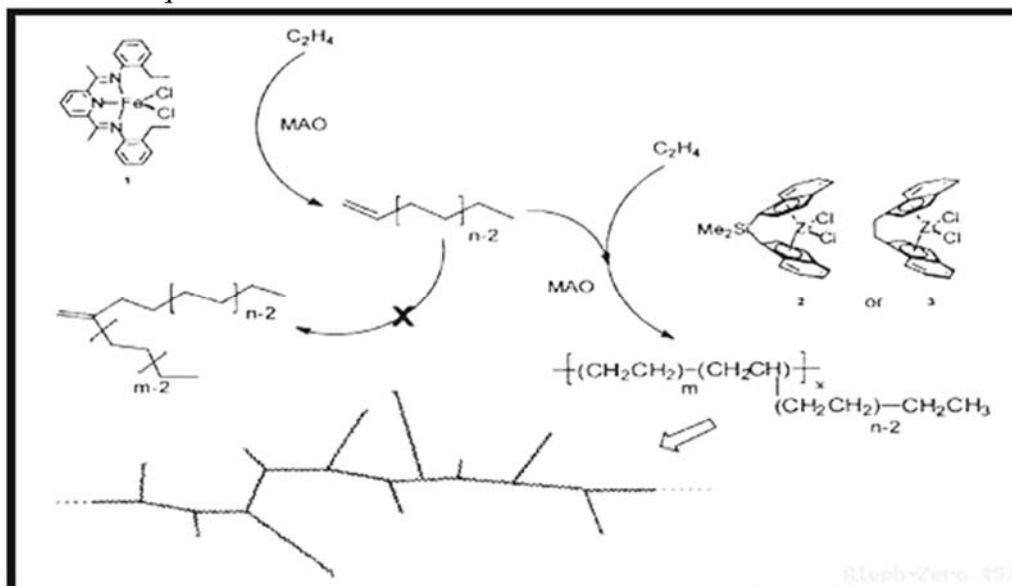


Nota. Adaptado de química orgánica [Fotografía], por Mc Murry 2008

El Polietileno (P.E.) es un material semicristalino, no polar, inodoro, insípido y que se caracteriza por una alta resistencia química a los ácidos y álcalis, aislamiento eléctrico, elevada rigidez, ductilidad, baja permeabilidad al vapor de agua combinada con la facilidad con la que se pueden procesar, hacen que todos los grados de densidad del PE sean una elección atractiva para una diversidad de aplicaciones (Ramírez, 2010).

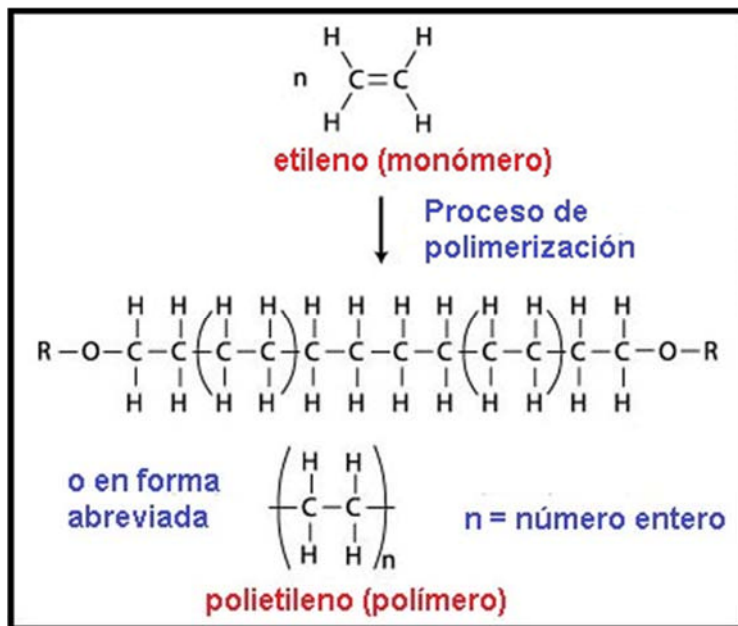
En lo que respecta a los productos pesticidas, importante resaltar los requerimientos especificados para su envasado. Hablamos de polietileno de alta densidad PEAD. Es un polímero estructural lineal. Se realiza su síntesis en condiciones de baja presión utilizando catalizadores Ziegler – Natta (presiones entre 10 a 15 atmosferas y temperaturas en un rango de 20 a 80°C, inclusive a presión atmosférica y temperaturas inferiores de 100°C) o por el proceso de Phillips (usando presiones alrededor de 50 atmosferas y temperaturas inferiores de 100°C). El PEAD que se obtiene con los catalizadores de Ziegler-Natta es más ramificado y por lo tanto posee una mayor densidad debido a la cristalinidad (Martínez et al, 2015). En la figura 8 se visualiza la síntesis del PEAD a partir de metallocenos (catalizadores) y en la figura 9 se esquematiza esta polimerización.

Figura 8.
Síntesis del PE a partir de metallocenos.



Nota. Modificado de Quijada y colaboradores (2001).

Figura 9.
Esquema de polimerización del polietileno.



Nota. Adaptado a partir de monómero de Paul John Flory

La linealidad de las cadenas y en consecuencia la mayor densidad del PEAD (0.941-0,97 g/cm³) provocan una orientación, alineamiento y empaquetamiento de las cadenas sean más eficientes; las fuerzas intermoleculares (van der Waals) actúan con mayor intensidad y en consecuencia posee una mayor cristalinidad que el PEBD (70 % a 80 %) y se puede encontrar en tonalidades transparentes y opacas (Martínez et al, 2015)

En general el PEAD exhibe una baja reactividad química y en general, esta resistencia mejora con el aumento de la densidad y el peso molecular. Las regiones más reactivas del PEAD son los enlaces dobles al final de la cadena y los enlaces C-H. Es estable en soluciones alcalinas de cualquier concentración y en soluciones salinas, independientemente del pH, incluyendo agentes oxidantes como $KMnO_4$ y $K_2Cr_2O_7$. No reacciona con ácidos orgánicos, HCl o HF,

soluciones concentradas de H_2SO_4 (>70%), a altas temperaturas reaccionan lentamente con PEAD, produciendo sulfoderivados (Martínez et al, 2015)

A temperatura ambiente el PEAD no es soluble en ningún solvente conocido, aunque varios disolventes como el xileno, por ejemplo, provocan un efecto de hinchazón del material. El PEAD se disuelve a altas temperaturas en algunos hidrocarburos alifáticos y aromáticos. El PEAD es relativamente resistente al calor. Procesos químicos a alta temperatura, en medio inerte o en vacío, dan como resultado la rotura y reticulación de las cadenas de polímero. A bajas temperaturas, puede ocurrir degradación foto oxidativa (especialmente con luz de $\lambda < 400 \text{ nm}$), es ligeramente permeable a los compuestos orgánicos, tanto en fase líquida como gaseosa. La permeabilidad al agua y gases inorgánicos es baja. Es menos permeable a los gases (CO_2 , O_2 , N_2) que el PEBD (Martínez et al, 2015)

Mediante el proceso de inyección, el PEAD se utiliza para la fabricación de cubos y palanganas, bandejas de pintura, bañeras para niños, juguete, goteros, jarras de agua, ollas de comida, asientos de inodoro, bandejas, tapas de botellas, boyas para carriles de piscina, tanques de agua entre otros. Mientras que el proceso de soplado se destaca por la fabricación de tambores, tanques y bidones de 60 a 250 litros, donde se requiere mayor resistencia, apilamiento y productos químicos. Botellas y bidones de 1 a 60 litros, donde se envasan productos que requieran alta resistencia al agrietamiento bajo tensión (McMurry, 2008; Méndez, 2018; Roca, 2005).

También se utiliza el PEAD en la fabricación de botellas que requieren resistencia al agrietamiento por estrés ambiental o química, tales como envases para detergentes, cosméticos y pesticidas agrícolas, tanques para líquidos de frenos y otros utilizados en vehículos y en fabricación de piezas donde se requiere un producto no tóxico, como juguetes (McMurry, 2008)

Méndez, 2018; Roca, 2005). En primera instancia es importante entender el concepto de degradación química, término que hace referencia al cambio de la estructura que deteriore las propiedades que ocurre después de que el material ha sido puesto en servicio. La degradación puede ser térmica, mecánica, fotoquímica y química, en consecuencia, producen cambios en las propiedades físicas, y se presenta como un deterioro total del material (Gómez et al, 2018)

La degradación del polímero “polietileno” genera una escisión de cadena por el rompimiento de enlaces entre los monómeros de la cadena principal del polímero. En consecuencia, se produce una reducción de las cadenas poliméricas (Barbosa et al, 2019).

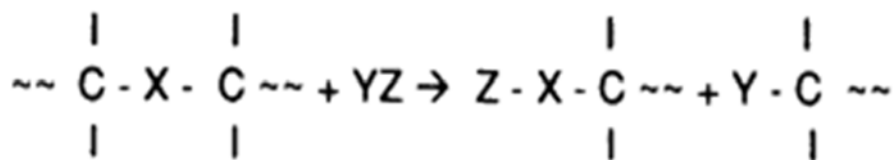
Entre los cambios físicos, están la decoloración, pérdida de brillo superficial, formación de grietas, superficies untuosas, erosión superficial y pérdidas de importantes propiedades como resistencia a la tracción, deformación, tensión, tenacidad, elasticidad, entre otras (Ramos, 2019).

Por otra parte, entre los cambios químicos sufridos a causa del envejecimiento están: el rompimiento de cadenas, cambios en los sustituyentes laterales, reacciones de entrecruzamiento (Malpass, 2010).

La solvólisis y la estabilidad frente a los solventes, la reacción de solvólisis tiene que ver con la ruptura de los enlaces C-X, donde X designa átomos diferentes al carbono que son generalmente: O, N, P, S, Si o halógenos, cuando estos se encuentran en la cadena principal, porque en estos casos ocurre la ruptura de la cadena principal (Posada, 1994).

Los agentes comunes de la solvólisis (YZ) son el agua, alcoholes, amoníaco, hidrazina, etc. Interesan las reacciones que ocurren cuando los envases plásticos se ponen en contacto con ciertas sustancias químicas que pueden llevar al desgaste del material (ver figura 10).

Figura 10.
Agentes comunes de la solvólisis.



Nota. Adaptado de La degradación de los plásticos [Fotografía], por Beatriz Posada, 2018

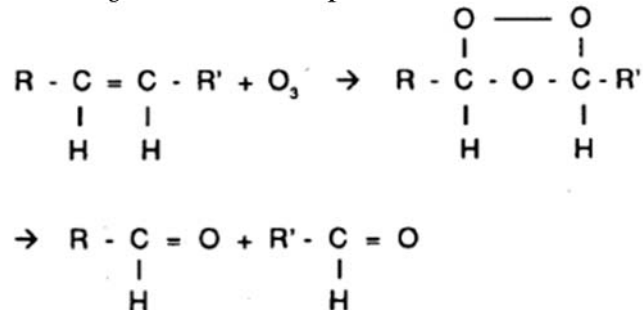
Degradación oxidativa: Esta reacción se produce por sustancias químicas oxidantes (entre las más usuales el oxígeno y el ozono de la atmósfera). Esta consiste en el ataque de oxígeno activo sobre el polímero (reacción orgánica de oxidación-reducción), donde el oxígeno origina radicales libres en las cadenas poliméricas, que pueden dar todo tipo de reacciones secundarias degradativas (Bustamante, 2020).

En su primera etapa, el oxígeno se centra en los carbonos susceptibles que están en la cadena y se forma un peróxido que después se descompone en acetona o aldehído. Para que pueda ocurrir esta reacción debe existir un mecanismo que inicie la producción de radicales libres, como la luz ultravioleta, tensiones mecánicas o la acción de la electricidad (Coutinho, 2003)

Los procesos de fotooxidación en los que intervienen el oxígeno del aire y las radiaciones solares son las principales causas del deterioro, produciendo una pérdida de flexibilidad debido a reacciones de reticulación originadas por la oxigenada e iniciadas por la luz solar (ver figura 11).

Figura 11.

Oxidación, tomado de la degradación de los plásticos.



Nota. Adaptado de La degradación de los plásticos [Fotografía], por Beatriz P. Bustamante, 2018.

Oxidación por efecto de gases contaminantes. En el ambiente las sustancias que más producen degradación en los polímeros son contaminantes del aire, como el dióxido de nitrógeno (NO₂), el dióxido de azufre (SO₂) y el ozono (O₃) y como antes se ha mencionado, su ataque es incrementado por la radiación ultravioleta (Posada, 2018).

El aire y la luz no son elementos necesarios para que haya degradación, algunos experimentos han reportado que después de someter a varios polímeros de dióxido de azufre (SO₂) o al dióxido de nitrógeno (NO₂) en condiciones de oscuridad a temperaturas de 25°C a 35°C, se encontró que eran pocos reactivos en polímeros saturados como el polietileno (Barbosa et al, 2019)

Hidrólisis. Este tipo de reacción es causado por la acción conjunta del agua y ácidos o bases fuertes, mediante la introducción de grupos funcionales hidrolizables en la cadena principal del polímero, las cadenas de este se vuelven más susceptibles en medios acuosos. Esta reacción toma lugar cuando los polímeros contienen grupos hidrolizables como: ésteres, amidas, carbonatos y uretanos, además estos grupos funcionales están expuesto a la humedad. En general los materiales insolubles son atacados lentamente por el agua, en esos casos la reacción está

restringida a la superficie y la habilidad del polímero para absorber agua, juega un papel muy importante. (Gómez, L. 2019)

Las reacciones de hidrólisis solo se producen si están catalizadas por ácidos y bases fuertes (Gómez, 2018)

Algunos factores que influyen en la velocidad de degradación hidrocatalítica de los polímeros son los siguientes, (Cuenca, 2015):

- Naturaleza de los grupos funcionales.
- Absorción de agua.
- Factores fisicoquímicos (efecto del pH).
- Cristalinidad y peso molecular.
- Efecto de la composición de los copolímeros

Los efectos del envejecimiento y degradación pueden evaluarse mediante los siguientes criterios:

a. Cambios en la estructura, debido a la degradación oxidativa en la que se generan dobles enlaces conjugados, grupos carbonilos y grupos hidroxilos, los cuales se pueden detectar mediante espectroscopía IR.

b. Cambios en la superficie debido a que las degradaciones tienen lugar en la superficie del material donde los efectos son máximos.

c. Pérdidas de las propiedades mecánicas.

d. Reducción en el peso molecular debido a la escisión de cadenas o por el incremento de entrecruzamientos.

e. Generación de radicales libres.

f. Toxicidad en los productos formados debido a la degradación térmica, pirolisis o combustión.

g. Pérdidas de aditivos y plastificantes.

h. Deterioro de la transparencia.

Biodegradación. La biodegradación se define como la asimilación de los polímeros por los organismos vivos (principalmente hongos y bacterias), también se puede extender a la asimilación por insectos, roedores y otros animales, incluidos los seres humanos (Askeland D, 2010).

A pesar de que los polímeros pueden ser atacados por algunos microorganismos en condiciones apropiadas, el uso de fungicidas y otros tipos de biosidas hacen a los plásticos biorresistente, en consecuencia, el plástico no se degrada fácilmente y persiste durante tiempo prolongado en el suelo y cuerpos de agua bajo la formación de residuos más pequeños denominados micros plásticos, los cuales se fragmentan a causa de la radiación UV y las elevadas temperaturas (Roca, 2005).

Los ensayos de biodegradabilidad se estudian determinando: la producción de CO₂, el consumo de oxígeno, la pérdida de peso, el aumento de las células o de la masa de las células (si el polímero es la única fuente de carbono), y el examen físico de la muestra para detectar evidencias del crecimiento de la colonia y la destrucción de la muestra

Los productos plásticos de alta calidad y alto valor requieren materias primas y específicas, por lo que es muy importante que los diferentes tipos de plásticos (bolsas, bidones, botellas) se mantengan separados. Debido a que las temperaturas de fusión de los materiales plásticos son relativamente bajas, pueden ser insuficientes para destruir o expulsar algunos componentes activos de los pesticidas (Coutinho, I. 2003).

Los recipientes plásticos pueden presentar fallas prematuras y esto puede deberse a varios orígenes, las siguientes:

- Desde la exposición inadecuada de rayos UV.
- Niveles insuficientes antioxidantes para el tiempo de servicio
- Dispersión deficiente de los aditivos.
- Tratamiento con pesticidas muy agresivos
- Condiciones extremas.

La fotodescomposición de muchos químicos agrícolas pueden generar ácidos, como es el caso de la sublimación de azufre que genera ácido sulfónico más sulfuros, por lo tanto, la combinación de aminos más pesticidas genera problemas de degradación en el polímero (De la Cruz, N. 2012).

Capítulo 3. La Huella de Carbono

La huella de carbono hace referencia a la cantidad de gases de efecto invernadero o GEI que emite directa o indirectamente un individuo, evento, producto o proceso debido a su actividad o síntesis (Organización Internacional de Estandarización ISO 14067:2018). Alineados con esta normativa, se trata de un indicador ambiental clave, que refleja los gases producidos por alguna acción de un individuo o empresa. Estos gases se acumulan en la atmósfera y son los que producen el efecto invernadero. En la normativa se explica que esto se refiere al impacto que deja la actividad humana sobre el medio ambiente. Es decir, la marca ambiental que genera una persona, producto u organización sobre el planeta debido a sus acciones diarias, totalizadas según parámetros de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) liberadas a la atmósfera.

Dentro de la literatura revisada se detecta que hablar de huella de carbono es un término difícil de manejar por su cuantificación ya que es tratar la cantidad de emisiones de GEI dentro del ciclo de vida de una actividad o producto. Así como fue tratado en el documento “A Descriptive Review of Carbon Footprint”; el cálculo de la huella de carbono se puede hacer cuando medimos las emisiones de CO₂ correspondientes a las liberadas de su entorno, generación y disposición de residuos, obras de construcción y muchos más (Durojaye et al, 2019). Adicionalmente, se plantea que es un método utilizado para identificar y medir cada actividad de emisión de GEI que se encuentra en un proceso de cadena. La expresión huellas de carbono también cubre el marco para atribuir cualquiera de estas actividades a cada producto (Garbounis et al, 2022).

La huella de carbono se expresa en unidades de carbono equivalente (CO₂ eq). Una unidad que además del CO₂ toma en cuenta los otros Gases de Efecto Invernadero (vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃)) que contribuyen al calentamiento global. Finalmente, los resultados individuales de cada gas se convierten a equivalentes de CO₂ (Dormer et al, 2013; Durojaye et al, 2019; Garbounis et al, 2022; Lo-Iacono-Ferreira, 2021).

La huella de carbono se encuentra relacionada con uno de los objetivos establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. El objetivo 13 (Acción por el clima) de este plan mundial busca “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Entre las metas de este objetivo se encuentra que es necesario incluir medidas relacionadas al cambio climático dentro de las políticas, estrategias y los planes nacionales”.

Importante conocer brevemente lo que es la huella ecológica y su relación con la huella de carbono, esto por el paso del hombre sobre el planeta. Esta mide la cantidad de agua y tierra biológicamente productiva necesaria para producir los recursos que un individuo o población requieren para su consumo y para absorber sus residuos, utilizando la tecnología existente y prácticas de gestión de recursos (Wackernagel, 2014). Esto deja a deslumbramiento el alcance y el tipo de demanda que la humanidad está imponiendo en dichos sistemas. Así como “el alcance total de las emisiones directas e indirectas de CO₂ resultantes de diversas actividades comerciales” (Torres, 2020).

El cálculo o determinación de la huella de carbono tiene dos vías, una se va de abajo hacia arriba y la otra de arriba hacia abajo. El primer enfoque es un análisis de procesos, conocido como PA (siglas en inglés) y para este caso se trabaja en el análisis de los impactos ambientales del producto en todo su ciclo de vida, es decir desde su cuna hasta su tumba. Y en

un segundo enfoque se habla de entrada/salida ambiental, siglas EIO o de investigación ambiental, esto corresponde con la vinculación insumo-producto, así tanto las tablas de entrada como las de salida son cuentas económicas que dan una imagen de cada actividad a nivel sectorial. Esto puede utilizarse para establecer estimaciones de la huella de carbono de manera completa y vigorosa. También se utilizan para establecer todos los impactos de orden superior, incluido el establecimiento de todo el sistema económico como límite (Espíndola y Valderrama, 2012). Ahora, con respecto a la fabricación de plásticos, en los últimos años se trabaja para reducir el impacto medioambiental de sus productos, que a menudo son artículos de un solo uso. La influencia del plástico en el mercado de los envases y dentro del flujo de residuos resultante dentro de su ciclo de vida, ha llevado a la necesidad de garantizar que su producción, uso y eliminación se gestionen de manera eficiente y sostenible (Dormer, 2013).

Según la revisión literaria relacionada con plásticos y la huella del carbono, el aporte de envases de materiales como PET (Tereftalato de polietileno) y PP (Polipropileno) en su ciclo de vida, desde la cuna hasta la tumba, a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se halla relacionado con el uso de material 100% virgen o reciclado. Estos estudios se hallan soportados por investigaciones relacionadas con cada parte del proceso de fabricación de estos materiales. En ello se cuenta desde la etapa de la materia prima, fabricación, embalaje secundario, transporte y fin de vida y se calcula cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos en su ciclo de vida (Dormer et al, 2013; Durojaye et al, 2019; Garbounis et al, 2022; Lo-Iacono-Ferreira, 2021).

Es una realidad que el manejo de los envases plásticos utilizados como reservorio de los productos plaguicidas luego de vaciar el producto se convierten en desecho y las acciones tomadas desde los principios han sido diversas, entre las más comunes: enterrar los envases, reutilizar en utensilios de hogares y quemarlos entre otros. Estudios sobre el ciclo de vida de

estos envases han sido llevados a cabo verificando la concentración de varios ingredientes activos luego de su lavado con el objetivo de poder determinar su condición final, así para tomar decisiones sobre estos. En relación a la referencia bibliográfica, en el artículo “A Life Cycle Analysis to Optimally Manage Wasted Plastic Pesticide Containers- 2022” Garbounis et al (2022), trabajan una investigación analítica determinando por medio de prueba de laboratorio la concentración de producto en diferentes escenarios. Así dar respuesta al ciclo de vida final del envase que puede ser tratado dentro de otros productos en su disposición final.

Con el avance de la tecnología en los últimos años se ha orientado en la búsqueda de la conservación del planeta y estas apuntan a lograr que la fabricación de envases para productos agroquímicos (pesticidas) tengan menor impacto ambiental (Greenpeace, 2019). La base para el cálculo de la huella de carbono, a manera de acercar el criterio consiste en la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\text{Huella Carbono} = \text{Dato actividad (consumo)} \times \text{Factor de emisión}$$

Donde el dato de actividad es el parámetro que define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.)

Factor de emisión: El factor de emisión (FE) supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad”. Estos factores varían en función de la actividad que se trate. (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.)

Con respecto al cálculo del HDPE relevante para esta investigación, el Factor de emisión corresponde a 3,16 kg CO₂ eq/kg. Esto puede ser calculado desde la fabricación del plástico como desde la cantidad de botellas consumidas en un producto. Como resultado obtendremos

una cantidad de Dióxido de Carbono equivalente, dada en gramos, kilogramos, toneladas, etc (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f. y Plastics Europe, software Sphera 2005).

Cabe anotar que los GEI son los ya mencionados en el presente trabajo más los registrados en el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) como máximos responsables del efecto invernadero y como contribuyentes, en total estos son: el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido de nitrógeno (N_2O), los hidrofluorocarbonos (HFCs), los perfluorocarbonos (PFCs), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y, desde la COP 18 celebrada en Doha a finales de 2012, el trifluoruro de nitrógeno (NF_3); sin embargo, el CO_2 es el GEI que influye en mayor medida al calentamiento del planeta, y es por ello que las emisiones de GEI se miden en función de este gas. La cantidad en ton de CO_2 eq es la unidad universal de medida que indica el potencial de calentamiento atmosférico o potencial de calentamiento global (PCG) de estos GEI, expresado en términos del PCG de una unidad de CO_2 . (Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.).

Capítulo 4. Disposición de envases

Métodos para descontaminar los envases

El método utilizado para la descontaminación de los envases que ha contenido pesticidas es el llamado triple lavado (ver figura 12). La técnica del triple lavado es la primera actividad para dar una correcta disposición a los envases vacíos de agroquímicos, esto es efectuado por los técnicos y usuarios de estos productos, ya sea agricultores, controladores de plagas urbanas o fumigadores (Campo Limpio, s.f.).

Esta técnica es una acción clave del programa Campo Limpio, y es avalado a nivel internacional. Consiste en realizar un triple lavado a los envases y tiene como beneficio principal garantizar el aprovechamiento del 100% del producto, prevenir la contaminación del suelo y agua, asegura un manejo adecuado de los envases vacíos de agroquímicos y afines, y promueve la valorización de los envases (Campo Limpio, s.f.).

Figura 12.
Cómo se debe realizar la técnica de triple lavado.



Nota. Adaptado de Campo Limpio [ilustración], por Campo Limpio, 2017

El triple lavado efectivo es una de las técnicas aplicadas en muchos sitios; a nivel Latam se encuentra en 18 países de la región, tales como Argentina, Ecuador, Bolivia, Colombia, Brasil, Chile, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Uruguay, Republica Dominicana, y Venezuela. Se trata del enjuague con agua de los recipientes. En Nebraska, por ejemplo, les es útil para reutilizar. Con esta técnica se genera

ahorro monetario, además protección al medioambiente y cumple las regulaciones federales por uso de pesticidas (Schulze, 1993).

La misma técnica es utilizada con agua a presión haciendo perforación en el envase hasta retirarle todo el producto residual interno. En este caso estos envases son dados en disposición final. Así igual el almacenamiento de estos envases es controlado previendo que sean tomados, siendo claro que su reutilización no puede ser dada en productos de uso hogar, así como las herramientas utilizadas en su destrucción (Schulze, 1993)

Sobre el recolección y disposición de los envases vacíos, los sitios donde son utilizados los pesticidas tienen un área dispuesta para el almacenamiento y de ahí se parte a la entrega para su disposición de acuerdo con la mejor opción tomada (Schulze, 1993).

Posible tratamiento para su disposición final y/o reciclado

Los envases que han almacenado un producto fitosanitario, como herbicidas, hacen parte de los llamados residuos peligrosos por tener contacto con el pesticida, dentro del proceso de uso se tiene retirar los residuos antes de darles disposición final. Es un material que ha tenido una contaminación química y queda limitado para volver ser utilizado con otra molécula ya que puede ser causante de afectación por fitotoxicidad con un nuevo producto. Estos envases no pueden ser utilizados para contener alimentos ya que pueden generar una afectación en humanos y animales (La Rioja, s.f.).

Siendo estos envases residuo o desecho peligroso, luego de su uso, las compañías que fabrican los agroquímicos tienen el deber de trabajar de la mano con el consumidor para que los envases sean entregados en recolectores autorizados. Los empaques en general son llevados a instalaciones acondicionadas para su posterior disposición. En Colombia este procedimiento está

regulado por la Resolución 1675 del 2 de diciembre de 2013, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en donde se establecen los elementos que deben contener los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Plaguicidas, siguiendo los lineamientos de la normativa nacional y basándose en la Responsabilidad Extendida del Productor – REP (Minambiente, 2013).

Hablando de quienes hacen la labor de recolección de envases y el debido tratamiento para mantener un ambiente sano para todos en nuestro país, nace Campo Limpio. En Colombia, este programa se dedica a implementar en todo el país un sistema de gestión integral de recolección de envases vacíos de uso fitosanitarios para el tratamiento y reciclado del plástico recuperado. Surge a través de una iniciativa privada, concretamente de las empresas que comercializan productos fitosanitarios (Campo Limpio, s.f.).

Campo Limpio es una iniciativa de responsabilidad con el ambiente y los usuarios de plaguicidas de las empresas que fabrican plaguicidas. Nació en el seno de Croplife hace más de 18 años y está presente en más de 30 países del mundo. Latinoamérica es la región del mundo con mayor desarrollo del programa de manejo de envases, siendo Brasil el líder mundial en esta iniciativa. En Colombia está presente desde 1998 como una iniciativa voluntaria de 20 empresas de agroquímicos afiliadas a la Cámara Procultivos de la ANDI (Campo limpio, 2017)

En el año 2008 nació la Corporación Campo Limpio como una entidad sin ánimo de lucro, fundada por las mismas empresas de la Cámara Procultivos. Campo Limpio promociona y efectúa la recolección de los envases vacíos y ya dispuestos en el sitio de acopio, luego de estar completamente vacíos, lavados (aplicación del triple lavado por parte de los usuarios), e inutilizados, se efectúan los tratamientos para recuperar de forma energética aquello que por reciclaje no puede ser justificado (Campolimpio, 2017).

Otras técnicas aplicadas

La recolección de plástico resultante de los embalajes de plaguicidas dentro del plan posconsumo de Campo Limpio, como propuesta integral para el aprovechamiento de este, es gestionar con empresas como Reambiencol SASESP, la fabricación de madera plástica con el material fundido de los residuos plásticos para uso en postes de separación entre terrenos (Ochoa, 2017).

En ese sentido Campo Limpio entrega lavados los envases a Reambiencol y este los transforma en postes fabricados de madera plástica por medio del proceso de reciclaje de polímeros lo cual está compuesto por la operación de 3 máquinas: trituradora, peletizadora y extrusora (Campo Limpio, 2017; Melengue y Piñeros, 2021).

Esta es una forma de aprovechar el residuo peligroso en lo que son convertidos los envases luego de ser utilizados como reservorio de pesticidas. Existen tres alternativas de tratamiento para los plásticos: el reciclado mecánico, el reciclado químico y la recuperación energética (Twenergy, 2019).

Reciclado mecánico. Consiste en tratamiento de residuos plásticos aplicando temperatura y presión para buscar darles formas nuevamente a la inicial o un nuevo moldeado. Esto solo es posible para termoplásticos homogéneos y libres de materiales extraños y contaminación (González Sánchez y col., 1999), lo cual no es viable cuando hablamos de reservorios de pesticidas.

Reciclado químico. Consiste en la descomposición de los residuos plásticos por medio de un proceso químico, en los componentes más sencillos como los monómeros, gas de síntesis o hidrocarburos. Puede ser un complemento al reciclado mecánico (Vargas, 1994).

Recuperación energética. Es un proceso que utiliza los residuos como combustible para generar energía eléctrica y calefacción a través de la combustión con tecnología limpia, que filtra los gases cumpliendo las normas ambientales de emisiones gaseosas. Estos residuos plásticos son utilizados como combustible alternativo en centrales térmicas y las plantas cementeras. La utilización de residuos plásticos como sustituto parcial del carbón puede incrementar el poder calorífico del alimento combustible y disminuir la emisión de dióxido de carbono, metales pesados, dióxido de azufre y cenizas, lo que implica un menor impacto ambiental (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2018).

Centrales térmicas: En los países desarrollados en el plan de aprovechar en vez de utilizar estos envases como relleno sanitario o que sigan contaminando los campos y los mares, basado en que estos polímeros tienen como ingrediente principal el petróleo, la recuperación va enfocada al poder calorífico del este, tabla 2; y aquí hablamos de generar la oportunidad de aprovechamiento y descontaminación del medio ambiente (Gil et al, 2020)

Tabla 2.
Poder calorífico guía ambiental 2004.

Poder calorífico de algunos materiales plásticos	
Residuo	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
Residuo de cocina y de jardín	2000
Lodo seco de tratamiento de agua	2353
Papel de revistas	2900
Cartón	3750
Papel periódico	4000
Textiles orgánicos naturales	4000
Policloruro de Vinilo (P.V.C.)	4500
Llantas usadas	6500
Fibras sintéticas	8300

Engrasantes, aceites y gasas	9000
Polietileno (PE)	11000
Poliestireno (PS)	11000

Nota. Adaptado de guías ambientales sector plástico [Fotografía], por red de justicia ambiental

Colombia 2004

Este último procedimiento se aplica en países desarrollados, como se ha mencionado antes. La conversión de energía a partir del uso de residuos plásticos (valorización energética), ha sido considerada como una alternativa, debido a que son derivados de una fuente petroquímica, la cual posee un alto poder calorífico. El proceso más utilizado es la pirólisis o termólisis en la cual se tiene descomposición química, ya sea de materia orgánica o todo tipo de materiales, excepto los metales y vidrios, causada por el calentamiento a temperaturas altas en ausencia de oxígeno, lo cual involucra la ruptura de enlaces mediante el efecto del calor produciendo moléculas más pequeñas de cadenas carbonadas. El proceso de pirolisis está comprendido generalmente entre temperaturas de 300 °C a 800 °C, obteniendo productos líquidos, sólidos y gaseosos aprovechables (Qureshi et al, 2020).

La pirólisis de desechos plásticos podría tener un papel importante en la conversión de estos desechos en hidrocarburos económicamente valiosos, que pueden usarse como combustibles o como materia prima en la industria petroquímica. El rendimiento y las propiedades del producto final dependen de la composición de los residuos plásticos. Para el caso puntual, la presencia de PEAD (polietileno de alta densidad) aumenta el contenido de alcanos (Gaurh y Pramanik, 2012).

También, de acuerdo al proceso se puede generar tanto aceites como gases, lo cual puede ser conveniente para obtener petroquímicos y a su vez generar energía a partir de residuos sólidos (Kiran et al, 2000, p.1).

Existen dos (2) tipos de pirólisis: craqueo térmico y craqueo catalítico.

Craqueo Térmico. Es el proceso en cual los hidrocarburos tal como crudos aceitosos son sometidos a fuego alto y temperatura para romper los enlaces y el peso moleculares de la sustancia siendo agrietado. Este proceso se usa como extracción de componentes utilizables conocidos como fracción, que se liberan durante el proceso de craqueo (Gaurh y Pramanik, 2012).

Craqueo Catalítico. Varios investigadores han llevado a cabo una serie de estudios experimentales con el objetivo de mejorar el rendimiento de la gasolina a partir de la pirólisis de plásticos mediante la introducción de catalizadores. Los plásticos comunes como PE y PP ya han sido probados extensamente; los catalizadores ensayados son principalmente los utilizados en la industria petroquímica de refinería. La configuración experimental de laboratorio en estos estudios es principalmente reactores de flujo; puede ser útil distinguir entre dos modos de uso del catalizador: “contacto de fase líquida” (Catalizador con el plástico) y “contacto de fase de vapor” (Catalizador con los gases generados) (Solis et al, 2020).

En el "contacto de fase líquida", el catalizador se pone en contacto con plástico fundido y actúa principalmente en los oligómeros parcialmente degradados de las cadenas poliméricas; en “contacto de fase de vapor”, el polímero se degrada térmicamente en vapores de hidrocarburos que luego entra en contacto con el catalizador (Vega y Churo, 2019).

Los desechos plásticos pueden convertirse en hidrocarburos del tipo de la gasolina mediante el proceso de pirólisis. Los productos del craqueo térmico son principalmente parafinas, olefinas y productos de hidrocarburos de punto de ebullición más alto (número de carbono: 24) (Gaurh y Pramanik, 2012).

Ahora, es importante conocer el tipo de plástico que pasará al tratamiento (ver figura 13). El tipo de plástico dentro de un gran número a tratar es identificado por el sistema globalmente manejado y desarrollado en 1988 por la Sociedad de la industria de Plásticos (SPI), con el objetivo de identificar y separar los plásticos, luego de su posconsumo, de acuerdo con el contenido de resina que tienen (Tecnología de los plásticos, 2011).

Figura 13.
Código de identificación de resinas del Plástico.

Símbolo	Tipo de Plástico	Propiedades	Usos Comunes
 PET	PET PolietilenoTereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)
 HDPE	HDPE Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
 PVC	PVC Policloruro de vinilo (Plasticised Polyvinyl Chloride PVC-P)	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj
 LDPE	LDPE Polietileno de baja densidad (Low density Polyethylene)	Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
 PP	PP Polipropileno (Polypropylene)	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, translucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empaçar, envases para uso veterinario y farmacéutico.
 PS	PS Poliestireno (Polystyrene)	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
 PS-E	PS-E Poliestireno Expandido (Expanded Polystyrene)	Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas	Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil
 OTHER	OTHER Otros (SAN, ABS, PC, Nylon)	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.	Auto partes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.

Nota. Adaptado de Identificación de los plásticos por sus códigos [Fotografía], por AM Group 2008.

De acuerdo con la investigación bibliográfica efectuada, ya teniendo en conocimiento el tipo de plástico de aquel pool de envases, es más fácil identificar qué tipo de pirólisis aplicar, así como el tipo de catalizador y su lecho fluidizado o soporte dentro del reactor que será manejado. Esto enfocando la investigación bibliográfica sobre el uso del Polietileno de Alta Densidad (PEAD, en inglés HDPE). Este tiene una densidad de 0,940 – 0,970 g/ml, es lineal y presenta pocas ramificaciones, la temperatura en la que el PEAD se funde es de 130°C y su resistencia a la tracción es alta debido a la distribución y constitución de su estructura (Aracil, 2008; Gil, 2020)

En los países en camino de desarrollo, es en hornos cementeros donde se efectúa el proceso de descomposición de materiales peligrosos, como es el caso de los envases utilizados en pesticidas de uso agrícolas. En el proceso de calcinación en el horno con inclinado, se introducen los envases lavados (sin residuos de producto). La descomposición en el coprocesador de estos residuos ocurre en la combustión del quemador hacia los 1200°C con picos de temperatura de los gases hasta 2000°C con desprendimiento de PCDD/PCDFs (dibenzodioxinas policloradas / dibenzofuranos policlorados). Estos dos gases corresponden a un grupo de compuestos orgánicos polihalogenados entre los contaminantes ambientales con variedad de efectos perjudiciales (Helge, 2008).

Para el año 2004 centro de la Convención de Estocolmo, el tema de Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs) tuvo como objetivos prevenir y minimizar en lo posible la formación y emisión accidental de POPs tales como los gases mencionados, adicional los bifenilos policlorados (PCBs) y el hexaclorobenzeno (HCB), todos presentes en la descomposición de los plásticos (Karstensen, 2009).

Para el control de las emisiones de PCDD/PCDFs es inspeccionada la carga de material orgánico evitando introducir una alta concentración de materiales orgánicos como parte de la mezcla de materias primas y los gases de combustión se deben enfriar rápidamente en hornos de cemento largos, tanto de vía seca como de vía húmeda sin precalcinador (Helge, 2008).

La valorización de residuos peligrosos, como es el caso del plástico utilizado en el embalaje de pesticidas, así como la transformación de un residuo en un recurso, para ser integrado a otro proceso (Kiran. N, et al, 2000) toma importancia como una excelente alternativa.

Conclusiones

Dentro de la presente investigación documental se analiza la problemática del uso de envases plásticos de productos agrícolas; y como posible solución, la disminución de plásticos para la producción de estos envases de uso en agroquímicos, reduciendo el impacto ambiental a los que estos dan lugar, como lo es su proceso de producción y disposición final.

Es importante tener en cuenta el tipo de material polimérico utilizado para el empaqueo de agroquímicos, dado que de ello depende la disposición final del mismo. La gran mayoría utiliza Polietileno de Alta densidad (PEAD), y cuando es necesario se utilizan recubrimientos internos como es el caso de la Poliamida (PA) o en Etilen-Vinil-Alcohol (EVOH o EVAL), de acuerdo con el tipo de producto a ser contenido. A nivel mundial, la cifra para el año 2020 en consumo de plástico para la agricultura fue alrededor de 6.5 millones de toneladas de plástico; lo cual evidencia la contribución negativa al impacto ambiental y a la huella del carbono.

La importancia de disminuir la cantidad de polietileno de estos envases, es una alternativa, dado que las propiedades mecánicas y su composición llevan a ser inalterables a lo largo del tiempo, alcanzando periodos de degradación aproximadamente de 100 a 200 años; lo cual es indicio que la disminución en la cantidad de materia prima puede mantener un material apto para el uso que se le ha venido dando.

El plástico genera gran preocupación por la contaminación visual, por la presencia de componentes altamente carcinógenos, contaminación de la biodiversidad marina, así como en todos los distintos recursos naturales del planeta. Además, por su contribución a la producción de gases de efecto invernadero (GEI). Como ha sido revisado en el presente trabajo, el plástico, siendo el polietileno de alta densidad el más utilizado; libera una variedad de componentes

químicos durante su degradación, lo que tiene un impacto negativo en la biota. Principalmente se producen dos gases de efecto invernadero, metano y etileno, cuando se expone dicho material a la radiación solar.

El aporte de estos polímeros sintéticos no reciclables es bastante alto teniendo en cuenta que en su mayoría son fabricados en material virgen 100%, es decir, desde el proceso de la obtención de su materia prima (cuna) hasta el fin de ciclo de vida, por lo que la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es continua.

Con respecto a la metodología identificada e implementada (el reciclaje, y la disminución en la cantidad de plástico utilizado por botella); es una alternativa que permite mitigar el impacto ambiental y generando un aporte para la preservación de vida del planeta.

La disminución de plástico en la fabricación de estos envases calificados como de manejo peligroso, contribuye en la optimización del recurso fósil, es decir, reduciendo el consumo de materias primas vírgenes, impactando la producción y el proceso de reciclado de materiales plásticos que generan GEI (gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO_2) principal responsable del calentamiento global, metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y los gases fluorados (HFCs, PFC, SF_6).

La disminución de gramaje en los embalajes industriales impacta directamente en la logística del transporte, provocando un menor consumo de combustible y, en consecuencia, una menor huella de carbono. Aporta en un menor esfuerzo para eliminar su huella, así como reducir el impacto en la generación de gases. Realmente la propuesta de disminuir la cantidad de plástico dentro de la estructura de estos envases corresponde a la necesidad por sustentabilidad de cada compañía como aporte al planeta y debería ser una iniciativa propia.

Ahora, en relación con el posconsumo de los envases plásticos de uso en pesticidas, en Colombia se evidencia el aporte medioambiental de Campo Limpio con su programa de tratamiento del triple lavado de estos, así como su reutilización en el fundido del material para fabricar madera plástica y de allí la fabricación de postes de uso en el campo. Una labor que se destaca como sistema integral al apoyo tanto de los fabricantes de pesticidas como los de envases. Se espera que esta actividad se replique de manera masiva ampliando el espectro de reutilización de estos envases en fabricación de objetos específicos.

Perspectivas

A partir de la revisión bibliográfica presentada en la monografía, las perspectivas de trabajos futuros se orientan hacia la disminución del impacto ambiental por fabricación y destrucción de envases de uso en pesticidas, enfocándose en la aplicación y desarrollo de nuevos planes de acción.

Es importante establecer criterios para agrupar las diferentes técnicas de uso en la actualidad e invertir en su consecución. Además, de definir procesos químicos amigables con el ambiente para establecer procesos de descomposición y reutilización de los envases plásticos de uso en pesticidas teniendo en cuenta su origen polimérico.

De cara a una potencial aplicación industrial necesaria para evitar la contaminación por destrucción no controlada de plásticos; sería de interés profundizar en un estudio de los posibles tratamientos de estos materiales en países de Latinoamérica en donde aún no se apropia la cultura y conciencia ambiental para mantener el planeta a futuras generaciones.

Finalmente, la opción de la reutilización es una posible alternativa, pero requiere de conocimiento para su manejo. La alternativa es viable en la medida que se haga un rastreo de estos envases, se ubiquen por producto y por su trazabilidad logística. Básicamente se trata de ubicarlos físicamente en la zona de uso en el país, llevar a cabo el triple lavado y devolverlos a la planta fabricante del pesticida identificado; analizando de manera controlada los residuos y trazas del pesticida de uso, para dar garantía que pueden ser reutilizados sin alterar el transporte del mismo producto.

Referencias

- Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. (15 de noviembre de 2021) *Información básica sobre pesticidas*. <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-pesticidas>
- Aislinn, O. (2015). *Alternativas de aprovechamiento y/o valorización de los envases vacíos de agroquímicos en México* [tesina de especialización, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/8753>
- Arca, J. y Prado, J. (2008). Los envases y embalajes como fuente de ventajas competitivas. *Universia Business Review*, (17), 64-79. <https://www.redalyc.org/pdf/433/43301704.pdf>
- Aristegui Maquinaria. (s.f.). ¿Qué son los termoplásticos? *Blog Aristegui maquinaria* <https://www.aristegui.info/que-son-los-termoplasticos>
- Armegol, E. y A. Badiola (1997). La trashumancia de los plásticos agrícolas. *Revista de Horticultura No.* (118), 31-32. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Hort/Hort_1998_126_completa.pdf
- Askeland, D., Fulay, P., y Wright, W. (2012). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (Hernández, J. y Romo, J., Trad.). CENGAGE learning. (Obra original publicada en 2010). <https://osvaldoweb.files.wordpress.com/2016/04/ciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-edicic3b3n.pdf>
- Balseca-Sampedro, O., Aquino-Arroba, S., Chela-Hinojosa, S., y Figueroa-Moreno, J. (2021). Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, Y PS. *Polo del Conocimiento*, 6(5), 394-425. <http://dx.doi.org/10.23857/pc.v6i5.2668>

- Barbosa, L., Dreger, A., Schneider, E., Morisso, F., y Santana, R. (2017). Polietileno de baixa densidade-PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações. *Revista Espacios*, 38(17), 1-13. <https://www.revistaespacios.com/a17v38n17/a17v38n17p10.pdf>
- Brindis, E. A. (2002). Propiedades básicas de los polímeros. Universidad de Matanzas. https://www.academia.edu/34650509/PROPIEDADES_BÁSICAS_DE_LOS_POLÍMEROS
- Brown, D., Umaña, G., Gil, J., Salazar, C., Stanley, M., y Bessalel, M. (2003). *Guía para la gestión del manejo de residuos sólidos municipales: Enfoque Centroamérica*. <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Mayo2004/pdf/spa/doc15016/doc15016.htm>
- Campo Limpio. (s.f.). *El manejo de envases vacíos de plaguicidas de Campo Limpio*. Corporación Campo Limpio. <https://federaciondefeteros.org/static/files/ManejofungicidasCampoLimpio.pdf>
- Campos, J (2016). *Formulación del plan de gestión integral de empaques de agroquímicos utilizados en la agricultura. Caso piloto: vereda San Antonio del municipio de San Bernardo, Cundinamarca* [Tesis de grado, Universidad Libre]. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10367>
- Campos, M. A. R. (2018). El uso de pesticidas en la agricultura y su desorden ambiental. *Revista Enfermería la Vanguardia*, 6(2), 40-47. <https://revistas.unica.edu.pe/index.php/vanguardia/article/view/210>
- Cánovas, M. (2021). *Comparación de la huella de carbono de plásticos reciclables y bioplásticos con aplicaciones en plasticultura* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/9286>

Carbono News. (17 de noviembre de 2021). Las grandes empresas se comprometen a reducir el plástico virgen un 20% hacia 2025. *Carbono News*.

<https://www.carbono.news/economia/las-grandes-empresas-se-comprometen-a-reducir-el-plastico-virgen-un-20-hacia2025/>

Clínica Jurídica de Salud Pública y Medio Ambiente (MASP) de la Universidad de los Andes y Greenpeace Colombia. (2019). Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en medio ambiente.

http://greenpeace.co/pdf/2019/gp_informe_plasticos_colombia_02.pdf

Congreso de la República. (27 de noviembre de 2008). Ley 1252 de 2008.

http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1252_2008.html

Cordeiro, Y., De Azevedo, B., Soares, R., Dos Santos, C. y Dos Santos, C. (2018). Aplicação do Polietileno no Contexto da Química Verde. *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana n.*, 8 (2018), 26-33.

http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao8/FSMA_RESA_2018_2_02.pdf

Cornejo, G., Marinero-Orantes, E., Funes-Guadrón, C. y Toruño, P. (2020). Biopolímeros para uso agroindustrial: Alternativa sostenible para la elaboración de una película de almidón termoplástico biodegradable. *Revista Iberoamericana De Bioeconomía Y Cambio Climático*, 6(11), 1359–1382.

<https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9824>

Coutinho, F., Mello, I., y Santa Maria, L. (2003). Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 13(1), 01-13.

[https://revistapolimeros.org.br/article/10.1590/S0104-](https://revistapolimeros.org.br/article/10.1590/S0104-14282003000100005/pdf/polimeros-13-1-1.pdf)

[14282003000100005/pdf/polimeros-13-1-1.pdf](https://revistapolimeros.org.br/article/10.1590/S0104-14282003000100005/pdf/polimeros-13-1-1.pdf)

CropLife y Campo Limpio. (s.f.). *Campo Limpio, una solución para el Agro*.

<https://www.croplifela.org/es/proteccion-cultivos/campolimpio>

Cuenca, J. (2015). *Reacciones y sus mecanismos en la degradación de polímeros* [trabajo de grado, Instituto Politécnico Nacional].

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18230/2516842.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

De la Cruz, N. (2012). Efecto de los agroquímicos y los pesticidas sobre cubiertas plásticas usadas en la agricultura [caso de estudio para grado]. Centro de investigación en química aplicada.

<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/389/1/Nadia%20Armandina%20Rocha%20de%20la%20Cruz.pdf>

Departamento de Reglamentación de Pesticidas de California. (s.f.a) ¿Qué es un pesticida?

<https://www.cdpr.ca.gov/docs/dept/factshts/spanish/what-s.pdf>

Departamento de Reglamentación de Pesticidas de California. (s.f.b). Reglamentación del uso de Pesticidas en California. <https://www.cdpr.ca.gov/docs/dept/factshts/spanish/main-s.pdf>

Departamento de Reglamentación de Pesticidas. (s.f.c.) Información del Consumidor.

<https://www.cdpr.ca.gov/docs/dept/factshts/facts spanish.htm>

Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., & Cullen, J. (2013). Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 51, 133-141.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300019X?casa_token=I-fZMEZ3XUAAAAAA:jEvOnrH02_9Q3UnO55wTtLRFWKnIZpU9_2RdmaBiBq595uMl4soK57UJ7rciyoiGZ7PreDrE1Q

- Duran, J. (2005). Formulación para la obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca, variedad MBRA 383. *Revista Guillermo De Ockham*, 3(2).
<https://doi.org/10.21500/22563202.484>
- Durojaye, O., Laseinde, T., & Oluwafemi, I. (2019). *A descriptive review of carbon footprint. In International Conference on Human Systems Engineering and Design: Future Trends and Applications* (pp. 960-968). Springer, Cham.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27928-8_144
- El empaque. (17 de febrero de 2020). El EVOH en la responsabilidad extendida al productor. *El empaque*. <https://www.elempaque.com/temas/El-EVOH-en-la-responsabilidad-extendida-al-productor+133257>
- Escobar, S. (2019). *Análisis de las nuevas alternativas de disposición final para contenedores vacíos de plaguicidas* [trabajo de grado, Universidad Santiago de Cali].
<https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/219>
- Escuela Europea de Excelencia. (16 de septiembre de 2019). Huella de Carbono ¿Qué es? ¿Cómo se mide? *Nueva ISO 14001:2015*. <https://www.nueva-iso-14001.com/2019/09/huella-del-carbono-que-es-como-se-mide/>
- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información tecnológica*, 23(1), 163-176.
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci_arttext
- Estévez, R. (20 de septiembre de 2013). La contaminación del plástico no entiende de fronteras. *Ecointeligencia*. <https://www.ecointeligencia.com/2013/09/contaminacion-plastico-fronteras/>

- Fonseca, E. D. (2021). *Del ecodiseño al diseño sostenible en los planes de gestión ambiental de residuos de envases y empaques plásticos* [tesis de maestría, Universidad de Bogotá José Tadeo Lozano]. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/19849>.
- Garbounis, G., Karasali, H., & Komilis, D. (2022). A Life Cycle Analysis to Optimally Manage Wasted Plastic Pesticide Containers. *Sustainability*, *14*(14), 8405.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8405>
- Gaurh, P. & Pramanik, H. (2016). *Pyrolysis of Municipal Plastic Wastes to Valuable Liquid Hydrocarbons: An Option to Minimize Plastic Wastes Load to Environment*.
https://www.researchgate.net/publication/279846936_Pyrolysis_of_Municipal_Plastic_Wastes_to_Valuable_Liquid_Hydrocarbons_An_Option_to_Minimize_Plastic_Wastes_Load_to_Environment
- Gavidia, P. (18 de abril de 2020). Plaguicidas: efectos dañinos en el medio ambiente y la salud. *Meteored*. <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/plaguicidas-medio-ambiente-y-salud.html>
- GeocycleMX. (21 de diciembre de 2021). Manejo de envases vacíos de plaguicidas y su valorización a través de coprocesamiento [archivo de video]. Youtube.
https://www.youtube.com/watch?v=GpG1FnP_BT0
- Gil, J., Salcedo, M. y Castañeda, A. (2020). Comportamiento mecánico a tracción del compuesto polietileno de alta densidad y polipropileno reciclado. *Revista Argentina de Ingeniería*, *8*(16), 87-92. <https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2020/12/Articulo4-RADI16.pdf>
- Gómez-Méndez, L. (2018) *Transformación física, química y microbiológica de polietileno de baja densidad (PEBD) empleando plasma de Oxígeno, fotocatalisis TiO2/UV y Pleurotus ostreatus* [Tesis doctoral, Pontificia Universidad Javeriana].

<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/42789/TESIS%20VERSION%20FINAL%20%28Mayo%202019%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Helge, K. (2008). Formación, emisión y control de dioxinas en hornos de cemento. *Revista Técnica Cemento Hormigón*, (919), 60-87.

<http://www.recuperaresiduosencementeras.org/wp-content/uploads/2017/09/SINTEF-Kare-Karstensen-definitivo.pdf>

Hermida, É. (2017). *Polímeros*. Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Educación Tecnológica <https://www.virtualpro.co/biblioteca/polimeros>

Huici, O., Skovgaard, M., Condarco, G., Jørs, E., & Jensen, O. C. (2017). Management of empty pesticide containers—a study of practices in Santa Cruz, Bolivia. *Environmental Health Insights*, 11, 1-7. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1178630217716917>

Impacto ambiental del polietileno (02 de octubre de 2005). *Textos científicos*.

<https://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/ambiental>

Kiran, N., Ekinci, E., & Snape, C. E. (2000). Recycling of plastic wastes via pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 29(4), 273-283.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344900000525>

Koelmans, AA, Nor, NHM, Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, SM y De France, J. (2019).

Microplásticos en agua dulce y agua potable: revisión crítica y evaluación de la calidad de los datos. *Water research*, 155, 410-422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>

La Rioja. (s.f). *Envases fitosanitarios*. [https://www.larioja.org/medio-](https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/residuos/residuos-gestion-especial/envases-fitosanitarios)

[ambiente/es/residuos/residuos-gestion-especial/envases-fitosanitarios](https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/residuos/residuos-gestion-especial/envases-fitosanitarios)

León, C. (2018). ¿Por qué necesitamos la ley de gestión de envases de agroquímicos? (Y su decreto reglamentario). *Información Técnica de cultivos de invierno Campaña 2018*.

Estación Experimental Agropecuaria Rafaela, 1(6), 82-91.

https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_rafaela_cultivos_inv_2018.pdf#page=88

Lo-Iacono-Ferreira, V. G., Viñoles-Cebolla, R., Bastante-Ceca, M. J., & Capuz-Rizo, S. F. (2021). Carbon footprint comparative analysis of cardboard and plastic containers used for the international transport of Spanish Tomatoes. *Sustainability*, 13(5), 2552.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2552>

Maldonado, N. y Monsalve, A. (2018). *La sostenibilidad empresarial, el plástico, y su impacto en las fuentes hídricas* [Trabajo de grado, Colegio de Estudios Superiores de Administración]. <http://hdl.handle.net/10726/2102>.

Malpass, D. (2010). *Introduction to industrial polyethylene: properties, catalysts, and processes*. Scrivener Publishing LLC.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470900468>

Martínez-Romo A, González-Mota R, Soto-Bernal J, Rosales-Candelas I. (2015) Investigating the degradability of HDPE, PEBD, PE-BIO, and PE-OXO films under UV-B radiation. *Journal of Spectroscopy*, (2015), 1-6. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/586514>.

McMurry, J. (2008). *Química orgánica* (Vol 7). Cengage learning.

<https://fcen.uncuyo.edu.ar/catedras/john-mcmurry-quimica-organica-2008-cengage-learning.pdf>

Melenge Robayo, L. J., & Piñeros Peña, R. A. (2021). *Apoyo en el desarrollo de proyectos y actividades de consultoría en el área de residuos sólidos de la empresa KELAB SAS* [tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/26773/MelengeLeidy2021PiñerosRobinson2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mexpolímeros. (s.f.). Poliamidas.

<https://www.mexpolimeros.com/cu%C3%A1les%20son%20las%20poliamidas.html>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Sector plásticos. Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos posconsumo.*

<https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guias-ambientales-sector-plc3a1sticos.pdf>

Ministerio del Ambiente y desarrollo sostenible. (s.f.). *Envases de Plaguicidas.*

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/envases-de-plaguicidas>

Ministerio del Ambiente y desarrollo sostenible. (s.f.). Mitigación.

<https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/mitigaci>

Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). Huella de carbono. <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

Ministerio para la Transición Ecológica (s.f.). *Guía para el cálculo de la huella de carbono Y para la elaboración de un plan de mejora de una organización* (número de informe NIPO: 280-14-241-8). Ministerio para la Transición Ecológica.

https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf

Montero, L. (2012). *Métodos fisicoquímicos de caracterización de las fibras de polilactida* [tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya].

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/96986/TLMP1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Naciones Unidas (1998). Protocolo De Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Navas, I., & García-Fernández, A. J. (2020). *Plaguicidas y biocidas: generalidades, clasificación toxicológica y de riesgos, legislación europea aplicable* [trabajo de grado, Universidad de Murcia]. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/88181>
- Norma Técnica Colombiana 844 (2003). Envases Plásticos para plaguicidas de uso agrícola. <https://tienda.icontec.org/gp-envases-plasticos-para-plaguicidas-de-uso-agropecuario-ntc844-2003.html>
- Nylon (29 de agosto de 2005). Textos científicos. <https://www.textoscientificos.com/polimeros/nylon>
- Ochoa, N. (2017). *Propuesta integral para el aprovechamiento del plástico a partir de los residuos sólidos resultantes del embalaje de plaguicidas (Residuos RESPEL)* [trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/e3e67f51-0a0d-4792-97c1-0c78e1f6b262/content>
- Ogg, C. L., Schulze, L. D., & Kamble, S. T. (2019). *Safe transport, storage, and Disposal of pesticides*. University of Nebraska Extension. <https://extensionpubs.unl.edu/publication/9000016363802/safe-transport-storage-and-disposal-of-pesticides/>
- Organización de las Naciones Unidas. (5 de junio de 2018). O nos divorciamos del plástico, o nos olvidamos del planeta. *Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>
- Organización Mundial de la Salud & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). Manual sobre la elaboración y uso de las especificaciones de

plaguicidas de la FAO y la OMS. *Organización Mundial de la Salud*.

<https://apps.who.int/iris/handle/10665/259820>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (22 de febrero de 2022). *La contaminación por plástico crece sin cesar, en tanto que la gestión de residuos y el reciclaje se quedan cortos, dice la OCDE*.

<https://www.oecd.org/centrodemexico/medios/perspectivas-globales-del-plastico.htm>

Patarasiriwong, V., Wongpan, P., Korpraditskul, R., & Jeerapong, L. (2013). Pesticide packaging waste management model for Thailand. *Journal of Environmental Science and Engineering* (2B), 1-6.

https://www.researchgate.net/publication/283712482_Pesticide_Packaging_Waste_Management_Model_for_Thailand

Plastics Europe (2005). Polyethylene bottle (PE-HD); technology mix; production mix, at producer [Conjunto de datos]. Sphera [https://sphaera.com/2022/xml-](https://sphaera.com/2022/xml-data/processes/95f6557a-a2ae-4e5d-98b4-6cf5924d850d.xml)

[data/processes/95f6557a-a2ae-4e5d-98b4-6cf5924d850d.xml](https://sphaera.com/2022/xml-data/processes/95f6557a-a2ae-4e5d-98b4-6cf5924d850d.xml)

Posada Bustamante, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67–86. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>

Posada, B. (1994). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 30(94), 67-86.

<https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/16534/document%20%287%29.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Povea, I. (2019). El envase como protector de los atributos de calidad de alimentos. *Revista Alimentos Hoy*, 27(47), 18-28.

<https://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/525>

Presidencia del Gobierno Español. (1984). Real Decreto 3349/1983 de 30 de noviembre. *Por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la fabricación, comercialización y utilización de plaguicidas.* <https://www.boe.es/buscar/pdf/1984/BOE-A-1984-1791-consolidado.pdf>

Producciones Generales S.A. (s.f.). *Catálogo Envases plásticos.*

<https://www.catalogodeempaques.com/documenta/contenido/125669/Catalogo-Progen.pdf>

Qureshi, M. S., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., Mannila, J., ... & Laine-Ylijoki, J. (2020). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152 (2020), 1-11.

<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>

Ramírez, A. y Guadalupe, L. (2010). El polietileno. Síntesis y degradación. *AlephZero-Comprendamos* (57) <http://www.comprendamos.org/alephzero/57/polietileno.html>

Ramos, G., Gutiérrez, C., y Marrufo, B. (2019). Análisis del control dinámico de un tren de destilación multicomponente del área de recuperación de solvente de una planta de polietileno lineal. *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, 29(2), 59-80.

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/32611/39295>

RCN Radio. (05 de junio de 2018). La ONU advierte de que sólo el 9 % del plástico usado en el mundo se recicla. *RCN Radio.* <https://www.rcnradio.com/estilo-de-vida/medio-ambiente/la-onu-advierde-de-que-solo-el-9-del-plastico-usado-en-el-mundo-se>

Revista Bitstream. (s.f.). *Polímeros Sintéticos.*

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6425/03INTRODUCCION.pdf?...3>

- Rivera-Hernández, J., Blanco-Orozco, N., Alcántara-Salinas, G., Houbron, E., y Pérez-Sato, J. (2017). ¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto. *Revista Posgrado y Sociedad*, 15(1), 57-67. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>
- Roca, B., Beltrán, M. y Gómez, R. (2019). Cambio climático y salud. *Revista Clínica Española*, 219(5), 260-265, <https://doi.org/10.1016/j.rce.2019.01.004>.
- Roca, I. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (pead)* [Trabajo de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0639_Q.pdf
- Rodríguez, J. P., Ruiz-ochoa, M. A., & Meneses, A. (2020). Revisión de los factores de emisión en las metodologías de huella de carbono en Colombia. *Espacios*, 41(47), 74-84. https://www.researchgate.net/publication/347384983_Review_of_emission_factors_in_carbon_footprint_methodologies_in_Colombia
- Royer, S., Ferrón, S., Wilson, S., & Karl, D. M. (2018). Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PloS one*, 13(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574>
- Sánchez, M. y Urdánigo, J. (2021). *Manejo de envases vacíos de agroquímicos y su impacto en la calidad ambiental de los sectores rurales del cantón buena fe, año 2020* [tesis de maestría, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6300>
- Schulze, L. D., & Ogg, C. (1993). G93-1150 Rinsing Pesticide Containers. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*. <https://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/1227/>

- Solís, J., Miranda, B., Davis, A., y Jiménez, G. (2020). Valorización de residuos de parafinas provenientes de la pirólisis de plásticos por craqueo catalítico. *Ciencia en Desarrollo*, 11(1), 81-99. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n1.2020.10488>.
- Spiegel, J., & Maystre, L. Y. (2012). Control de la contaminación ambiental, *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (pp. 55.1-55.59). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+55.+Control+de+la+contaminación+ambiental>
- Tecnología de los plásticos. (5 de marzo de 2011). Código de los plásticos. *Blog Tecnología de los plásticos*. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>
- Torres Álvarez, N (2020). Huella de Carbono y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas para la toma de decisiones frente al aprovechamiento de residuos sólidos en una empresa del sector textil. [Trabajo de grado profesional, Universidad de Antioquia].
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/26042/1/TorresNicolas_2022_EmisionesGasesEfecto.pdf
- Twenergy. (30 de mayo de 2019). ¿Cómo se realiza el reciclaje de plásticos? *Twenergy*.
<https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/reciclaje/reciclado-de-plasticos-542/>
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2018). *Valoración energética de residuos: Proyecto WTE Colombia*. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1339>
- Uribe, V. (2020). *Estudio del proceso físico y químico de degradación del polietileno bajo condiciones simuladas de calidad del agua de la cuenca baja del río Frio-magdalena-*

Colombia [trabajo de grado, Universidad El Bosque].

<https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/3850>

Vega Oracchahua, F. D. M., & Churo Samayani, A. (2019). *Revisión bibliográfica para determinar el mejor catalizador, evaluando las variables de temperatura y velocidad de reacción en el proceso de pirolisis catalítica para la conversión de residuos plásticos de polietileno en combustible líquido* [trabajo de grado, Universidad Católica de San Pablo]

<https://1library.co/document/y49rokrz-bibliografica-catalizador-temperatura-catalitica-conversion-plasticos-polietileno-combustible.html>

Vidal, E. G. (2014). *Gestión de envases de agroquímicos. Descontaminación de efluentes provenientes de plantas de reciclado de envases que contienen glifosato con la tecnología avanzada de oxidación que emplea UV/H₂O₂* [tesis de maestría, Universidad Nacional del Litoral]. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/655>

Wackernagel, M. (2014). Redefining progress. En *Sharing Nature's Interest* (pp. 21-34).

Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315870267/sharing-nature-interest-nicky-chambers-mathis-wackernagel-craig-simmons>

Yusoff, S., Kamari, A., & Aljafree, N. (2016). A review of materials used as carrier agents in pesticide formulations. *International journal of environmental science and technology*, 13(12), 2977-2994. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1096-y>

Zalazar, C. S., & Henning, G. P. (2021). Desarrollo Sostenible en el centro norte de la provincia de Santa Fe. *Gestión integral de envases de agroquímicos* (pp. 298-303). Ediciones UNL. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/137539>

Zero Emissions Objective –Z.E.O.- (21 de enero de 2020). ¿Cuánto CO₂ emite el plástico? *Zero Emissions Objective*. <https://plataformazeo.com/es/cuanto-co2-emite-el-plastico/>