



LOS PELIGROS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS EN ENERGÍA, EL RECICLADO QUÍMICO Y LOS COMBUSTIBLES PLÁSTICOS

Lee Bell

Profesor Hideshige Takada



LOS PELIGROS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Autores

Prof. Hideshige Takada, *Departamento de Ciencias Ambientales y de Recursos Naturales*

Lee Bell, *Asesor de IPEN en políticas sobre el mercurio y COP*



IPEN es una red de organizaciones no gubernamentales que trabajan en más de 100 países para reducir y eliminar los daños a la salud humana y al medio ambiente producidos por sustancias químicas tóxicas.

www.ipen.org



International Pellet Watch es un grupo de investigación ecológica sin fines de lucro cuya misión es monitorear los casos de residuos plásticos y pellets de plástico, en particular, en todo el mundo. Con sede en la Universidad de Agricultura y Tecnología, Departamento de Ciencias de Recursos Ambientales en Tokio, Japón, desde 2013, el grupo ha estado recopilando datos y educando al público sobre los peligros de los residuos plásticos.

<http://pelletwatch.org/>

ISBN: 978-1-955400-12-1

© 2021 Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (International Pollutants Elimination Network). Todos los derechos reservados.

Equipo de producción de IPEN: Bjorn Beeler, Tim Warner, Betty Wahlund

La traducción de este documento la realizó Leslie Pascoe Chalk de la agencia de servicios de traducción Diidxa.

Favor de citar esta publicación como:

Takada, H. y Bell, L. *Los peligros de la gestión de residuos plásticos*. Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (IPEN), junio de 2021.

CONTENIDO

Resumen Ejecutivo	5
Hallazgos clave	7
Glosario	10
Introducción	13
1. ¿Los plásticos en una economía circular global?	15
El plástico acelera el cambio climático.....	17
¿Qué son los monómeros, los polímeros y los plásticos?	23
Los aditivos tóxicos.....	26
Aditivos de interés mundial: los benzotriazoles fenólicos UV-326, UV-327 y UV-328.....	31
El reciclado de plástico.....	35
¿Los residuos realmente se reciclan o tan solo se exportan?.....	37
¿Qué tipos de plástico se reciclan en verdad y cuáles no?	44
PVC - el plímmero venenoso.....	49
2. El reciclado químico del plástico.....	52
Técnicas de reciclado químico	54
La despolimerización química	55
La regeneración a partir de disolventes	58
La despolimerización térmica (la pirólisis y la gasificación).....	59
La despolimerización para la producción de plásticos	62
La despolimerización a partir de la oxidación en agua supercrítica (OASC)	65
La despolimerización con bacterias	66
3. La conversión de plásticos en combustibles	67
La despolimerización para la producción de combustibles (fósiles).....	67
La conversión del plástico en combustibles no fósiles (hidrógeno).....	70
La pirólisis	71
La fotorreformación	72
Los combustibles derivados de residuos (CDR) y los hornos de cemento	73
Conclusión sobre el reciclado químico	78
4. El reciclado mecánico	81
Los procesos técnicos clave.....	82
La recolección.....	82
La clasificación y la limpieza	82
La clasificación de los polímeros.....	83
La refundición y la extrusión.....	83
Los aditivos tóxicos desafían el reciclado mecánico y químico.....	84

El infra-reciclado.....	86
5. La gestión del plástico contaminado con COP.....	88
¿Por qué se debe de destruir el plástico contaminado con COP y no se le debe reciclar?	88
Técnicas para la gestión ambientalmente racional de los plásticos contaminados con COP	90
Separación de residuos plásticos contaminados con COP provenientes de otros polímeros.....	91
La separación de XRF (fluorescencia de rayos X).....	92
La separación de densidad de plásticos BFR a través del sistema de separación por flotado/hundido.....	94
Los COP en la basura marina plástica.....	95
6. Las tecnologías alternativas a la combustión para plásticos contami- nados con COP	98
Reducción química en fase gaseosa (reducción de hidrógeno).....	98
Molienda de bolas o destrucción mecanoquímica (MCD)	101
Oxidación en agua supercrítica (OASC) y oxidación en agua supercrítica para su escalamiento industrial (OASCi)	104
El proceso de CreaSolv®.....	108
Las tecnologías alternativas a la combustión para los residuos médicos plásticos.....	110
7. La incineración de residuos plásticos	114
8. Los rellenos sanitarios	118
¿Por qué se enviarían residuos plásticos a un relleno sanitario?	119
Referencias.....	120
Reconocimientos	126

RESUMEN EJECUTIVO

Los residuos plásticos se han convertido en un problema de contaminación sin precedentes en todo el mundo. Desde la basura plástica visible en la tierra y en los océanos hasta los microplásticos invisibles en lagos, montañas y la lluvia, el planeta está cada vez más cubierto de residuos petroquímicos procedentes de la producción de plástico. Ante la actitud de las compañías petroquímicas que evitan asumir las responsabilidades por la emisión de carbono a partir de los combustibles fósiles a través de aumentar masivamente la producción de plásticos, de manera inevitable se verá un aumento en la cantidad de residuos plásticos que se están generando.

Este informe examina los métodos actuales y emergentes por medio de los cuales los residuos plásticos se gestionan a nivel mundial y cuestiona si alguno de ellos presenta una solución a la generación cada vez más acelerada de residuos plásticos. La respuesta corta es que el reciclado marginal no puede proporcionar una solución a la contaminación plástica cuando se prevé que la producción de plástico vaya a crecer exponencialmente. Otras técnicas de gestión de residuos basadas en la “recuperación”, como la incineración, la conversión de residuos plásticos en combustibles fósiles y el infra-reciclado para incorporar residuos plásticos a la construcción de carreteras, sencillamente generarán una mayor contaminación. La única respuesta a largo plazo a la contaminación plástica es producir menos plástico, lo cual parece poco probable mientras la industria petroquímica siga necesitando plástico como un amparo seguro para evitar enfrentar sus responsabilidades con respecto a la emisión de carbono. El aumento de la producción de plástico compensa la caída de la demanda de sus combustibles fósiles.

La primera sección del informe considera los plásticos en el contexto de una economía circular global, no sólo como una mercancía, sino además como un material complejo, muchas veces tóxico. Cuestiona si el reciclado de plástico es económicamente viable, ambientalmente sostenible y socialmente justo. La segunda sección examina el *reciclado químico*, al que actualmente recurre intensamente la industria del plástico como una forma de eliminar la contaminación plástica mediante el uso de la despolimerización química, térmica y asistida por disolventes para generar materia prima y polímeros y producir plástico nuevo a partir de residuos plásticos. Esta sección explica por qué el reciclado químico seguirá siendo

una actividad marginal debido a barreras económicas, el uso intensivo de la energía y los productos derivados de los desechos peligrosos.

La tercera sección considera otra ‘solución’ de la industria del plástico de convertir el plástico en combustibles fósiles líquidos para la combustión y concluye que se trata de una práctica ineficiente, contaminante y poco económica. De manera similar, la recuperación de energía por medio de la incineración de residuos plásticos en incineradores y en hornos de cemento como “combustibles alternativos” o “combustibles derivados de residuos” da como resultado emisiones tóxicas, cenizas tóxicas, emisiones de carbono de alta intensidad y recursos procedentes de residuos, con lo cual se refuerza una economía lineal.

La sección cuatro evalúa el reciclado mecánico, examina sus limitaciones y discute las principales barreras para su expansión. Los desafíos clave que enfrenta el reciclado mecánico efectivo de residuos plásticos son los aditivos químicos tóxicos introducidos durante la producción de plásticos vírgenes, la incapacidad de reciclar las mezclas de polímeros en flujos de producción de monopolímeros, la competencia con plásticos vírgenes de bajo costo y los envases complejos hechos de materiales mixtos (plásticos, metales y papel) que son técnicamente difíciles de separar y recuperar, además de ser un proceso costoso. Aunque el reciclado mecánico podría ser mucho más efectivo si se mejorara el diseño industrial de los plásticos y se eliminaran del mercado los plásticos mal diseñados, así como sus aditivos tóxicos, las limitaciones que enfrenta le impiden convertirse en una solución para los residuos plásticos.

Las secciones cinco y seis abordan algunos de los plásticos más tóxicos: los que se contaminan por medio de la producción, el reciclado o la exposición acuática con contaminantes orgánicos persistentes (COP), las sustancias químicas más tóxicas, más persistentes y más bioacumulativas que jamás se hayan producido. Estas secciones proporcionan información sobre cómo se contaminan los plásticos con COP, cómo gestionarlos y qué técnicas y tecnologías están disponibles para eliminarlos de conformidad con los requisitos del Convenio de Estocolmo. También exploran alternativas de gestión racional para los residuos plásticos de origen médico. Por último, este informe examina brevemente los problemas relacionados con la incineración y los rellenos sanitarios de residuos plásticos.

Es evidente que ni el reciclado químico ni el mecánico de los residuos plásticos pueden proporcionar soluciones a la crisis cada vez más acelerada de la contaminación con plásticos promovida por la producción exponencial de plásticos. La única solución viable es reducir la producción de plástico, utilizar materiales alternativos y prohibir los usos no esenciales del plástico.

HALLAZGOS CLAVE

- Ni el reciclado mecánico ni el químico tienen la capacidad o el potencial de reducir la contaminación plástica del medio ambiente a menos que se regule y reduzca a un mínimo la producción de plástico.
- Si persisten las tendencias actuales, se producirán 1,800 millones de toneladas de plástico y se incinerarán 900 millones de toneladas de plástico a nivel mundial en 2050.
- Si no hay cambios en las prácticas actuales, 108 millones de toneladas de residuos plásticos se depositarán en rellenos sanitarios, se tirarán en basureros o bien se incinerarán a cielo abierto en 2050, principalmente en países de bajos ingresos.
- Los aditivos químicos tóxicos son un aspecto ‘invisible’ importante de la contaminación plástica del medio ambiente y los seres humanos están cada vez más expuestos conforme va aumentando la producción y el reciclado.
- Los aditivos químicos tóxicos son barreras para el reciclado mecánico y se convertirán en residuos de desechos peligrosos de alto volumen provenientes del reciclado químico.
- Los aditivos incluyen sustancias químicas que perturban el sistema endocrino (EDC, por sus siglas en inglés), contaminantes orgánicos persistentes (COP) y metales pesados que migran del plástico durante las fases de producción, uso y eliminación.
- La despolimerización química de los plásticos por medio de pirólisis y gasificación (reciclado químico) requiere de insumos de muy alta energía, tiene un alto potencial de calentamiento global, además de que potencialmente genera exposiciones tóxicas a los que quedan expuestos los trabajadores y promueve un flujo de residuos de desechos peligrosos.
- Es probable que la despolimerización química por pirólisis y gasificación contamine los combustibles derivados de polímeros con COP liberados sin control alguno.
- La regeneración de plásticos con base en disolventes puede producir polímeros limpios, aunque genera un flujo significativo de residuos de desechos peligrosos.
- La oxidación en agua supercrítica y subcrítica (OASC) tienen el potencial de ser una técnica de reciclado más ambientalmente racional para los polímeros en comparación con la mayoría de los demás procesos de reciclado químico. La OASC es también uno de los métodos más

limpios para la destrucción de plásticos contaminados con COP que no se pueden reciclar.

- No se puede abordar la contaminación con microplásticos mediante el reciclado mecánico o químico y se le debe someter a una reducción de la producción a un mínimo.
- Es más efectivo utilizar el reciclado químico para purificar monómeros y polímeros para su reutilización a partir de mezclas de plásticos contaminados que el reciclado mecánico, aunque durante el proceso se generan flujos significativos de residuos tóxicos.
- Se debe intensificar el uso de tecnologías alternativas a la combustión para la gestión de residuos contaminados con COP y para detener la propagación de COP procedentes de la incineración de plásticos.
- Los combustibles derivados de residuos (CDR) pueden contener sustancias peligrosas, no contribuyen a una economía circular y representan el 'final de la línea' para los recursos utilizados de esta manera. La incineración de CDR contribuye al cambio climático y a las emisiones contaminantes.

GLOSARIO

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
ASR	Residuos de la trituradora de automóviles
BFR	Retardantes de llama bromados
CDR	Combustible derivado de residuos
CFRP	Plásticos reforzados con fibra de carbono
CKD	Polvo de horno de cemento
COP	Contaminante orgánico persistente
COP-BFR	Contaminante orgánico persistente-Retardante de llama bromado
COPNI	COP producidos no intencionalmente
DMT	Dimetil tereftalato
DMCR	Deshalogenación de Tribochen por reacción mecanoquímica
DDE	Diclorodifenilo-dicloroetileno
DDT	Dicloro difenil-tricloroetano
ED	Eficiencia de destrucción
EDC	Sustancias químicas que perturban el sistema endocrino
ESM	Manejo Ambientalmente Racional
FCM	Materiales en contacto con alimentos
FMCGC	Compañías que producen bienes de consumo de movimiento rápido

FT-NIR	Transformada de Fourier cercana al infrarrojo
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
GEI	gases de efecto invernadero
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HBCD	Hexabromociclododecano
HIP	Poliestireno de alto impacto
HDPE	Polietileno de alta densidad
JESCO	Japan Environmental Safety Corporation
LDPE	Polietileno de baja densidad
LLDPE	Polietileno lineal de baja densidad
NBCC	Nivel de bajo contenido de COP
MCD	Destrucción mecanoquímica
MCV	Monómero de cloruro de vinilo
MEG	Monoetilénglicol
NIAS	Sustancias no añadidas intencionalmente
OASC	Oxidación en agua supercrítica
OASCI	Oxidación en agua supercrítica industrial
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PA	Poliamidas
PAE	Poliamida epiclohidrina
PBDD	Polibromo dibenzo-p-dioxinas

PBDD/F	Polibromo dibenzo-p-dioxinas/furanos
PBDE	Éter de difenilo polibromado
PBDF	Polibromo dibenzo furanos
PC	Policarbonato
PCB	Bifenilo policlorado
PCCC	Parafinas cloradas de cadena corta
PCDD/DF	Policloro dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos
PCG	Potencial de calentamiento global
PE	Polietileno
PEF (2)	Combustibles procesados
PET	Tereftalato de polietileno
PHA	Polihidroxicanoatos
Pi	Postindustrial (residuos plásticos)
PLA	Ácido poliláctico
PMMA	Poli-metacrilato de metilo o acrílico
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

PP	Polipropileno
PRFV	Plásticos reforzados con fibra de vidrio
PRTL	Procesador de reducción térmica por lotes
PTA	Ácido tereftálico purificado
PU	Poliuretano
PVC	Policloruro de vinilo
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
RC	Código de resina
RSM	Residuos Sólidos Municipales
RQFG	Reducción química en fase gaseosa
SAN	Acrilonitrilo de estireno
SSP	Policondensación en estado sólido
TDA	Tolilenediamina
TDI	Diisocianato de tolueno
TPA	Ácido tereftálico
UE	Unión Europea
XPS	Poliestireno extruido
XRF	Fluorescencia de rayos X

Producción global de plásticos

Producción regional - 2018

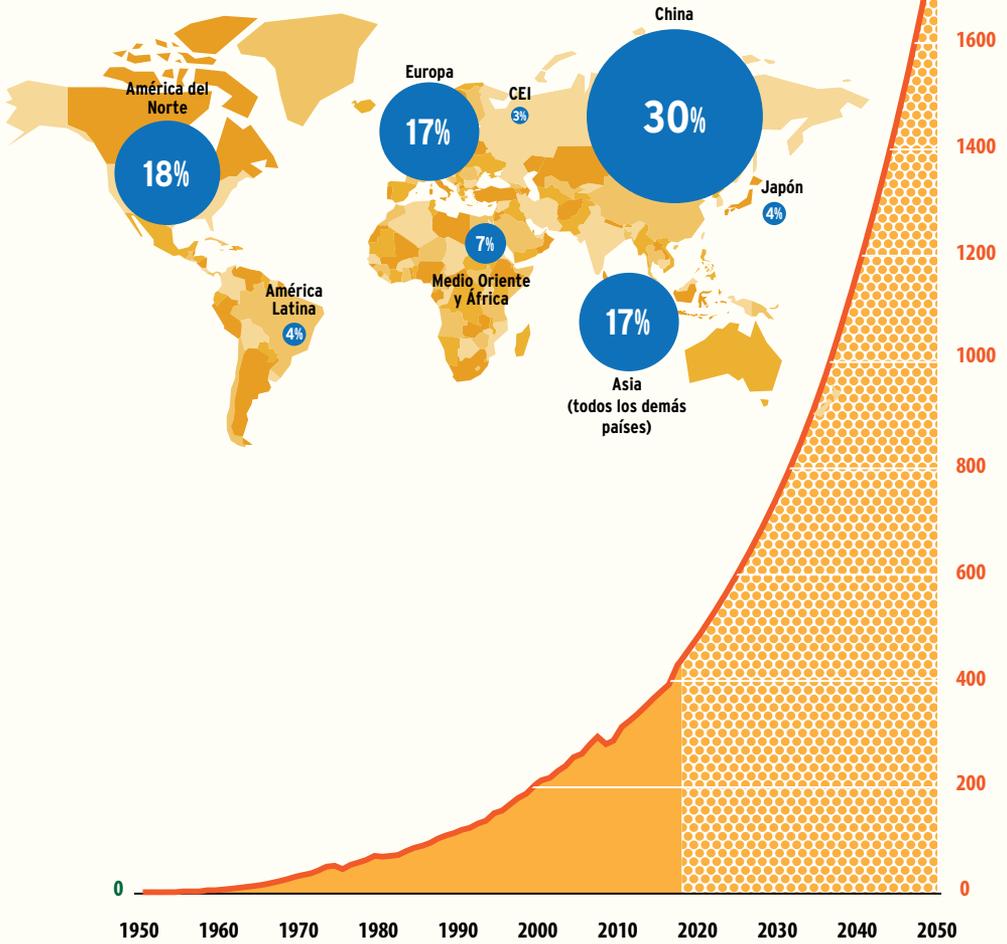


Figura 1. Proyección de la producción de plástico al año 2050.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la conciencia que existe a nivel mundial sobre la contaminación con plásticos ha llegado a casi todos los niveles de la sociedad. Con la ayuda de la rápida divulgación de información a través de las redes sociales y la tecnología de la información, desde los escolares hasta los legisladores internacionales tienen conciencia de que la contaminación plástica del planeta es un problema enorme.

Gran parte de esta contaminación plástica es visible. Desde las bolsas de plástico que vuelan por las calles, hasta la vida marina enredada en redes de plástico y ríos tapados con viejos envases de plástico, la contaminación plástica está a la vista de todos.

Sin embargo, investigaciones recientes indican que esto es sólo una parte del problema y que microplásticos diminutos están contaminando todos los confines de la Tierra, los mares más profundos (PNUMA, 2016; Andradý, 2011, Bakir *et al.*, 2014), las montañas más altas (Allen *et al.*, 2019), el suelo, el agua, todos los mamíferos marinos (Nelms *et al.*, 2019), los peces e incluso las aguas pluviales (Wetherbee *et al.*, 2019). Esta combinación de contaminación visible y microplástica ha alcanzado niveles críticos que deberían de haberse abordado hace décadas.

Una parte clave del problema es la gran escala de la producción de plásticos que existe actualmente y las opciones limitadas para la gestión del final de su ciclo de vida. Tan solo en 2016, los niveles de la producción mundial de plástico se estimaron en 335 millones de toneladas (Mt) (PlasticsEurope, 2018).

La producción total de plástico desde la década de los años cincuenta, se estima en 8,300 Mt, de los cuales 6,300 Mt se han convertido en residuos y 4,900 Mt se han depositado en rellenos sanitarios o se han introducido al medio ambiente (Geyer *et al.*, 2017). Gran parte del resto se ha incinerado, creando una gama de contaminantes orgánicos persistentes como las emisiones de dioxinas y furanos (PCDD/DF) y las cenizas tóxicas (IPEN, ARNIKA, NTN, 2017b).

Se predice que el nivel de producción de 2016 de 335 Mt ascenderá a un alarmante nivel de 1,800 Mt para 2050 (Figura 1., Ryan, 2015), ya que la

industria petroquímica está cambiando su producción de combustibles a sustancias químicas y plásticos en un mercado en el que se pretende restringir el carbono.

Aunque se ha estado promoviendo el reciclado, tanto mecánico como químico, de manera generalizada, como una solución al problema de los residuos plásticos, en los niveles actuales de producción de polímeros, el reciclado está teniendo un impacto muy limitado, incluso en los países ricos. Cuando se considera el panorama general del crecimiento masivo de la producción de plástico y la falta de una infraestructura de reciclado en los países de bajos ingresos, resulta evidente que el reciclado de plástico no es la solución.

Para abordar la contaminación plástica del planeta, se requiere de una gama de enfoques, de los cuales tres elementos tienen una importancia crítica por lo que se les debe priorizar:

1. Debemos reducir drásticamente la cantidad de plástico que se está produciendo, de inmediato.
2. Debemos abordar las reservas de residuos plásticos existentes (controlados, sin controlar y en rellenos sanitarios) de una manera ambientalmente racional.
3. Debemos desarrollar un sistema de gestión sostenible y ambientalmente racional para cualquier plástico que se produzca en el futuro. Este elemento debe incluir la implementación de sistemas de diseño, producción y gestión al final del ciclo de vida de los plásticos que maximicen la reutilización y el reciclado de polímeros tanto en los países de bajos ingresos como en los países ricos.

En pocas palabras, debemos reducir la producción de plástico a usos esenciales, lidiar con las reservas heredadas y rediseñar el plástico que se produzca en el futuro, para permitir una gestión ambientalmente racional (GAR) dentro del marco de una economía circular global que no exporte residuos plásticos a países de bajos ingresos.

El enfoque principal de este informe es cómo abordar las reservas existentes de residuos plásticos y los métodos potenciales para gestionar los plásticos actuales y futuros que lleguen al final de su ciclo de vida. La reducción de la producción de plásticos es un tema político y legislativo que queda fuera del ámbito de este informe.

1. ¿LOS PLÁSTICOS EN UNA ECONOMÍA CIRCULAR GLOBAL?

Una pregunta clave a la hora de considerar cómo gestionar los residuos plásticos es si el plástico desempeña un papel en una economía circular global. ¿Se puede tratar al plástico como se trata al papel, el vidrio y el metal que se reciclan y se vuelven a procesar en un ciclo material interminable que atraviesa la economía? La evaluación de las limitaciones del reciclado de plástico en este informe sugiere que puede que esto no sea posible sin que se realicen cambios importantes en los métodos y niveles de producción del plástico.

El concepto de una economía circular en la cual los recursos materiales constantemente pasan por un ciclo a través de la cadena de valor de la producción, el uso y el reciclado, con el fin de maximizar su utilidad y evitar la extracción y el uso de materiales vírgenes, es un antídoto progresivo para una economía lineal. En la economía lineal clásica, se extraen los recursos materiales del medio ambiente, se refinan y se procesan en productos que se utilizan y posteriormente se convierten en residuos. Como residuos, se les elimina, se les entierra o incinera y se pierden para siempre; así se les retira del inventario de recursos disponibles para una producción nueva. Lo que es peor es el impacto que tiene enterrar o incinerar esos recursos: se contamina el aire, el suelo y el agua, se expone a los humanos a residuos y emisiones tóxicos, además de tener impactos a largo plazo sobre la biodiversidad y el clima.

La conversión a una economía verdaderamente circular significa que aquellas empresas cuyas actividades se alinean con un marco circular probablemente se beneficiarán de los cambios, mientras que las empresas que estén atrapadas en el viejo modelo lineal, les resultará más difícil y menos rentable operar. Esto ha llevado a que muchos intereses económicos 'lineales' intenten redefinir el concepto de economía circular para incluirse a sí mismos como un elemento esencial del sistema económico circular. Esto se ve muchas veces en los defensores de la incineración que consideran la incineración de residuos y especialmente de residuos plásticos como 'recuperación de energía' o 'reciclado térmico'. Sin embargo, la incineración de residuos plásticos, no sólo genera residuos tóxicos atmosféricos y residuos sólidos, sino que además destruye el recurso mismo. En este caso, los recursos que se destruyen son los petroquímicos que se extrajeron para producir plástico y la 'energía integrada' en el producto de plástico.

LINEAR ECONOMY



CIRCULAR ECONOMY



Figura 2. La economía lineal y circular.

La energía integrada incluye la energía utilizada para extraer el petróleo, refinar los productos petroquímicos y fabricar los polímeros, así como el transporte entre cada uno de los pasos del proceso, incluyendo el transporte al mercado. Toda esa energía integrada en el producto, se destruye en un par de segundos en la cámara de combustión del incinerador, para extraer la pequeña cantidad de ‘energía calórica’ que se genera cuando se incinera un objeto de plástico.

Como muchas industrias se han dado cuenta de que pertenecen a la vieja economía lineal y que van a perder ventajas en una economía circular, ellas y sus asociaciones industriales han buscado distorsionar su definición y buscar que se les integre. Esto ha llevado a una proliferación de definiciones e interpretaciones de lo que es una economía circular. El Centro Europeo de Estudios de Política Pública (CEPS por sus siglas en inglés) ha identificado por lo menos doce definiciones académicas e institucionales de lo que es una economía circular (CEPS, 2017) y una breve búsqueda en Internet duplicaría el número de estudios. En el centro del concepto de economía circular, como se entiende ampliamente, está *evitar la extracción de recursos a través de maximizar la reutilización y el reciclado de*

los recursos materiales existentes y reducir a un mínimo los residuos en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

También se debe reconocer que hay algunas cosas en nuestra economía y sociedad que no es recomendable reciclar, incluyendo los materiales altamente tóxicos. El Convenio de Estocolmo y su prohibición general de reciclar los residuos de COP reconocen este hecho. En el caso de los plásticos, esto significa que es necesario evitar añadir aditivos tóxicos a los polímeros ya que dificultan el reciclado, contaminan el medio ambiente y exponen a los trabajadores y consumidores a daños. Esta es la dirección prácticamente contraria hacia la cual la producción de plásticos está avanzando actualmente, con un mercado de aditivos tóxicos en auge, diseños que impiden el reciclado y un crecimiento exponencial de la producción de polímeros de un solo uso.

La solución industrial que se propone para el reciclado químico se basa en gran medida en el hecho de que se pueden separar los contaminantes de los residuos plásticos, lo que permite recuperar polímeros de calidad prácticamente virgen. Esto no responde a la pregunta de cómo lidiar con todo el material contaminado tóxico separado de los polímeros 'limpios'. Tampoco aborda el hecho de que esos polímeros recientemente reciclados se formularán con otros aditivos tóxicos antes de volverse a transformar en productos. La conversión del plástico en combustibles líquidos hará que cuando se quemen los combustibles, los contaminantes tóxicos se desplacen a la atmósfera como emisiones. A través de la despolimerización, se retirarán los aditivos tóxicos, los cuales se convertirán en un vasto reservorio de lodos residuales peligrosos. La pirólisis de los residuos plásticos para obtener hidrógeno, lleva a un rápido aumento de las dioxinas en los residuos de los desechos sólidos que genera el proceso, y así consecutivamente. Los residuos tóxicos y las emisiones producidas por estos procesos siguen reflejando una estructura económica lineal. Retirar los aditivos tóxicos de los polímeros acercaría el reciclado químico a una realidad económica circular.

Es evidente que algunas formas de reciclado químico pueden complementar el reciclado mecánico para mantener los plásticos esenciales no tóxicos dentro de la economía circular. Sin embargo, bajo las formas que adopta actualmente, se le asocian demasiados elementos de la economía lineal como para argumentar que tiene un carácter 'circular'.

EL PLÁSTICO ACELERA EL CAMBIO CLIMÁTICO

Cada una de las etapas del ciclo de vida de los plásticos genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero que impulsan el cambio climático y socavan el Acuerdo de París. El objetivo final del Acuerdo

de París es limitar el calentamiento global a un nivel por debajo de dos grados centígrados con respecto a los niveles preindustriales, buscando limitar el aumento de la temperatura a 1.5 grados centígrados, para finales de siglo (artículo 2). Dentro de este marco, los países deben revisar y restablecer objetivos ambiciosos cada cinco años (artículo 3), con un sistema quinquenal de monitoreo, verificación y notificación de las emisiones revisado por el Comité de Aplicación y Cumplimiento del Acuerdo de París (Artículos 13, 14 y 15). Además, los Estados deberán aportar fondos para alcanzar una meta de 100 mil millones de dólares para el año 2020 y deberán incluir metas de financiamiento climático en las contribuciones determinadas a nivel nacional (Artículo 5). Las emisiones atribuibles al crecimiento de la producción y eliminación de plásticos, pone en riesgo la posibilidad de alcanzar la meta del Acuerdo de París.

Aunque el enfoque tanto del Acuerdo de París como de la mayoría de las acciones nacionales ha sido sustituir los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, con energías renovables, el sector de los plásticos de la industria petroquímica en gran medida ha evitado que se le investigue. Conforme ha ido aumentando la presión sobre la industria de los combustibles fósiles por sus pasivos de carbono, el giro que se calcula que realizará hacia aumentar la producción de petroquímicos y de plásticos pone en riesgo la protección de los activos extractivos cada vez más amenazados. Sin embargo, el ciclo de vida del plástico desde la extracción, pasando por la producción, hasta la eliminación, deja una enorme huella de carbono que amenaza con crecer a un ritmo igual de acelerado que el aumento de la producción de plástico.

Una estimación de las emisiones de metano (emisiones fugitivas o fugas) procedentes de la extracción de gas natural, podría alcanzar un 9% de los volúmenes totales de la producción mundial (Tollefson, 2013). El metano es un potente gas de efecto invernadero aproximadamente 25 veces más potente que el dióxido de carbono en una escala de tiempo de 100 años en términos de su potencial de calentamiento. El etileno es un importante componente químico básico para la producción de polímeros. Cada año se producen más de 133 millones de toneladas de etileno a partir del craqueo de etano y nafta con altos niveles de emisión de carbono. Las emisiones acumuladas de gases de efecto invernadero debidas al craqueo con vapor de nafta y etano, ascienden a 1,135 y 840 kg de CO₂/tonelada de etileno, respectivamente (Ghanta *et al.*, 2014).

La incineración de residuos plásticos es, sin lugar a dudas, la mayor fuente de emisiones de CO₂ de todas las opciones de gestión del final del ciclo de vida del plástico. Con base en el consumo intensivo de energía de la pirólisis y la gasificación, el reciclaje químico, en tanto materia prima, también genera emisiones netas considerables. El proceso de convertir plástico en

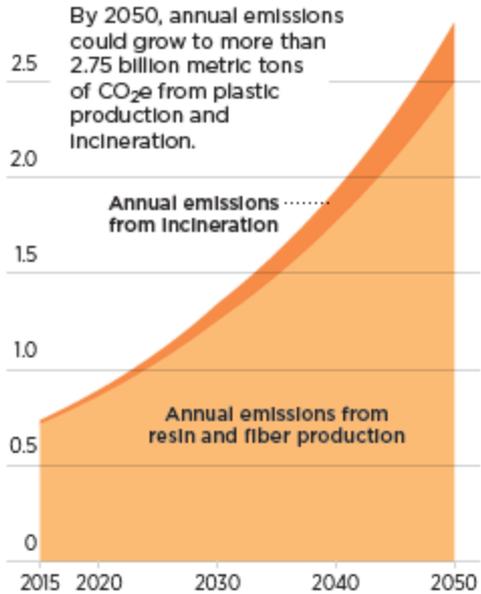
combustible a través de estas tecnologías, aumentará drásticamente las emisiones de CO₂ mucho más, ya que con esta práctica, los plásticos hechos de combustibles fósiles sólo se convierten brevemente en productos plásticos antes de que se quemem como combustibles fósiles.

Las estimaciones del Centro para el Derecho Ambiental Internacional (CIEL por sus siglas en inglés) indican que en 2019, la producción e incineración de plástico agregó más de 850 millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que equivale a las emisiones de 189 centrales eléctricas de carbón de quinientos megavatios (CIEL, 2019).

Como se observa en otras secciones de este informe, se prevé que la producción de plástico aumentará drásticamente conforme las corporaciones de petróleo y gas vayan cambien sus inversiones desde los combustibles líquidos a polímeros y petroquímicos, para así evitar las crecientes responsabilidades por la emisión de carbono asociadas con la combustión de estos combustibles. Si las tasas de crecimiento de la producción aumentan según lo previsto, CIEL calcula que para el año 2030, las emisiones de CO₂eq (dióxido de carbono equivalente)¹ aumentarán a 1.34 gigatoneladas², equivalentes a la producción de 295 nuevas centrales eléctricas de carbón de 500 megavatios (CIEL 2019). Si queremos cumplir con el objetivo del Acuerdo de París y limitar el calentamiento global a 1.5°C, entonces sólo se podrá emitir una cantidad estrictamente limitada de carbono futuro a la atmósfera. Conforme se vaya acumulando carbono en

Annual Plastic Emissions to 2050

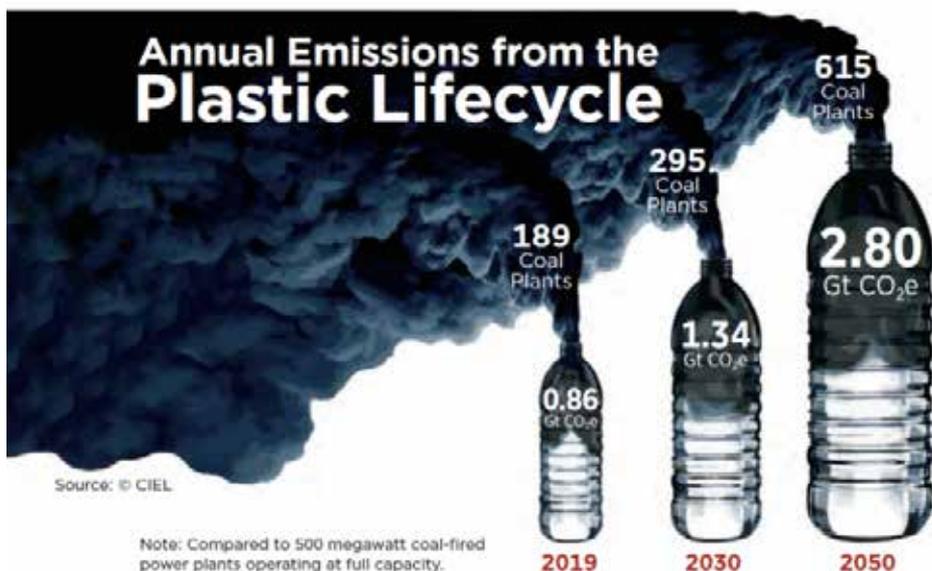
3.0 billion metric tons



Source: CIEL

1 Un equivalente del dióxido de carbono o equivalente de CO₂, abreviado como CO₂eq, es una medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios gases de efecto invernadero con base en su potencial de calentamiento global (PCG), mediante la conversión de cantidades de otros gases a la cantidad equivalente de dióxido de carbono con el mismo potencial de calentamiento global.
 2 Una gigatonelada equivale a 1 mil millones de toneladas o 1,000,000,000 de toneladas métricas.

Emissions from the Plastic Lifecycle



la atmósfera con el paso del tiempo, la cantidad de carbono ya liberada desde la revolución industrial hasta el presente no deja mucho espacio para agregar carbono adicional. A la cantidad restante de carbono que se puede añadir sin exceder el objetivo de 1.5°C se le conoce como el ‘presupuesto del carbono’. El presupuesto actual del carbono es de entre 420 y 570 gigatoneladas de carbono y se está agotando rápidamente. Para 2050, las emisiones de la producción e incineración de plástico podrían alcanzar las 56 gigatoneladas de CO₂eq, lo que equivale a entre un 10 y un 13 por ciento de la totalidad del presupuesto de carbono restante.

Esta enorme fuente de emisión no se basa completamente en el carbono emitido durante la fase de extracción y producción de petroquímicos (aunque representa la mayor fracción), sino que también es atribuible a la gestión del final del ciclo de vida de los plásticos. La incineración de residuos plásticos contribuye significativamente a las emisiones globales de CO₂eq del ciclo de vida de los plásticos. La combustión de envases de plástico en incineradores de residuos generó 16 millones de toneladas métricas de CO₂eq a nivel mundial en 2015, aunque esta cifra no incluye el destino de un 32 % adicional de envases de plástico que no entran dentro de un sistema formal de gestión de residuos que se queman al aire libre (con considerables emisiones de CO₂eq y de sustancias tóxicas) o bien se pierden para el medio ambiente (CIEL 2019).

El disponer de plásticos mezclados con residuos municipales en rellenos sanitarios puede dar lugar a algunas emisiones de CO_2 eq procedentes del plástico, aunque son de magnitudes de un orden inferior al que genera la incineración. Aunque el plástico se degrada, en cierta medida, en los rellenos sanitarios mixtos debido a las bajas condiciones de reducción del pH, permanece en gran parte intacto. Las condiciones de reducción del pH aceleran la lixiviación de aditivos tóxicos del plástico en los rellenos sanitarios, convirtiendo los aditivos en compuestos más tóxicos que contribuyen a la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales y, a final de cuentas, estos impactos ambientales tienen consecuencias mucho más graves que las emisiones relativamente pequeñas de CO_2 eq del plástico en los rellenos sanitarios. El principal motor de las emisiones de los rellenos sanitarios son los materiales orgánicos que generan metano, un potente gas de efecto invernadero. Cuando se dispone de plástico en rellenos sanitarios sin materiales orgánicos, las emisiones son muy bajas y la tasa de degradación es muy lenta a menos que se quemen en el sitio. Sin embargo, el «mono-relleno» de plásticos (rellenos sanitarios que solo contienen plástico) no es una solución a largo plazo para el problema de los residuos plásticos, aunque podría proporcionar un método provisional de almacenamiento que reduzca a un mínimo el impacto ambiental a corto plazo hasta que se desarrollen otras alternativas.

El reciclado mecánico también genera emisiones de CO_2 eq debido a los requerimientos energéticos del proceso y del transporte de los materiales. Sin embargo, si los procesos y el transporte para el reciclado mecánico se basan en las energías renovables, entonces las emisiones procedentes de este sector resultan extremadamente bajas. Además, el reciclado de polímeros elimina las emisiones necesarias para generar plástico virgen que teóricamente desplazan los plásticos reciclados. Como se discute en otra parte de este informe, la mayoría de los plásticos no se pueden reciclar económica o técnicamente y, aunado con una expansión masiva de la producción de plástico virgen, es poco probable que los plásticos reciclados reduzcan las emisiones del sector de manera significativa.

El reciclado químico del plástico en plástico, la solución que proponen las principales empresas petroquímicas para enfrentar la contaminación con plásticos, tiene una demanda de energía muy alta, particularmente para la pirólisis y la gasificación, que requieren altas temperaturas para su funcionamiento y dependen de fuentes externas de combustible para mantener el calor del proceso. La mayoría de los análisis de mercado de los productos petroquímicos procedentes de estos procesos, sugieren que se dirigirán a la producción de combustible en lugar de la producción de polímeros. Esto se debe a la alta diferencia de precios entre el plástico

virgen fabricado con productos petroquímicos de muy bajo precio y el alto costo del reciclado químico.

Si se queman los plásticos como combustible líquido producido a través del reciclado químico, se emite la totalidad del contenido de CO_2 del plástico, lo que hace que el proceso de conversión del plástico en combustible sea un emisor muy alto de emisiones de CO_2 . La huella de carbono incluye la energía utilizada en la recolección y clasificación de los residuos plásticos, la energía para calentar el proceso de pirólisis o de gasificación y la posterior quema de productos petroquímicos como combustible. Como se señala en otra parte de este informe, los bajos precios del petróleo (la principal materia prima para la producción de plástico) y la infraestructura instalada para la producción de plástico virgen pueden reducir el precio de los plásticos vírgenes hasta el punto en que el plástico reciclado lucha por competir en precio, y muchas veces lo hacen. Esto tiende a promover el uso de 'plástico para alimentar' la pirólisis y la gasificación. La producción de sustancias químicas como materias primas para el plástico en lugar de combustible líquido a partir de residuos plásticos tiene costos más altos relacionados con los procesos de purificación por los que debe pasar, lo que hace que la producción sea menos competitiva en precio que la producción de combustible.

Considerando todos estos factores, la incineración de residuos sigue siendo la fuente de emisiones más alta procedente de la gestión del final del ciclo de vida del plástico, seguida del reciclado químico mediante pirólisis y gasificación. Cuando se evalúa todo el ciclo de vida del plástico, queda claro que se debe de reducir la producción de plástico, para reducir significativamente las emisiones de CO_2 de este sector.

A pesar de las inversiones de la industria del plástico en la expansión masiva de la producción de plástico, los acuerdos globales sobre el cambio climático y las emisiones de carbono pueden llegar a ser instrumentos que restrinjan fuertemente la producción de plástico virgen para mediados de siglo.

Si los formuladores de políticas a nivel mundiales intensifican sus esfuerzos a mediano plazo y, de manera estricta, se reducen a un mínimo las futuras emisiones de carbono, potencialmente se podría restringir fuertemente, o incluso detener, la producción de plástico virgen a partir del petróleo crudo. El petróleo crudo se separa en diferentes fracciones, es decir, gases, nafta, queroseno, gasóleo, aceite lubricante, combustóleo y fracciones de residuos (asfalto). El plástico se produce a partir de la fracción de nafta del petróleo crudo. Si las fracciones utilizadas actualmente para combustible no se pueden utilizar en el futuro, puede que resulte práctica y económicamente imposible extraer sólo la fracción de nafta de la corteza

terrestre para la producción de plásticos. Dentro del marco del Acuerdo de París, las emisiones netas de CO₂ se deberán reducir a cero en una etapa posterior de este siglo (después de 2050), lo que significa que después de 2050, ya no se va a poder quemar petróleo para obtener energía combustible. En consecuencia, la extracción de petróleo crudo será poco práctica y poco económica y la nafta, una de las fracciones del petróleo crudo, dejará de estar disponible. Como resultado, es posible que a partir de 2050 ya no se puedan producir plásticos vírgenes a partir de petróleo crudo.

Sin embargo, ha estado aumentando la producción de plástico a partir de la extracción de gas a partir de la fracturación hidráulica y puede que sea técnica y económicamente factible extraer gas para la producción de plástico mientras se mantienen los combustibles derivados del petróleo dentro de la corteza terrestre. Sin embargo, el gas de esquisto también es carbono “fósil” y la incineración de residuos plásticos derivados del gas de esquisto podría resultar en emisiones netas de CO₂. La producción a largo plazo de plásticos derivados de carbono fósil no es consistente con el marco del Acuerdo de París, a menos que se dé un uso permanente de plásticos, el reciclado infinito o el almacenamiento eterno de residuos plásticos. Estos procesos son prácticamente imposibles y toxicológicamente riesgosos. Esto apunta a una posibilidad muy concreta de que la era del plástico virgen derivado de carbono fósil se termine de eliminar gradualmente alrededor del año 2050.

¿QUÉ SON LOS MONÓMEROS, LOS POLÍMEROS Y LOS PLÁSTICOS?

Los plásticos son esencialmente grandes unidades de pequeños componentes moleculares llamados ‘monómeros’ enlazados entre sí.

Los monómeros se componen de moléculas que, a su vez, son un grupo de átomos enlazados entre sí, que representan la unidad básica más pequeña de un compuesto químico que puede formar parte de una reacción química. Cuando los monómeros se unen en cadenas y/o estructuras ramificadas, se les conoce como ‘polímeros’. Los polímeros lineales (una sola cadena lineal de monómeros) y los polímeros ramificados (lineales con cadenas laterales) son termoplásticos; se suavizan cuando se calientan. Los polímeros reticulados, es decir, los polímeros con enlaces formados entre las cadenas poliméricas, ya sea entre diferentes cadenas o entre diferentes partes de la misma cadena, son termoestables y se endurecen cuando se calientan (Nkwachukwu *et al.*, 2013).

Se producen diferentes tipos de polímeros a través de unir monómeros con diferentes composiciones químicas utilizando estructuras lineales o ramificadas. Estos diferentes tipos de polímeros son lo que comúnmen-

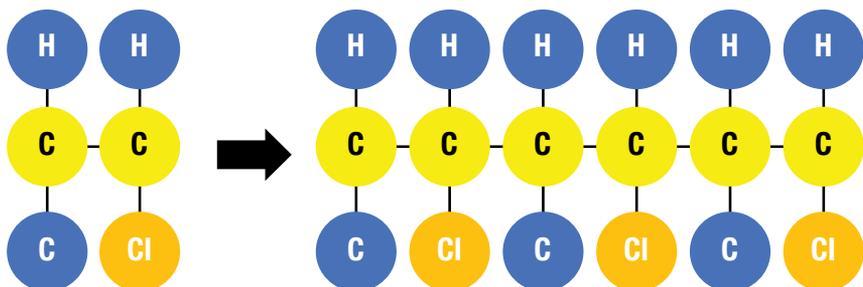


Figura 3. En esta figura, el monómero de la izquierda es cloruro de vinilo. Cuando se enlazan entre sí, las moléculas de cloruro de vinilo forman cloruro de polivinilo o PVC.

te llamamos plásticos, aunque cada polímero también tiene un nombre técnico basado en su composición química y estructural, por ejemplo, polietileno de baja densidad, cloruro de polivinilo, etcétera.

Al proceso de enlace químico de enlazar monómeros con polímeros se le llama *polimerización*. La formación de un solo polímero puede requerir miles de cadenas de monómeros. Los procesos comunes utilizados para la polimerización incluyen:

- **La polimerización por condensación** – en la cual la unión o polimerización se realiza por medio de agua, dióxido de carbono o amoníaco. Durante la condensación, se unen dos monómeros y pierden las moléculas más pequeñas de agua o metanol. Se puede revertir este proceso durante las operaciones del reciclado químico, como la *despolimerización* (ver la sección 2).
- **La polimerización por adición (poliadición)** – en la cual la unión está formada por catalizadores de alquenos como el eteno o el propeno.

Antes de que los polímeros puedan llegar a ser un producto plástico final, se les trata con aditivos químicos que le imparten al producto final ciertas propiedades consideradas deseables (resistencia a los rayos UV, flexibilidad, color, etcétera).

A esta altura, se pueden fundir, hilar, extrudir o moldear de otro modo los materiales poliméricos básicos (pellets, gránulos o escamas), que ya fueron tratados con aditivos, con el fin de fabricar el producto plástico terminado para el consumo final.

Estos elementos químicos y estructurales básicos de plásticos o polímeros adquieren importancia en los procesos de reciclado mecánico y químico, que se discuten a continuación, ya que muchos de los desafíos que enfrenta el reciclado de plástico se relacionan con la separación y reconstitución o mezcla de los polímeros.

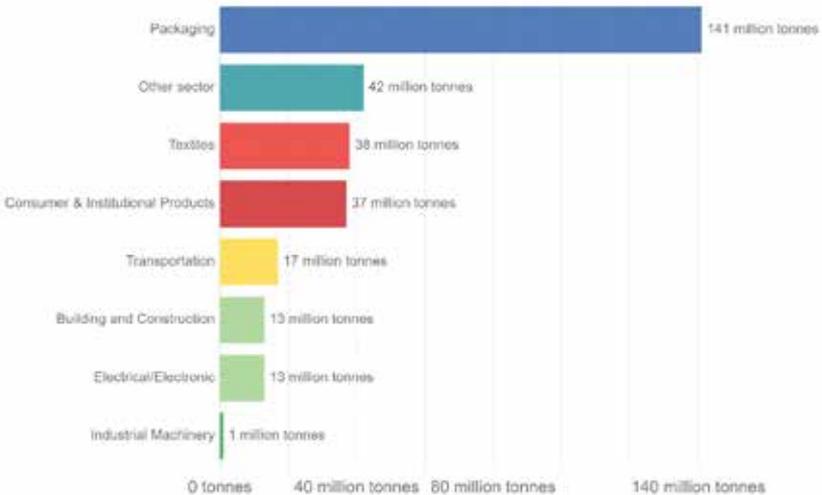
La mayoría de los plásticos producidos actualmente están hechos de materia prima petroquímica. La ingeniería química de los petroquímicos permite que se produzca una amplia gama de diferentes tipos de polímeros a escala industrial.

Un puñado de polímeros termoplásticos domina la demanda mundial de plásticos: el polipropileno (PP) (21%), el polietileno de baja densidad (PEBD/LDPE) y el polietileno lineal de baja densidad (PELBD/LLDPE) (18%), el cloruro de polivinilo (PVC) (17%), y el polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE) (15%). Otros tipos de plástico de alta demanda son el poliestireno (PS), y el PS expandido (8%), el tereftalato de polietileno (PET) (7%, excluyendo la fibra PET) y el poliuretano plástico termoestable (M.R.G. PlasticsEurope, 2008, citado en Hahladakis *et al.*, 2018).

En los sectores que generan residuos plásticos predominan los envases, los textiles, los bienes de consumo, el transporte, la construcción y la electrónica (Figura 4). Está claro que el sector de los envases es, por mucho,

Plastic waste generation by industrial sector, 2015

Global plastic waste generation by industrial sector, measured in tonnes per year.



Source: Geyer et al. (2017)

CC BY

Figura 4. Generación de residuos plásticos por el sector industrial en 2015.

el mayor generador de residuos plásticos (gran parte de los cuales son envases de un solo uso), por lo que se le ha dado especial atención a la contaminación plástica visible en el medio ambiente.

LOS ADITIVOS TÓXICOS

El uso generalizado de aditivos químicos en las formulaciones de polímeros, muchos de los cuales son inherentemente tóxicos, es un importante desafío para el reciclado de los plásticos. La combinación de aditivos que se utiliza en la producción del plástico depende de la aplicación intencional del polímero. Los analistas de la industria calculan que el mercado global de aditivos plásticos para plastificantes, retardantes de llama, antioxidantes, antimicrobianos, estabilizadores UV y agentes de soplado va a crecer de 43.82 mil millones de dólares en 2018 a 61.25 mil millones de dólares para el año 2025 (Zion, 2020). Mientras que algunos de los aditivos inertes, como las arcillas y el talco, son relativamente benignos, muchos aditivos además de ser tóxicos para los seres humanos, son contaminantes ambientales.

Los aditivos se pueden dividir en cuatro categorías principales:

- Los aditivos funcionales (estabilizadores, agentes antiestáticos, retardantes de llama, plastificantes, lubricantes, agentes antideslizantes, agentes de curado, agentes espumantes, biocidas, etcétera).
- Los colorantes (pigmentos, azocolorantes solubles, etcétera).
- Los rellenos (mica, talco, caolín, arcilla, carbonato de calcio, sulfato de bario)
- Los refuerzos (por ejemplo, fibra de vidrio, fibra de carbono).

Los aditivos utilizados más comúnmente en diferentes tipos de materiales poliméricos para envases son plastificantes, retardantes de llama, antioxidantes, adsorbentes de ácido, estabilizadores de luz y calor, lubricantes, pigmentos, agentes antiestáticos, compuestos deslizantes y estabilizadores térmicos (Hahladakis *et al.*, 2018). De los aditivos funcionales, los plastificantes, los estabilizadores y los retardantes de llama tienden a ser los más preocupantes para la salud humana, aunque algunos colorantes y rellenos también pueden ser problemáticos. A continuación se describen algunos de los aditivos funcionales más problemáticos.

Los aditivos retardantes de llama pueden ser extremadamente tóxicos y tener una alta concentración en peso en el polímero, especialmente entre los residuos más viejos de plásticos en aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y los plásticos para automóviles. Estos aditivos comúnmente con-

tienen compuestos de bromo y se conocen como retardantes de llama bromados (BFR por sus siglas en inglés). Los plásticos que contienen BFR se producen en grandes volúmenes y se les añaden retardantes de llama para reducir su inflamabilidad. En los automóviles, los plásticos en los tableros, los asientos y la tapicería, a menudo se les aplica un tratamiento fuerte de retardantes de llama con la intención de reducir el riesgo de incendios. En la electrónica, muchas veces se le aplica un tratamiento con retardantes de llama a las carcasas de los televisores y las computadoras, además del aislamiento de los cables a debido al riesgo de incendio por cortocircuitos eléctricos, etc. Se han evaluado a algunos retardantes de llama bromados [como los éteres de difenilo polibromados (PBDE) y el hexabromociclododecano (HBCD o HBCDD)] como COP y han sido prohibidos por el Convenio de Estocolmo. Estos COP bromados se conocen como COP-BFR. Otros retardantes de llama bromados pueden seguir siendo peligrosos, aunque no hayan sido evaluados como COP.

Incluso una vez prohibidos, estos aditivos siguen estando presentes en las reservas de residuos plásticos durante muchos años, ya que los productos en los que se utilizaron pueden tardar años o décadas en llegar al final de su ciclo de vida y entrar en el flujo de residuos. Los plásticos que contienen COP-BFR pueden generar una exposición peligrosa para quienes trabajan en el reciclado, incluyendo las liberaciones de dioxinas bromadas en la fase de refundición y extrusión (He *et al.*, 2015; Huang *et al.*; 2013, Tang *et al.*, 2014; Labunska *et al.*, 2013). A menos que se separen cuidadosamente de los polímeros que no están contaminados por los COP-BFR, estos COP pueden filtrarse a la cadena general del reciclado de polímeros, terminando en productos como juguetes y utensilios de cocina (IPEN, ARNIKA, 2017a) con lo cual aumenta la exposición humana, especialmente entre los niños (IPEN, ARNIKA, 2018). También se pueden filtrar a materiales que entran en contacto con alimentos y productos domésticos (Puype *et al.*, 2015). No todos los retardantes de llama son bromados. Las parafinas cloradas de cadena corta, media y larga (PCCC/PCCM/PCCL) también se han utilizado ampliamente en plásticos como plastificantes y retardantes de llama. Algunos retardantes de llama son tan tóxicos y persistentes que han sido identificados como COP y se les ha sometido a eliminación mediante el Convenio de Estocolmo. Concretamente, el hexabromobifenilo (HBB), el pentaBDE comercial, el octaBDE comercial, el decaBDE comercial, el hexabromociclododecano (HBCD) y las parafinas cloradas de cadena corta (PCCC) han quedado incluidos en los anexos del Convenio como COP.

Los aditivos plastificantes también tienen un potencial significativo que tiene un impacto sobre la salud humana. Alrededor de un 80% de todos los plastificantes se utilizan en plásticos de cloruro de polivinilo (PVC) e

incluyen parafinas cloradas de cadena corta, media y larga (PCCC/PCCM/PCCL), ftalato de diisooheptilo (DIHP), ácido 1,2-bencenodicarboxílico, di-C7-11-alquil ésteres ramificados y lineales (DHNUP), ftalato de butil bencilo (BBP), di(2-etilhexil) ftalato (DEHP), bis(2-metoxietil) ftalato (DMEP), ftalato de dibutilo (DBP), ftalato de dipentilo (DPP), di-(2-etilhexil) adipato (DEHA), dioctil adipato (DOA), dietil ftalato (DEP), diisobutilftalato (DiBP), fosfato de tris(2 cloroetil) (TCEP), ftalato de dicitclohexilo (DCHP), butil bencil ftalato (BBP), diheptil adipato (DHA), heptil adipato (HAD) y heptil octil adipato (HOA), mientras que el 20% restante se utiliza en plástico de celulosa (Hahladakis *et al.*, 2018).

El grupo de aditivos plastificantes está dominado por los ftalatos, que pueden tener impactos significativos sobre la salud cuando se lixivian o migran fuera de la estructura polimérica. También pueden tener impactos cuando el plástico llega al final de su ciclo de vida, se degrada en el medio ambiente, se lixivia en los rellenos sanitarios o se quema. Se sabe que los ftalatos son una sustancia química perturbadora del sistema endocrino (EDC) capaz de perturbar el sistema hormonal humano. Esto significa que pueden tener impactos devastadores de gran alcance sobre el feto, a lo largo del desarrollo infantil y en la edad adulta.³ Los EDC también pueden tener graves impactos sobre la capacidad de la flora, fauna y organismos acuáticos para desarrollarse y reproducirse. Los plastificantes se utilizan comúnmente en envases flexibles para alimentos y materiales que están en contacto con alimentos como aditivos para el envasado hecho de polímeros. Los ftalatos se utilizan en grandes volúmenes en el PVC.

Las EDC y sus impactos sobre la salud humana son un área creciente de la investigación científica. Según los marcos regulatorios existentes, como la relación lineal entre la dosis y la respuesta (es decir, que la dosis produce el veneno), tal cual se evalúa por medio de los marcos de evaluación de riesgos, los impactos de los EDC pueden ser impredecibles y difíciles de gestionar. Tanto los niveles extremadamente altos como los extremadamente bajos de EDC pueden afectar la salud humana, sobre todo durante el desarrollo temprano del feto y otras ventanas sensibles de desarrollo. La capacidad de impactar la salud en una relación de dosificación no lineal, desafía las evaluaciones de nivel umbral establecidas utilizadas para predecir el daño potencial de una sustancia química. Como se señaló en una publicación conjunta de la Endocrine Society (Sociedad de Endocrinología) e IPEN realizada en 2014, es evidente que existe una correlación positiva entre la producción de sustancias químicas y de plásticos y los efectos de las EDC sobre la salud humana:

3 *Introducción a los sustancias químicas que perturban el sistema endocrino (EDC)*, 2014. <https://ipen.org/documents/introduction-endocrine-disrupting-chemicals-edcs>

“Hay buenas razones para sospechar que en los últimos veinte años el aumento de la producción y uso de sustancias químicas tiene relación con la creciente incidencia de trastornos pediátricos asociados con el sistema endocrino, incluyendo problemas reproductivos masculinos (criptorquidia, hipospadía, cáncer testicular), pubertad femenina temprana, leucemia, cáncer cerebral y trastornos neuroconductuales. Al mismo tiempo, la producción global de plásticos creció de 50 millones de toneladas a mediados de la década de los años setenta a casi 300 millones en la actualidad, y las ventas de la industria química mundial experimentaron un drástico aumento desde 171 mil millones de dólares estadounidenses en 1970 hasta más de 4 billones de dólares estadounidenses en 2013. Sustancias químicas como los bifenilos policlorados (PCB), el BPA y los ftalatos actualmente son detectables en el suero, la grasa y en la sangre del cordón umbilical de los seres humanos en todo el mundo.”

Hay muchas rutas a través de las cuales los plásticos pueden liberar los aditivos de las EDC y exponer a los seres humanos. Por ejemplo, el bisfenol-A (BPA) es un plastificante que se utiliza muy comúnmente y es otra EDC conocida que se ha informado que migra a los alimentos desde los biberones de plástico de los bebés (Kubwabo *et al.*, 2009 y Nam *et al.*, 2010), el revestimiento de las latas de alimentos que se ve afectado por el calor (Goodson *et al.*, 2004) y otros tipos de envases de alimentos (Fasano *et al.*, 2012). Ya se están produciendo muchos envases de alimentos ‘libres de BPA’, pero el BPA es una sustancia química de alto volumen y común en

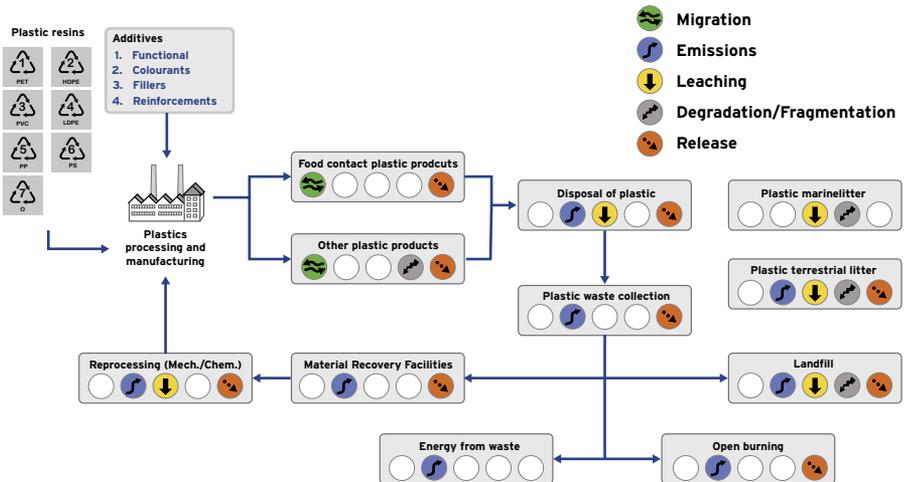


Figura 5. Las vías por las cuales los aditivos añadidos a los plásticos comunes llegan al medio ambiente. Fuente: Hahladakis *et al.* 2018

los plásticos, por lo que la exposición puede continuar desde una variedad de fuentes.

Los aditivos tóxicos del plástico ingresan al medio ambiente de diversas maneras a través de emisiones, liberaciones, degradación, lixiviación y migración (Figura 5) en muchas etapas durante la producción, el uso y el final del ciclo de vida del plástico al que se han agregado. La propensión de los aditivos a salir del polímero se incrementa por el hecho de que no están químicamente (covalentemente) ‘enlazados’ en la cadena polimérica, sino que más bien se encuentran dispersos entre los monómeros (Figura 6). Esto permite una mayor propensión a migrar fuera del polímero hacia el medio ambiente durante todas las fases del ciclo de vida de los plásticos.

Diferentes plásticos pueden lixiviar diferentes aditivos a diferentes velocidades. Si un polímero tiene una permeabilidad más alta, entonces puede lixiviar aditivos a un ritmo más acelerado. Las diferentes estructuras físicas de los plásticos, como el plástico duro cristalino o flexible gomoso, pueden afectar el proceso de lixiviación. Los polímeros más flexibles o gomosos tienen mayores espacios en la estructura del polímero y se pueden lixiviar más fácilmente que una estructura dura y cristalina. Además, un aditivo de bajo peso molecular se puede lixiviar más rápidamente de la matriz polimérica. La cantidad de aditivos que se pueden lixiviar del plástico depende de muchos factores, incluyendo los efectos del desgaste y de la temperatura, pero en última instancia está limitada por la proporción que tenga en la masa total del plástico, que puede ser sorprendentemente elevada. Más de un 40% del peso del PVC pueden ser plastificantes como los ftalatos (BLASTIC, 2019).

El reciclado mecánico no puede separar los aditivos del material reciclado que genera. El reciclado químico tiene una capacidad mucho mayor para hacerlo porque reduce los residuos plásticos a un nivel molecular, monomérico o polimérico, separándolos de los aditivos.

De todas las tecnologías para la gestión de residuos plásticos que se discuten a continuación, la oxidación en agua supercrítica y subcrítica (OASC y OASCi) son las únicas tecnologías de despolimerización que tienen una producción de materiales reciclados que no contiene residuos de aditivos químicos, un desecho rico en residuos o emisiones de aditivos tóxicos que convierten los aditivos en COP no intencionales (COPNI) (como es el caso de las tecnologías de incineración y pirólisis). Los aditivos, incluidos los COP, se destruyen en el proceso de despolimerización. La despolimerización de plásticos utilizando OASC y OASCi produce descargas de dióxido de carbono, agua, y según las materias primas que se deriven de los residuos, pueden contener sales y/u óxidos metálicos. El vapor se libera a la atmósfera. No se liberan partículas ni se requieren filtros de reducción

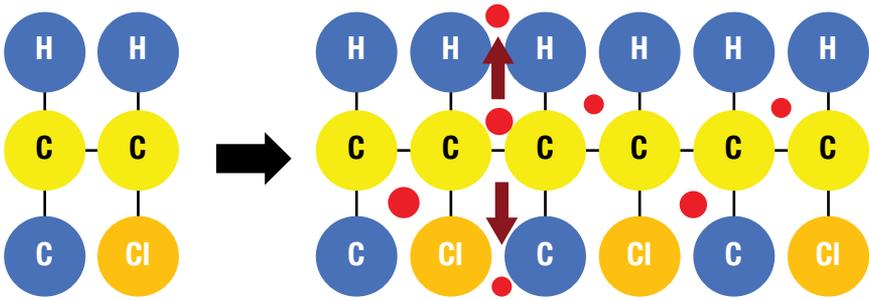


Figura 6. Los aditivos (puntos rojos) no están enlazados químicamente a la cadena de polímeros y se pueden lixiviar desde la estructura plástica.

de la contaminación. Se produce agua limpia que no requiere tratamiento previo antes de la eliminación por el drenaje (la salinidad elevada y los óxidos metálicos limitan el uso de las aguas efluentes).

ADITIVOS DE INTERÉS MUNDIAL: LOS BENZOTRIAZOLES FENÓLICOS UV-326, UV-327 y UV-328

Los aditivos estabilizadores no han recibido tanta atención en la literatura como otros aditivos, aunque recientemente han sido objeto de una creciente preocupación. Los estabilizadores de luz ultravioleta (UV) funcionan previniendo la degradación del plástico a través de la absorción competitiva de la luz UV. En el pasado, la principal preocupación se relacionaba con los estabilizadores UV a base de metales pesados en el PVC, como plomo y cadmio, que fácilmente se lixivian al medio ambiente y con justa razón.

Sin embargo, entre los reguladores de sustancias químicas existe una creciente preocupación por otro grupo de estabilizadores de rayos ultravioleta, basados en *benzotriazol fenólico* (BT). Esto se debe principalmente a que comparten una estructura fenólica que es la estructura necesaria para que las moléculas se enlacen con los receptores del estrógeno humano y, por lo tanto, potencialmente pueden perturbar la actividad del sistema endocrino. La familia BT, incluyendo UV-326, UV-327 y UV-328 también demuestran propiedades tóxicas, persistentes y bioacumulativas.

Se ha comprobado que el estabilizador *benzotriazol* UV-328 (2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4,6-ditertpentilfenol) presenta propiedades tóxicas, persistentes y bioacumulativas (TPB) tales que puede llegar a reunir los criterios estipulados por el Convenio de Estocolmo para su clasificación como sustancia COP. Esto ha dado lugar a una propuesta presentada por

Suiza (PNUMA, 2020) de incluir el compuesto fenólico UV-328 en la lista del anexo A del Convenio de Estocolmo lo cual, de lograrse, daría lugar a su clasificación como COP y lo sometería a eliminación mundial.

El Comité de Estados Miembros de la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA)⁴ también ha identificado el compuesto fenólico UV-328 como sustancia extremadamente preocupante (SVHC) y la añadió a la 'Lista de autorización' del Anexo XIV del Reglamento del Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Mezclas Químicas (REACH), con fecha de caducidad del 27 de noviembre de 2023. Todos los usos posteriores a esta fecha, requerirán de una autorización formal de la ECHA.

A la lista de autorización también se han añadido otros estabilizadores similares del grupo de los *benzotriazoles fenólicos*, incluyendo UV-320, UV-327 y UV-350. Todos estos estabilizadores cumplen los criterios del reglamento REACH para las sustancias PBT y las sustancias muy persistentes y muy bioacumulativas (vPvB) y quedaron confirmados como parte de la lista de autorización en febrero de 2020.⁵ El estabilizador UV-328 es altamente hidrofóbico y la materia orgánica lo adsorbe y/o absorbe fuertemente, además tiene una baja tendencia a volatilizarse. Cuando se libera al agua, es probable que se divida en partículas y materia orgánica, y se suspenda o deposite. Los datos experimentales y estimados indican que el estabilizador UV-328 no se degrada rápidamente en agua, suelo, o sedimentos. Décadas después de que se detuviera la liberación, se ha detectado UV-328 en sedimentos (junto con UV-327) cercanos a un sitio de liberación industrial en la Bahía Narragansett, en Estados Unidos (Cantwell *et al.*, 2015). Múltiples estudios han detectado UV-328 en la vida acuática, en alimentos y en el tejido adiposo humano (PNUMA, 2020).

Se puede transportar UV-328 y benzotriazoles relacionados (es decir, UV-326 y UV-327) a largas distancias en pellets de resina plástica y fragmentos de plástico, especialmente en ambientes acuáticos, como resultado se les ha detectado en plásticos en islas remotas (IPW, 2020). También se han detectado en fragmentos de plástico ingeridos por aves marinas (Tanaka *et al.*, 2019). Además, se encontró que se acumulan en el aceite de la glándula uropígea de aves marinas silvestres de islas remotas debido a la ingesta de plástico (Tanaka *et al.*, 2020), indicando su carácter bioacumulativo. Se considera que tanto el compuesto fenólico UV-328 como los estabilizadores BT asociados son tóxicos para los mamíferos, son peligrosos para la salud humana y el medio ambiente, ya que pueden causar daños al hígado y a los riñones a través de la exposición oral prolongada o

4 <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.043.062>

5 ECHA. *Estimating the number and types of applications for 11 substances added to the Authorisation List in February 2020*. (2020) doi:10.2823/11134.

repetida (PNUMA, 2020). La propuesta que presentó Suiza al Convenio de Estocolmo también señala que la modelización farmacocinética indica que el tracto gastrointestinal absorbe los estabilizadores UV basados en BT, como UV-326, UV-327 y UV-328, los cuales se metabolizan en el hígado y se excretan a través de los riñones, lo cual puede causar toxicidad hepática y renal (PNUMA, 2020).

Hay altos niveles de preocupación con respecto a UV-328, UV-326 y UV-327, tanto por sus propiedades PBT, pero también debido a su uso generalizado en plásticos comunes que permite altos niveles de exposición humana y ambiental. UV-328 es un producto químico con un alto volumen de producción (se producen decenas de miles de toneladas a nivel mundial) que se utiliza como estabilizador UV en plásticos. Una amplia gama de tipos de polímeros y tipos de plásticos incorporan UV-328, incluyendo: las películas adherentes de poliolefina y plástico (como las envolturas plásticas adherentes para alimentos), los muebles de plástico para exteriores, la resina ABS, la resina epóxica, la resina de fibra, el PVC (como materiales de construcción y envases para alimentos), los poliésteres insaturados, los poliácridatos (como pinturas, textiles, acabados de cuero) y los policarbonatos. Se recomienda particularmente como absorbente de UV para poliolefinas (como tapas de botellas, botellas de plástico, envolturas plásticas), poliuretanos, PVC, poliácridatos, epoxi y elastómeros.⁶ El estabilizador UV-328 es un aditivo plástico de alto volumen con producción y/o importación en el Espacio Económico Europeo dentro de un rango de 100-1000 t/a y 450-4,500 t/a en los Estados Unidos.⁷

Un estudio reciente⁸ de International Pellet Watch sustentó la naturaleza ubicua de los estabilizadores UV BT en el plástico. Se realizó un muestreo de fragmentos de plástico de basura marina recolectados en costas remotas y se analizaron los fragmentos para detectar la presencia de aditivos estabilizadores UV. Los resultados demostraron que, si bien se detectó UV-328 en muchas de las muestras, la mayoría de los fragmentos mostraron la presencia de concentraciones más altas de UV-326 y UV-327 (ver Figuras 8 y 9).

Las agencias reguladoras para la gestión de sustancias químicas están cada vez más preocupadas por las propiedades tóxicas, persistentes y bioacumulativas de los estabilizadores de UV con benzotriazol. Mientras que algunos de los estabilizadores de UV con benzotriazol exhiben características de PBT en menor o mayor grado (el estabilizador UV-328 se ha evaluado actualmente como el más peligroso), se debe de aplicar el

6 Ibid.

7 ECHA. High-volume plastic additives mapped. (2019).

8 International Pellet Watch (2020) Global survey of benzotriazole-type UV stabilizers in microplastics (pellets and fragments) unpublished data.

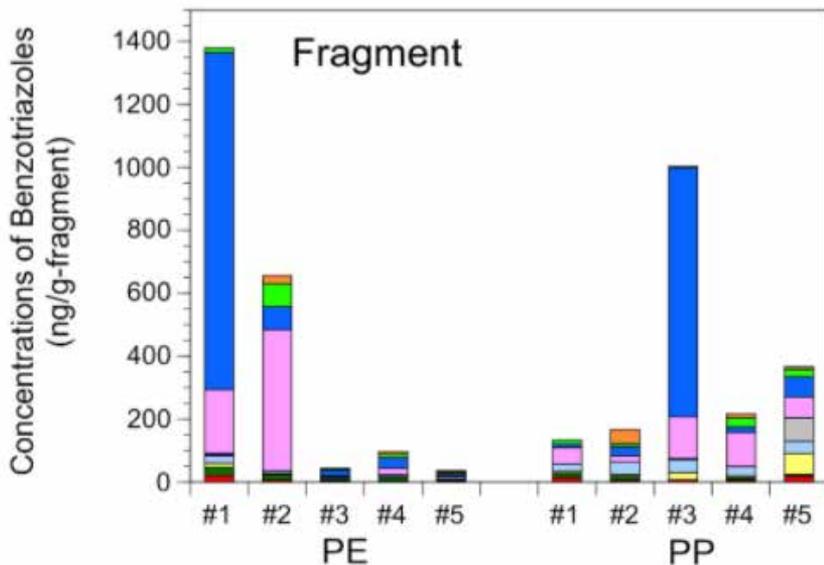


Figura 7. Estabilizadores UV de benzotriazol (BT) en 5 fragmentos de polietileno y polipropileno de zonas costeras remotas. Fuente: International Pellet Watch 2020

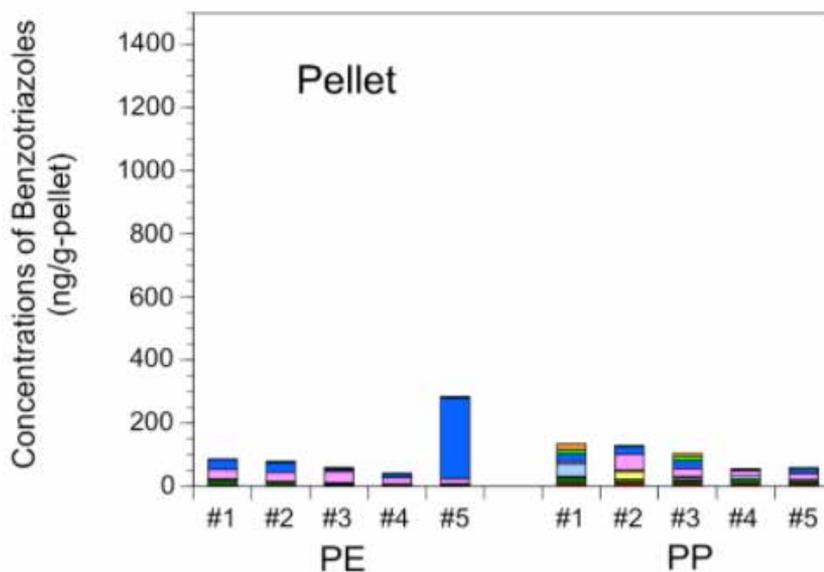


Figura 8. Estabilizadores BT UV en muestras de pellets de zonas costeras remotas. Fuente: IPW 2020

principio precautorio y avanzar hacia la rápida eliminación de esta familia de estabilizadores de UV.

Si se evalúa el estabilizador UV-328 como COP y se le incluye en los anexos del Convenio de Estocolmo, la industria del reciclado de plástico tendrá que desarrollar sistemas de detección para garantizar que esta sustancia química no contamine la corriente del reciclado y se recircule en productos nuevos producidos con plástico reciclado. Además, la gestión de los residuos plásticos contaminados con COP requiere que se destruyan o transformen de manera irreversible para que no presenten características de COP. Dada la producción de alto volumen y el uso como aditivos en una amplia variedad de polímeros, es importante que se acelere el proceso de evaluación y eliminación gradual de la familia de estabilizadores de BT.

EL RECICLADO DE PLÁSTICO

Conforme va aumentando la presión de lidiar con los residuos plásticos día a día, a la par van surgiendo nuevas tecnologías y conceptos para la gestión de residuos plásticos. Muchas de estas supuestas soluciones conducen a mayores problemas de contaminación o sencillamente no funcionan. Otras parecen estar completamente en conflicto con la posibilidad de un futuro en donde se limite la producción de carbono. Sin embargo, otras soluciones parecen ignorar el hecho de que muchos plásticos contienen aditivos químicos tóxicos y redirigen estos materiales hacia escenarios inapropiados, con lo cual aumenta la exposición humana. Es poco probable que se pueda abordar la gran variabilidad en los residuos plásticos con una solución técnica única y milagrosa. La realidad es que se necesitan múltiples enfoques técnicos y sociales, y se va a tener que utilizar un amplio rango de criterios para evaluar su capacidad para producir resultados ambientalmente racionales. Los criterios deberán incluir los productos tóxicos y la redistribución de sustancias tóxicas, la huella de carbono, la capacidad de contribuir a una economía circular y a la justicia ambiental (no descartar residuos plásticos en países y comunidades de bajos ingresos), entre otros.

Los enfoques existentes y emergentes para la gestión de residuos plásticos que algunos afirman que son soluciones al problema de los residuos plásticos incluyen:

- el reciclado mecánico;
- el reciclado químico;
- el infra-reciclado (su uso en el encarpentamiento de vialidades, etcétera);

- plástico para producir combustible;
- plástico para generar energía (incineración de residuos);
- la reutilización;
- los rellenos sanitarios

Este informe se enfoca en el reciclado mecánico y químico y los enfoques relacionados que tienen que ver con la conversión del plástico en combustible. Sin embargo, no se puede hacer una comparación significativa de estos enfoques sin reconocer que muchos plásticos no son de naturaleza benigna. De hecho, el gobierno canadiense planea incluir los plásticos como tóxicos bajo la Lista 1 de la Ley Canadiense para la Protección del Medio Ambiente (CEPA por sus siglas en inglés), para permitir la prohibición de ciertos usos de los polímeros.⁹

Como se señaló anteriormente, con el fin de dotarles ciertas características específicas (color, flexibilidad, durabilidad, resistencia al fuego, etcétera), a muchos polímeros se les añaden aditivos químicos que son tóxicos y peligrosos. Además, grandes volúmenes de plásticos quedan impregnados de sustancias químicas que pertenecen al grupo de sustancias químicas extremadamente tóxicas conocidas como contaminantes orgánicos persistentes (COP). Estos plásticos no se deberán reciclar en absoluto y se les deberá destruir, a menos que puedan ser descontaminados.

Esto significa que un enfoque de gestión que pueda ser adecuado para una botella de plástico de PET para agua puede ser completamente inapropiado para el tablero de plástico de un automóvil que contiene un alto porcentaje de COP, como los retardantes de llama bromados. Las investigaciones demuestran que muchos de estos plásticos contaminados con COP 'lixivian' COP a su entorno mientras están en uso, contaminando el polvo de las casas, los interiores de los automóviles y los espacios de las oficinas (Whitehead *et al.*, 2013). La concentración de estos plásticos como residuos en plantas para el manejo de contaminantes, en tecnologías de procesamiento y en productos reciclados puede causar la contaminación no intencional y extremadamente peligrosa de centros de trabajo, emisiones, exposiciones y productos, ya que se pueden lixiviar los COP y adsorberse en el polvo de estos entornos (Bi *et al.*, 2010). La sección 5 describe de manera más detallada las opciones para la gestión de los plásticos contaminados con COP al final de su ciclo de vida.

⁹ <https://www.theglobeandmail.com/canada/article-ottawa-set-to-declare-plastics-as-toxic-substance/>
<https://www.canada.ca/en/health-canada/services/chemical-substances/other-chemical-substances-interest/plastic-pollution.html>

Durante décadas, el sector del reciclado mecánico prácticamente ha dominado el reciclado del plástico por completo, ya que clasifica, limpia, tritura, extruye y peletiza los polímeros reconvirtiéndolos en materia prima para el sector de fabricación de plástico o bien suministra materiales reciclados de plástico para diversas formas de infra-reciclado. El reciclado químico (para la producción de polímeros o combustibles) se ha limitado principalmente a ensayos, para los cuales se han instalado unas cuantas plantas piloto. Las plantas de oxidación en agua supercrítica para la despolimerización especializada llevan alrededor de 20 años de operación.

A pesar de estos esfuerzos, el reciclado de plástico ha tenido un impacto mínimo sobre la reducción de la contaminación ambiental con plásticos, y su impacto sobre la sustitución de polímeros y la reducción de la producción general de plástico virgen ha sido aún menor. Cuando los precios del petróleo son bajos, es extremadamente difícil que el plástico reciclado compita con los materiales vírgenes. Los estimados¹⁰ sugieren que, en 2015, las tasas mundiales de reciclado de plástico fueron de un 19.5% en comparación con las tasas de incineración del 25.5 % y las tasas de eliminación de residuos en tiraderos a cielo abierto/rellenos sanitarios fueron de un 55% (Figura 13). La extrapolación de las tendencias actuales a 2050, vería un aumento de un 44% en el reciclado, aunque la incineración aumentaría a un 50% de todo el plástico producido ese año. Con base en la proyección de una producción de plástico de 1,800 millones de toneladas prevista para el año 2050 (Ryan, 2015) y la extrapolación de las tendencias actuales de los métodos de eliminación (Geyer, 2017), se prevé que se incinerarán aproximadamente *900 millones de toneladas de plástico* ese mismo año. Estas cifras infieren que la incineración sustituirá principalmente a los rellenos sanitarios y la quema a cielo abierto, que se reducirán a un 6% de todo el plástico producido. Sin embargo, ese 6% sigue representando la impactante cifra de 108 millones de toneladas de residuos plásticos destinados a entrar en el medio ambiente o a la quema a cielo abierto tan solo en el año 2050.

¿LOS RESIDUOS REALMENTE SE RECICLAN O TAN SOLO SE EXPORTAN?

Aunque gran parte de la siguiente discusión gira en torno a cuestiones técnicas que detallan qué tecnologías pueden reciclar qué polímeros por medio de diferentes técnicas, se debe reconocer que hay que tomar en cuenta el aspecto internacional de la justicia ambiental. La mayoría de los países de ingresos bajos no cuentan con la capacidad financiera o técnica para instalar una infraestructura sofisticada para el reciclado. Muchos ni

¹⁰ <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

siquiera tienen la capacidad financiera para construir rellenos sanitarios adecuados. Es común ver imágenes de ríos llenos de residuos plásticos que van a desembocar al mar. En tierra firme, se tiran grandes cantidades de residuos plásticos en rellenos sanitarios o bien se les quema a cielo abierto en un esfuerzo por reducir el volumen de residuos. La quema de residuos plásticos genera compuestos tóxicos transportados por el aire que llevan a la exposición de grandes poblaciones. Las sustancias químicas tóxicas, incluyendo los COP, se acumulan en el suelo y contaminan la cadena alimentaria, a veces a niveles extraordinarios. Los estudios de IPEN sobre la eliminación de residuos plásticos tanto en rellenos sanitarios como a través de la quema a cielo abierto en Ghana¹¹ e Indonesia^{12,13,14}, demuestran una grave contaminación de la cadena alimentaria con COP, como dioxinas, a niveles que sólo se observan en sitios en Vietnam altamente contaminados con el agente naranja.

Los países ricos exacerban dramáticamente este problema al exportar residuos plásticos a países de bajos ingresos bajo el pretexto de que es material para reciclar, a sabiendas de que los países a los que le exportan los residuos tienen una capacidad muy limitada para reciclar el plástico. En muchos casos, los residuos exportados contienen grandes volúmenes de plástico que no se pueden reciclar técnica o económicamente en ningún lugar. Una gran proporción de los residuos plásticos que causaron la contaminación de la cadena alimentaria revelada en los informes de IPEN fueron importados de países ricos. Durante décadas, los ciudadanos de muchos países desarrollados han separado responsablemente sus residuos para la recolección en la acera, suponiendo que el plástico se estaba reciclando en su propio país. La realidad es que gran parte del plástico se exporta, se deposita en rellenos sanitarios o se incinera.

Cuando China implementó su Política de la Espada Nacional en enero de 2018, cuyo objetivo es bloquear las importaciones de residuos plásticos mezclados y contaminados, los países ricos trasladaron sus exportaciones a países del sudeste asiático, incluyendo Tailandia, Vietnam, Malasia, Indonesia y Filipinas. Dentro de los dos primeros años, muchos de estos países comenzaron a rechazar estos cargamentos debido a sus altos niveles de contaminación y a que contaban con medios limitados para gestionar incluso el contenido reciclable. A su vez, esto ha vuelto a enfocar la atención en los países ricos para que se hagan cargo de sus propios residuos plásticos y en los productores de plástico que ahora están batallando

11 https://www.researchgate.net/publication/332594125_Persistent_Organic_Pollutants_POPs_in_Eggs_Report_from_Africa/download

12 <https://ipen.org/news/plastic-waste-poisons-indonesia%E2%80%99s-food-chain>

13 <https://www.nytimes.com/2019/11/14/world/asia/indonesia-tofu-dioxin-plastic.html>

14 <https://www.theguardian.com/global-development/2019/nov/15/indonesias-food-chain-turns-toxic-as-plastic-waste-exports-flood-in>



Figura 9. Recolectores de residuos, Nueva Delhi. Fuente: Altaf Qadri

por apaciguar la opinión pública con ‘soluciones’ al problema que ellos mismos han creado. El enfoque principal de los productores de plástico es proponer una expansión y aceleración a gran escala de tecnologías para el reciclado químico de residuos plásticos. El análisis de este informe demuestra que el reciclado químico dentro del contexto de la crisis actual es en gran medida una distracción de relaciones públicas que tendrá un impacto insignificante sobre el problema de los residuos plásticos.

EL RECICLADO DE PLÁSTICOS EN PAÍSES DE BAJOS INGRESOS

La gestión ambientalmente racional de los residuos plásticos requiere de sistemas cuidadosamente diseñados de recolección, separación y limpieza o pretratamiento de los residuos municipales e industriales, antes de que se pueda realizar el proceso principal del reciclado. En los países ricos, estos sistemas van desde un nivel deficiente hasta uno adecuado y reflejan tasas de reciclado relativamente deficientes para la mayoría de los tipos de polímeros. Sin embargo, los países de bajos ingresos cuentan con muy poca infraestructura primaria o ‘frontal’ para el reciclado, o si cuentan con ella, es muy diferente de la que existe en los países ricos. En los países de bajos ingresos, son las personas que trabajan recogiendo y seleccionando residuos para su venta (“pepenadores” en México, “cirujas o cartoneros” en Argentina, o “tiradores” en Brasil; N. del T.) quienes realizan gran parte de la recolección y separación.



Figura 10. Molienda, separación por flotación y clasificación por recolectores informales de residuos, India. Fuente: Haarman y Gasser 2016

Las personas que se dedican a recoger basura suelen pertenecer a poblaciones vulnerables y ser mal pagadas; recogen manualmente material reciclable de las calles, de los tiraderos de basura a cielo abierto y de los rellenos sanitarios conforme van llegando los camiones de basura a descargar la basura. Por lo general, no cuentan con un equipo de protección efectivo y se exponen a materiales contaminados, a enfermedades y corren el riesgo de sufrir lesiones. A pesar de su vulnerabilidad y de la forma informal en la que recolectan materiales reciclables de la basura, resultan sorprendentemente efectivos y en algunos países están en la primera línea de los esfuerzos nacionales del reciclado. En términos generales, su motivación no es proteger el medio ambiente; tienen preocupaciones mucho más apremiantes, como comprar comida y tener un lugar donde sobrevivir. Deben innovar para sobrevivir, y a través de sus redes informales, han desarrollado algunas técnicas sencillas para el procesamiento y separación de polímeros complejos.

En la India, el sector informal del reciclado de residuos plásticos ha desarrollado una gama de pruebas para identificar y separar diferentes polímeros, incluyendo los plásticos contaminados con BFR procedentes de residuos en aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Algunas de las técnicas son muy peligrosas cuando se llevan a cabo repetidamente, como la prueba de Beilstein para identificar plásticos bromados. Esta prueba involucra calentar el alambre de cobre con la llama de un encendedor de cigarrillos hasta que resplandezca y ponerlo en contacto con una escama



Una pareja en la aldea de Bangun recoge restos de plástico para vender. Los recicladores compran pequeñas cantidades de plásticos reciclables, la chatarra de baja calidad se vende a las fábricas locales donde se usa para obtener combustible. Foto: Nexus3

de plástico, para después llevarlo a la llama nuevamente. Una llama verde indica la presencia de halógenos y se caracteriza como una prueba de Beilstein positiva (Haarman y Gasser, 2016). Este proceso tiene un alto potencial de liberar gases tóxicos y dioxinas bromadas. Otras pruebas de separación basadas en la flotación y las diferentes densidades de los polímeros también permiten una separación eficiente sin tales riesgos agudos (aunque es probable que haya contaminación en las áreas de procesamiento).

En Indonesia, algunas aldeas han recurrido a la ‘agricultura de plástico’ para complementar los ingresos agrícolas. Las pacas de residuos de papel exportadas desde el Reino Unido, Australia y Canadá contienen un alto grado de contaminación con residuos plásticos, una pequeña fracción de estos contaminantes tiene valor como polímeros reciclables. Las fábricas de papel que importan pacas para reciclar, tiran cargamentos completos

Figura 11. Humo de fábricas de tofu que queman plástico en Tropodo, Indonesia.
Fuente: Ecoton

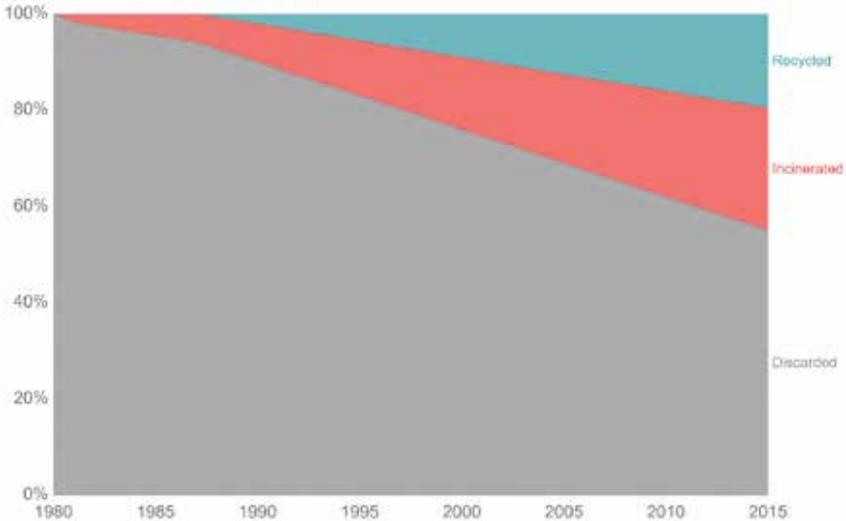


Figura 12. Reciclaje informal de residuos plásticos, Bangun, Indonesia.
Fuente: Ecoton

Global plastic waste by disposal

Estimated share of global plastic waste by disposal method

Our World
in Data



Source: Geyer et al. (2017)

CC BY

Figura 13. Residuos plásticos reciclados, incinerados o tirados en basureros 1980 - 2015. Fuente: Geyer *et al.* 2017, citado en Our world in Data.

de contaminantes plásticos en los pueblos locales por una pequeña tarifa o de forma gratuita. Los habitantes del pueblo recogen y seleccionan los residuos y obtienen una pequeña cantidad de ingresos por el contenido reciclable con lo cual complementan sus ingresos agrícolas. Sin embargo, la gran mayoría del material se tira y se quema en los alrededores del pueblo. En algunos casos, los residuos plásticos incluso se queman para combustible en fábricas que emiten humo negro tóxico y contaminan el medio ambiente local.

El muestreo de huevos de gallina de corral por parte de IPEN y las organizaciones asociadas Ecoton y la Fundación Nexus3, en los poblados de Tropodo y Bangun, en Indonesia¹⁵, encontró que la quema de residuos plásticos en los hornos para la producción de tofu y al aire libre, respectivamente, causa una grave contaminación de la cadena alimentaria (Figuras 12 y 13). Los niveles de dioxinas altamente tóxicas encontrados en los huevos se encuentran entre los más altos que se haya registrado en Asia.

Aunque existen algunos estudios de caso sobre técnicas innovadoras y reciclado eficiente, la realidad para muchas de las personas que se dedican

¹⁵ <https://ipen.org/news/plastic-waste-poisons-indonesia%E2%80%99s-food-chain>

a recoger basura en los países en desarrollo es una vida de trabajo mal remunerado, arriesgado y sucio. El impacto de la basura que se recoge y selecciona es que se contamina tanto su medio ambiente como su cadena alimentaria, lo que expone a las futuras generaciones a sustancias químicas tóxicas. El impulso que las corporaciones le están dando actualmente al reciclado químico de alta tecnología, que requiere de altos niveles de capital y de energía, tendrá un pequeño impacto sobre los ingresos, las condiciones de trabajo y los resultados que obtengan las personas que recogen basura y sus comunidades, ya que son recolectores y no procesadores.

Los países de bajos ingresos ciertamente necesitan implementar sistemas de gestión ambientalmente racional de residuos con una infraestructura de reciclado adecuada. También se necesitan salarios dignos y condiciones de protección para los trabajadores del reciclado. La regulación de la exportación de residuos plásticos de baja calidad de los países ricos a los de bajos ingresos debería ser más estricta y basarse en la aplicación de la enmienda en materia de plásticos del Convenio de Basilea que se acordó recientemente. Cuando la enmienda entre en vigor en enero de 2021, los países ricos ya no podrán exportar este tipo de residuos plásticos mixtos de bajo valor a países de bajos ingresos con el consentimiento fundamentado previo de la parte importadora. La exportación de residuos plásticos que presenten características de desechos peligrosos, quedó prohibida por la Enmienda de Prohibición de Basilea que entró en vigor el 19 de diciembre de 2019.¹⁶ Sin embargo, a pesar de todas estas disposiciones, las enmiendas no lograrán evitar la contaminación a gran escala del medio ambiente con residuos plásticos. Solo un tope a la expansión sin precedentes de la producción de plástico podrá comenzar a abordar el problema central de los residuos plásticos.

¿QUÉ TIPOS DE PLÁSTICO SE RECICLAN EN VERDAD Y CUÁLES NO?

La respuesta depende, en cierta medida, del país en el que se viva. Como se señaló en la sección anterior, los países de bajos ingresos carecen de la infraestructura desarrollada para reciclar incluso los polímeros más fáciles de reciclar. Gran parte de los residuos plásticos terminan en el medio ambiente, quemados o bloqueando las vías fluviales y contaminando el océano. En los países ricos, que cuentan con una infraestructura adecuada para la gestión de residuos, es posible que se recicle una mayor cantidad de residuos plásticos, aunque las condiciones del mercado actualmente garantizan que se incineren grandes cantidades de residuos plásticos, que se depositen en rellenos sanitarios, o bien que se exporten. Por lo general,

¹⁶ <https://ipen.org/documents/basel-ban-amendment-guide>

la cuestión no es lo que sí se pueda reciclar técnicamente, sino más bien lo que se puede reciclar de manera económica.

La mayoría de los plásticos que se etiquetan como reciclables con un símbolo triangular de rotación de tres flecha con el número del código de la resina en el centro (ver Figura 14), no son económicamente reciclables y se convierten en residuos. Los polímeros que más se reciclan son el PET (RC 1) y el HDPE (RC 2). Los polímeros como el PVC (RC 3) y el polipropileno (RC 5), por lo general, no se aceptan para su reciclado. El poliestireno (RC 6) también tiene bajas tasas de reciclado. La Sociedad de la Industria del Plástico (SPI por sus siglas en inglés) desarrolló los códigos de identificación de las resinas y el símbolo del reciclaje en un momento en que las prohibiciones regulatorias sobre algunos tipos de plástico estaban ganando terreno. Se les diseñó para que los consumidores se enfocaran en el tema del reciclado y no en el tema de los impactos ambientales de los plásticos. Sin embargo, al interior de la industria del plástico no se consideró viable el reciclaje, y la investigación sugiere que la SPI no creía que el reciclaje pudiera ser económicamente viable.¹⁷

Desde hace mucho, la industria del plástico ha utilizado los códigos de identificación de las resinas en el símbolo de reciclaje para convencer a los consumidores de que el plástico es reciclable. La realidad es que se trata de una engañosa estrategia de mercadotecnia para evitar que se prohíban los plásticos. Aunque técnicamente se pueden reciclar muchos polímeros bajo condiciones de laboratorio, la realidad es que a la economía del reciclaje a escala comercial no le salen las cuentas. Una limitación clave es la capacidad de los materiales reciclados para competir con los polímeros vírgenes en el mercado. Cuando bajan los precios del petróleo, no tiene cómo competir el componente petroquímico del plástico, es decir, los materiales reciclados. Aunque pudieran competir, el mercado de los plásticos reciclados es débil debido a las preocupaciones sobre la funcionalidad de los polímeros reciclados en comparación con los polímeros vírgenes. A pesar de estas barreras, parte del plástico se recicla o se infra-recicla en nuevos usos.

Los residuos plásticos preferidos para el reciclado son los residuos plásticos pos-industriales (PI), como los cilindros para el moldeo por inyección, los cambios de estado de los residuos de la producción, los cortes y los recortes, ya que están relativamente libres de contaminación y a menudo se producen como “mono-corrientes” de polímeros, que no están contaminadas por otros polímeros y no han estado sujetas a degradación debido al uso y el desgaste (Ignatyev *et al.*, 2014).

17 <https://www.pbs.org/wgbh/frontline/film/plastic-wars/>

Los residuos plásticos limpios de la fase del post-consumo son el siguiente insumo preferido para el reciclado, aunque en realidad, la mayoría de los residuos plásticos post-consumo son polímeros mixtos con diversos grados de contaminación, tanto con residuos orgánicos como con polímeros. Sin lugar a duda, la mayor parte de los residuos plásticos procede de los envases (que también representan la mayor parte de la producción), y está dominada por los cinco plásticos que se producen a mayor volumen a nivel mundial: el polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE), el polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE), el polipropileno (PP), el tereftalato de polietileno (PET) y el policloruro de vinilo (PVC).

En teoría, la mayoría de los plásticos son reciclables. Sin embargo, como se explica en las secciones a continuación, existen muchas barreras técnicas y económicas que obstaculizan el reciclado de plásticos, incluyendo el uso de energía, la contaminación, los aditivos tóxicos y las construcciones laminadas. Sin embargo, en la Figura 14 se identifican los polímeros potencialmente reciclables mediante símbolos de reciclaje desarrollados en 1988 por la Sociedad de la Industria del Plástico (SPI por sus siglas en inglés). En realidad, comúnmente sólo se reciclan los códigos de identificación de la resina RC 1 y 2. Aunque técnicamente se pueden reciclar otros polímeros RC en un laboratorio, una serie de razones, incluyendo el aspecto económico, mitiga la capacidad de reciclarlos de manera viable.

En general, cuanto más bajo sea el número del código de identificación de la resina (RC por sus siglas en inglés), existe una mayor probabilidad de que se le recicle. En realidad, esto se traduce en PET y HDPE. Cuanto más alto sea el código RC, es menor la probabilidad de que se recicle el plástico debido a razones económicas o ambientales. El poliestireno (RC 6) adopta tanto una forma rígida (envases de yogur, cubiertos de plástico y cajas para CD) como forma de espuma. La espuma de poliestireno expandido (EPS) se utiliza para tazas desechables para café, aislamiento para refrigeradores y embalaje de productos electrónicos. Es diferente de la Styrofoam™ que es un poliestireno extruido de celdas cerradas (XPS) utilizado en el aislamiento de edificios. Una fracción significativa del XPS existente contiene COP-BFR para limitar el potencial de que se den incendios en los edificios. Aunque en 2019 expiró la exención del Convenio de Estocolmo que permite el uso del hexabromociclododecano BFR (HBCD) en los aislantes para edificios (lo que significa que ya no se le puede agregar al XPS), durante décadas se va a tener que gestionar el HBCD, mientras que los edificios construidos en las últimas décadas llegan al final de su ciclo de vida y se les demuela en el futuro. El código RC 7 incluye estireno acrilonitrilo (SAN), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC) y nylon, los cuales rara vez se reciclan mediante procesos mecánicos.

PLASTIC RESIN CODES



Figura 14. Polímeros potencialmente reciclables. SPI 1988

Un RC bajo no necesariamente hace que el polímero sea fácil de reciclar. Por ejemplo, las películas plásticas, las envolturas plásticas y las bolsas de plástico delgadas que utilizan polietileno de baja densidad (RC4), a menudo obstruyen la maquinaria del proceso de reciclado cuando se mezclan con plásticos más pesados, lo que resulta en bajas tasas de reciclado para este polímero.

En términos de los bienes de consumo, se utilizan los siguientes polímeros para productos específicos, aunque comúnmente sólo se reciclan RC 1 y RC 2:

- **El código de resina 1:** El PET típicamente incluye botellas para bebidas, recipientes médicos y tazas. El PET reciclado se puede transformar en fibra para relleno de abrigos de invierno, sacos de dormir y chalecos salvavidas.

- **El código de resina 2:** El HDPE es uno de los plásticos post-consumo que se reciclan más comúnmente. Es el plástico rígido que se utiliza para hacer envases para la leche, botellas de detergente líquido y aceite de motor, juguetes y algunas bolsas de plástico.
- **El código de resina 3:** El PVC incluye plásticos rígidos como tuberías y tubos, pero también envolturas de alimentos, botellas para aceite vegetal y paquetes de blíster, cortinas para la regadera, tubos médicos y tableros de automóviles.
- **El código de resina 4:** El LDPE es ligero, delgado y flexible, y se utiliza comúnmente para los sujetadores de los paquetes de cerveza de seis unidades y para bolsas de plástico, incluyendo bolsas de cierre con cremallera.
- **El código de resina 5:** El PP se utiliza en recipientes de alimentos, algunas piezas de plástico para automóviles y tapas para botellas.
- **El código de resina 6:** El PS se utiliza para contener alimentos, vasos para bebidas y algunos utensilios de plástico.
- **El código de resina 7:** Una categoría de uso general para acrílico, nylon y otros plásticos.

Los plásticos que no se pueden reciclar legalmente o que son muy difíciles de reciclar incluyen:

** CreaSolv® potencialmente puede gestionar estos flujos de residuos, pero actualmente tiene una comercialización limitada.*

- Plástico contaminado con COP¹⁸ (ver la sección 5).
- Plásticos laminados* (envases de múltiples capas que incluyen películas de plástico, polímeros y papel) como paquetes para comida y tazas de café para llevar.
- Películas plásticas (envoltura de ensilado de uso agrícola, plástico adherente, etcétera).
- La mayoría de los artículos en RC 3, 4, 5 y 7.
- XPS con aditivos BFR*.

La siguiente sección desafía la presuposición de que el reciclado químico es la solución milagrosa para la contaminación plástica como lo sugieren

¹⁸ Artículo 6 1. d) iii) del Convenio de Estocolmo prohíbe el reciclado de materiales de desecho (incluyendo el plástico) que contengan COP por encima del nivel de bajo contenido de COP. Sin embargo, en los últimos años se han permitido exenciones para algunos éteres de difenilo bromados que conducen a la contaminación de la cadena de reciclaje de plástico.

las compañías que producen bienes de consumo de movimiento rápido (FMCGC por sus siglas en inglés) y las corporaciones petroquímicas que están promoviendo intensamente el reciclado químico como una solución para los residuos plásticos.

PVC - EL POLÍMERO VENENOSO

El policloruro de vinilo o PVC sobresale como uno de los residuos plásticos más difíciles de gestionar y causa graves problemas para el reciclado de otros plásticos. Viene en dos formas diferentes: rígida y flexible. A la forma más flexible de PVC se le han añadido plastificantes como los ftalatos. La forma flexible se utiliza como pisos, imitación de cuero y aislamiento de cables, pero también como charolas para dulces, para empacar fruta, láminas de burbujas y otros envases de alimentos. La forma rígida se utiliza principalmente en la construcción de tuberías de agua, marcos de ventanas, puertas, etcétera.

El PVC tiene un alto potencial de toxicidad debido al contenido relativamente alto de cloro en su formulación (el cloruro de vinilo es un carcinógeno categoría A1, tóxico para el hígado) y a una serie de aditivos, incluyendo altas concentraciones de ftalatos y, en menor grado, plomo y cadmio, que se le añaden como estabilizadores. El PVC genera problemas cuando se quema en incineradores, ya que el contenido de cloro del PVC, que varía de un producto a otro, pero puede alcanzar un 57%, actúa como catalizador para la generación de dioxinas y otros COPNI (Katami *et al.*, 2002). Muchos incineradores de residuos municipales tienen una cláusula en la licencia de explotación que excluye el PVC como residuo permitido en un intento por evitar la generación adicional de dioxinas. Cuando se entierran los residuos en rellenos sanitarios, el plomo, el cadmio y los ftalatos pueden lixiviarse del PVC, contaminando las aguas subterráneas. Cuando se quema a cielo abierto, como es el caso en muchos países en desarrollo, el PVC (y otros plásticos halogenados) producen gases ácidos peligrosos, dioxinas y otros COPNI, sobre todo si se combina con plásticos tratados con retardantes de llama bromados (Weber y Kuch, 2003).

En los rellenos sanitarios, los ftalatos migran en altas concentraciones del PVC a los lixiviados y, finalmente, a las aguas subterráneas (Wowkonowicz y Kijeńska, 2017). Los estabilizadores de plomo y cadmio también presentan un problema de lixiviación (Mersiowski y Ejlertsson, 1999; American Chemical Society, 2008).

La alta concentración de ftalatos en el PVC flexible ha sido una preocupación importante debido al potencial de disrupción del sistema endocrino de los ftalatos. En lo que respecta al PVC, el equipo médico es particularmente preocupante debido al escenario de exposición para los pacientes

y al hecho de que las concentraciones del ftalato llega a ser hasta de un 40% en peso en el caso de las bolsas de infusión intravenosa de uso médico y hasta de un 80% en peso en la tubería médica (Halden, 2010).

Se ha encontrado que el plomo contenido en el PVC, añadido como estabilizador, se lixivia fácilmente durante el uso, llegando a contaminar el agua potable que pasa por las tuberías de PVC. En la UE, el plomo se eliminó gradualmente del PVC en 2015, aunque es probable que las importaciones procedentes del extranjero sigan conteniendo plomo.

El PVC y sus componentes básicos causan una contaminación significativa y una exposición peligrosa durante la producción, el uso y el final de su ciclo de vida. El componente básico para la fabricación de PVC es la producción de monómeros de cloruro de vinilo (MCV). La producción de MCV en China, uno de los mayores productores de PVC a nivel mundial, difiere de la mayoría de la producción de MCV en otras partes del mundo. Debido a la abundancia de carbón y a las reservas limitadas de gas, China utiliza acetileno derivado del carbón en vez de etileno procedente del gas natural para producir MCV. La fabricación de MCV a partir del carbón, combina acetileno con cloruro de hidrógeno, los cuales fluyen a través de un catalizador de cloruro mercuríco para producir MCV.¹⁹

Este proceso de producción da lugar a grandes cantidades de emisiones de mercurio a la atmósfera, así como a residuos y emisiones de mercurio. Desde principios de la década de los años setenta, se ha sido reconocido al MCV como un carcinógeno ocupacional (Crech y Johnson, 1974).

Cuando el PVC entra en el sistema del reciclado, es imperativo que se separe de otros polímeros para evitar la contaminación de los productos del reciclado de plástico. En la práctica, esta separación puede ser muy difícil y costosa de llevar a cabo, ya que los plásticos pueden llegar a la instalación de reciclado en pedazos, lo que hace que la identificación sea aún más difícil. Cuando se intenta reciclar el PVC en PVC nuevamente, a través de medios mecánicos, el problema es que el PVC tiene muchas formulaciones diferentes más allá de las características simplemente rígidas y flexibles, que requieren diferentes niveles de cloro y aditivos. La mezcla de estos componentes, resulta en materiales reciclados de baja calidad que es poco probable que satisfagan las necesidades específicas de los insumos de los fabricantes de PVC y que causen la pérdida de integridad estructural del producto final hecho a partir del material reciclado.

Cuando el PVC se mezcla con otros tipos de polímeros en un proceso de reciclado mecánico, surgen problemas similares y el PVC efectivamente

¹⁹ https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-en.pdf

‘contamina’ otros polímeros, degradando sus propiedades estructurales e inhibiendo los procesos de producción, tales como la extrusión. Cuando se procesan polímeros mixtos, el reciclador se ve obligado a calentar los polímeros mixtos hasta el punto de fusión de polímeros más alto de la mezcla. Esto puede llevar a un sobrecalentamiento y a la degradación de los polímeros de menor punto de fusión contenidos en la mezcla. Este es el caso cuando el PET y el PVC se calientan juntos hasta el punto de fusión más alto del PET, causando una deshidrocloración acelerada del PVC.

El reciclado químico del PVC también enfrenta las dificultades asociadas con el cloro y los ftalatos utilizados como aditivos. Hasta la presencia pequeñas cantidades de PVC en la corriente de insumos de plástico de una unidad de pirólisis contamina a los polímeros producidos con ácido clorhídrico (HCl), que deberá ser eliminado. El ácido clorhídrico es altamente corrosivo e impone severas restricciones metalúrgicas al equipo de procesamiento de la unidad de pirólisis. Si el producto de la pirólisis es un aceite o cera, la presencia de halógenos, aunque sea en cantidades muy pequeñas, impide su uso como combustible o materia prima (Ragaert *et al.*, 2017).

Los aditivos de ftalatos también son un desafío para el procesamiento de los disolventes. El cierre de la planta de VinyLoop en Italia, es un ejemplo de cómo los aditivos pueden relegar un proceso de reciclado que no es viable. La planta estuvo en funcionamiento desde 2002, pero cerró en 2018 porque no podía separar, de manera económicamente viable, las cantidades sustanciales de plastificantes de ftalato utilizados en el PVC blando para cumplir con los requisitos regulatorios de la UE (Comisión Europea, 2018).

2. EL RECICLADO QUÍMICO DEL PLÁSTICO

En años recientes, se ha definido el término «reciclado» de múltiples maneras. En algún momento, puede que se le haya entendido tan solo como la utilización del material de un artículo desechado para contribuir, parcial o totalmente, a volver a manufacturar ese mismo tipo de artículo o uno diferente. Actualmente, la definición se ha vuelto más flexible. Algunos proponen que incluya la conversión del plástico desechado y otros residuos en combustibles fósiles para la combustión (la conversión del plástico en diésel, combustibles procesados, combustibles derivados de residuos, etcétera), combustibles no fósiles (hidrógeno), materiales de construcción (integración en superficies de carreteras y cemento) o simplemente quemarlos para obtener energía. A este último proceso se le ha denominado, en términos generales, ‘recuperación de energía’, aunque algunos proponen que más bien se le debería llamar ‘reciclado térmico’. En algunos casos, se propone la conversión de residuos plásticos en combustibles fósiles como ‘reciclado químico’. Es evidente que algunos de estos procedimientos pueden resultar altamente contaminantes, apoyar una economía lineal y no encajar fácilmente en el concepto del reciclado. En casi todos los casos, son la industria del plástico o la industria de la gestión de residuos las que crean estas frases para proyectar una imagen más ‘verde’ y más aceptable de sus modelos de negocio y sus actividades contaminantes.

En otra parte de este informe, se discutirán la mayoría de estas aplicaciones. Esta sección se enfoca en una técnica que ha sido objeto de gran atención en los medios de comunicación, como resultado de su reciente promoción por parte de los fabricantes de productos de plástico, tanto corporaciones como minoristas: el reciclado químico.

El reciclado químico de residuos plásticos se basa en el uso de procesos y técnicas químicas y térmicas para descomponer y separar los polímeros hasta un nivel en el que se puedan volver a utilizar como monómeros, polímeros o materia prima química en la producción de nuevos polímeros, o como materia prima para producir otras sustancias químicas. El proceso de reciclado químico busca eliminar impurezas, contaminantes y aditivos de los residuos plásticos, lo que resulta en monómeros (y a veces polímeros) ‘puros’ como materia prima para la producción de polímeros. Algunos de los principales desafíos que debe superar el reciclado químico son la capacidad de alcanzar un nivel industrial, la degradación de los polímeros

con el paso del tiempo, la descontaminación de la materia prima y el uso intensivo de energía, así como la gestión y la transparencia de las emisiones y los residuos.

Actualmente hay muchas preguntas sin contestar sobre el consumo de energía, las emisiones y los residuos de sustancias tóxicas, y los aspectos prácticos de las técnicas que se consideran que forman parte del reciclado químico. Las corporaciones que producen y venden plástico como parte de su línea de productos o en sus envases, están promoviendo intensamente el reciclado químico. El Consejo Europeo de la Industria Química (CEFIC por sus siglas en francés)²⁰ argumenta que el reciclado químico difiere del reciclado mecánico ya que tiene la capacidad de procesar una gran fracción de residuos plásticos contaminados mixtos, eliminar los contaminantes y generar petroquímicos o bien separar monómeros a partir de los contaminantes para crear polímeros de calidad similar a los polímeros vírgenes.

Estos productos petroquímicos se pueden utilizar como ‘materia prima’, la base química de los polímeros, o se pueden convertir los monómeros en insumos de polímeros para producir plástico nuevo. Sin embargo, la degradación de los monómeros sigue enfrentando el problema del reciclado de disolventes y la despolimerización química. La despolimerización

CONFORME VA CRECIENDO LA PRESIÓN PARA PROHIBIR LOS PLÁSTICOS, LA INDUSTRIA BUSCA ACTUALIZAR SU CAMPAÑA PARA PROMOVER QUE LOS CONSUMIDORES SE ENFOQUEN EN EL RECICLADO EN VEZ DE ENFOCARSE EN LOS IMPACTOS DEL PLÁSTICO.

térmica puede abordar la degradación mediante la generación de materia prima a nivel molecular en vez de a nivel de los monómeros (por medio de la pirólisis o de la gasificación), aunque históricamente la mayor parte de los lotes producidos a partir de los procesos de gasificación y de pirólisis son una forma de combustible fósil reconstituido.

Conforme va creciendo la presión para prohibir los plásticos, la industria va buscando actualizar su campaña para que los consumidores se enfoquen en el reciclado en vez de fijarse en los impactos del plástico. La *Alianza para acabar con los residuos plásticos*²¹ es un consorcio de corporaciones que manufacturan productos y bienes de consumo de plástico

20 <https://chemicalwatch.com/98760/guest-column-how-chemical-recycling-could-accelerate-sa-fe-plastic-recycling-in-the-eu#overlay-strip>

21 <https://endplasticwaste.org/en>

que promueven públicamente el reciclado químico y se asocian con empresas productoras de tecnologías pioneras y empresas piloto que utilizan ese tipo de técnicas. Existen muchas similitudes entre la promoción actual del reciclado químico por parte de la 'Alianza' como una 'solución' a la contaminación plástica a nivel mundial y el impulso histórico de marcar los plásticos con códigos de identificación de las resinas reciclables y el símbolo de reciclaje.

Aunque el reciclado químico puede complementar las tasas de reciclado mecánico existentes, hay que reconocer que mientras que la producción de plásticos siga aumentando exponencialmente, no puede ser una 'solución' a la crisis mundial de residuos plásticos (Figura 1). A menos que se pueda implementar el reciclado químico con altos niveles de contenido reciclado obligatorios en el plástico nuevo, acompañados de restricciones significativas a la producción de plástico, seguirá siendo poco más que una fachada para fines publicitarios de las corporaciones. Además, no se deberá apoyar el reciclado químico con el fin de crear combustibles fósiles reconstituidos, ya que la quema de combustibles derivados de plásticos entra en conflicto con el concepto de la economía circular y exacerba el cambio climático.

TÉCNICAS DE RECICLADO QUÍMICO

Las tres clases principales de técnicas de reciclado químico son:

1. **La despolimerización química:** un proceso basado en sustancias químicas que convierte los residuos plásticos en monómeros a partir de reacciones químicas. Es adecuada sólo para flujos de residuos plásticos homogéneos pre-clasificados como PET, PU, PA, PLA, PC, PHA y PEF.
2. **La regeneración a partir de disolventes:** Un proceso de purificación basado en la disolución de polímeros en disolventes patentados, la separación de contaminantes y la reconstitución de los polímeros blanco. El proceso puede producir una variedad de plásticos. La técnica de CreaSolv,[®] en la sección 6, es un buen ejemplo de este proceso.
3. **La despolimerización térmica y la fracturación (gasificación y pirólisis):** Estos procesos calientan los residuos plásticos en un ambiente bajo en oxígeno para producir moléculas a partir de flujos mixtos de monómeros que pasan a formar la base de la materia prima para la producción de plásticos nuevos sin degradación. El principal producto es el sintegás o gas de síntesis.²² Por décadas se ha sometido

²² El gas de síntesis es una mezcla de gas combustible que consiste principalmente en hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono con muchos contaminantes traza. El nombre proviene de su uso como intermediarios en la creación de gas natural sintético (SNG) y para la producción de amoníaco o metanol.

a prueba tanto la gasificación como la pirólisis para la creación de energía (el uso de sintegás de quemado para mover turbinas de vapor) a partir de residuos municipales, aunque no han tenido éxito comercial debido a que se combina una economía deficiente, el alto consumo de energía que requiere de combustible suplementario, incendios, explosiones, emisiones y la generación de residuos. También se utilizan estos procesos para convertir 'plástico en combustibles' (combustibles fósiles), ya que se pueden generar aceites y diésel además de sintegás. La Figura 15 es un diagrama de flujo que muestra la gama de aplicaciones de reciclado mecánico, químico y a partir de disolventes.

La despolimerización química

Este proceso de reciclado químico es esencialmente opuesto a la polimerización, descrita en la figura 3, y produce moléculas monoméricas individuales o fragmentos más cortos llamados oligómeros. El proceso solo funciona de manera eficiente con insumos altamente selectivos que requieren de una cuidadosa segregación de las fuentes y es muy adecuado para PET y ácido tereftálico purificado (PTA), aunque también se le puede aplicar a PA, PU, PLA, PHA, PEF y PC, además de una gama de poliésteres.

La despolimerización produce monómeros que se tienen que volver a polimerizar (también se tienen que incorporar aditivos para reemplazar los aditivos perdidos) con el fin de producir plásticos, mientras que los procesos de regeneración a partir de disolventes producen un polímero purificado listo para se le convierta en productos plásticos. Tanto en la despolimerización como en la regeneración de disolventes, los colorantes,

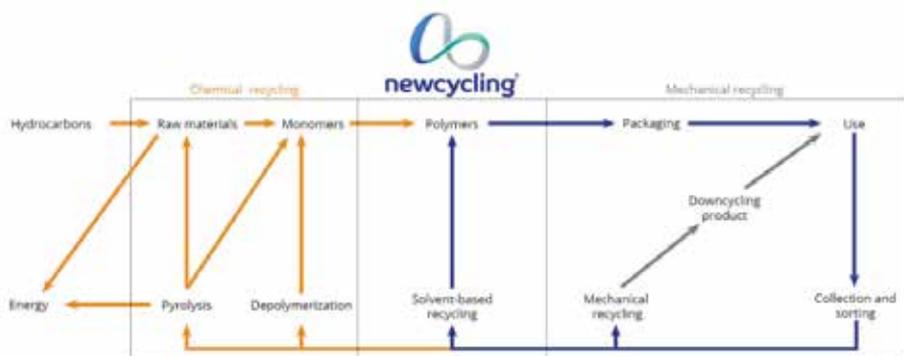


Figura 15. Espectro desde el reciclado químico a través de disolventes hasta el reciclado mecánico. Fuente: Newcycling®

aditivos y demás contaminantes se pueden separar por completo a nivel molecular (siempre y cuando los procesos sigan los estándares estrictos), y el producto resultante tiene un alto nivel de pureza (Crippa *et al.*, 2019). Este nivel de pureza es difícil de lograr con el reciclaje mecánico, a menos que se utilicen insumos muy limpios. La despolimerización química no opera actualmente sobre una base comercial a gran escala, ya que sólo existen plantas industriales piloto y operaciones a escala de laboratorio. Sólo ha habido una gran planta de reciclado por disolventes de PVC a escala comercial (la planta de VinyLoop en Italia, una alianza corporativa con una capacidad de producción de 10 000 toneladas anuales) que operó a partir de 2002, pero cerró en 2018 porque económicamente no podía separar las grandes cantidades de plastificantes de ftalato utilizados en el PVC blando para cumplir con los requisitos reglamentarios de la UE (Comisión Europea, 2018).

La despolimerización permite que los monómeros que se producen se utilicen por separado o de manera mixta para crear polímeros de grado virgen. El PET es un ejemplo de un caso en el que se puede utilizar los monómeros producidos de forma flexible y se les puede aplicar a envases o textiles

(las fibras de PET en los textiles se conocen como poliéster). Esto podría ser un desarrollo positivo, ya que la mayoría de los polímeros textiles actualmente no se reciclan y, sin embargo, representan un 60% del uso productivo del PET, mientras que el volumen restante se utiliza principalmente para envases (Crippa *et al.*, 2019).

Dado que el PET representa un 18% de la producción mundial de plástico (Mouzakis, 2012), el reciclado de textiles de PET (menos del 1% se reciclan actualmente) y de la basura marina de PET a través de la despolimerización podría reducir potencialmente este tipo de contaminación plástica. La basura marina de PET puede tener la complicación adicional de que adsorbe y concentra los COP tóxicos de las aguas oceánicas. La adsorción es la adhesión de moléculas de un gas, líquido o sólido disueltas a una superficie, en este caso a la superficie del plástico PET. Si se somete

EL FACTOR CLAVE EN EL FRACASO COMERCIAL ES LA INCAPACIDAD DE GENERAR ENERGÍA EXCEDENTE DEBIDO A LOS ALTOS INSUMOS DE ENERGÍA EXTERNA REQUERIDOS PARA CALENTAR LOS RESIDUOS A TEMPERATURAS ALTAS PARA LA PIRÓLISIS. CUANDO SE CALCULA EL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA PRE-CLASIFICACIÓN Y EL SECADO DE LOS RESIDUOS, EL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DE LA PIRÓLISIS RESULTA ALTAMENTE DEFICIENTE.



Figura 16. Los pequeños envases de plástico/papel de aluminio comunes en los países de bajos ingresos. Foto: Isidro Castro

el PET contaminado a la despolimerización, se separan los contaminantes COP y llegan a formar parte de los residuos tóxicos del proceso, generando así más desechos peligrosos para su eliminación.

El uso de energía en la despolimerización para dividir las cadenas moleculares y recuperar monómeros depende de los polímeros blanco. Actualmente, el uso de energía y otros costos en este tipo de producción de polímeros reciclados es significativamente más alto que en la producción de polímeros vírgenes. Sin embargo, el Potencial de Calentamiento Global (PCG), una medición de la huella de carbono de la producción, para los plásticos creados a través de la despolimerización es solo alrededor de un 60% del PCG de los plásticos vírgenes (Crippa *et al.*, 2019), el cual con el tiempo, puede igualar las condiciones en términos de las estructuras de los costos, particularmente si se implementa más ampliamente la fijación del precio del carbono. Al igual que con la mayoría de las tecnologías de reciclado químico, no se ha divulgado la toxicidad, el destino y las características de los residuos creados por la descontaminación de los monómeros. Tampoco se han revelado públicamente los peligros asociados con los catalizadores patentados utilizados en la despolimerización.

La regeneración a partir de disolventes

La purificación y despolimerización a partir de disolventes produce polímeros de alto grado de calidad prácticamente virgen. El proceso Crea-Solv® es un ejemplo de una técnica de regeneración basada en disolventes, el cual se discute en la sección 6, en términos de la separación de los contaminantes COP. Los polímeros regenerados a partir de disolventes están listos para ser convertidos directamente en productos plásticos sin tener que seguir los pasos de la re-polimerización requeridos para los monómeros generados a partir de procesos de despolimerización. La mayoría de los contaminantes, agentes colorantes y demás aditivos se eliminan a nivel molecular sin afectar la estructura de los polímeros blancos. Sin embargo, puede que se requieran aditivos adicionales para replicar las propiedades del producto blanco tal cual existían en el producto original.

En general, la purificación a partir de disolventes funciona a través de disolver los polímeros en un disolvente específico seguido de la eliminación de contaminantes como aditivos, pigmentos y sustancias no añadidas intencionalmente (NIAS) a través de la filtración o la extracción de fase. Posteriormente, se precipitan los polímeros por medio de un anti-disolvente en el cual los polímeros son insolubles (Crippa *et al.*, 2019). Las sustancias no añadidas intencionalmente provienen de varias fuentes y se pueden agrupar en productos secundarios, productos de la descomposición y contaminantes. Los productos secundarios muchas veces se forman durante la producción de sustancias iniciales como los monómeros y durante todas las demás etapas posteriores de la fabricación. Los productos que surgen de la descomposición de los elementos estructurales de los materiales plásticos que están en contacto con los alimentos (FCM), como los polímeros y las fibras, así como los aditivos (como los antioxidantes y los estabilizadores UV), también pueden contaminar los plásticos como NIAS (Bradley y Coulier, 2007; Bignardi *et al.*, 2017).

Aunque el proceso mismo puede regenerar polímeros de calidad prácticamente virgen, el proceso avanzado de producir un producto con extrusión, inyección o moldeo por soplado puede inducir la misma degradación térmica y de estrés que la que se da para cualquier polímero. En este sentido, la regeneración a partir de disolventes no es un proceso perpetuo de reciclado de plástico, ya que, después de ciclos repetidos, los procesos mecánicos de producción de plástico degradarían a los polímeros. Las poliolefinas, como el PE y el PP, se pueden regenerar utilizando altas temperaturas y alta presión. Estas dos poliolefinas son dos de los polímeros industriales con un mayor volumen de producción, y se podría aplicar el reciclado a partir de disolventes para aumentar su tasa de reciclado, mientras se eliminan contaminantes (como los BFR) para su posterior tratamiento o destrucción. Se han establecido plantas piloto en Estados

Unidos, la UE e Indonesia, a escala industrial, para reciclar estos plásticos utilizando la regeneración de disolventes y para procesar envases multicapa²³, incluyendo las pequeñas bolsitas que se utilizan para²⁴ envasar alimentos y cosméticos. En muchos países que prácticamente no cuentan con opciones de reciclado y prácticamente no se valora a las personas que recogen basura, las bolsitas descartadas generan un importante problema de contaminación.

Aunque puede que sea técnicamente posible separar los polímeros de los envases de plástico multicapa, todavía no se ha determinado si resulta económicamente viable mejorar este sistema. En el pasado, los recicladores de disolventes que utilizaban insumos relativamente homogéneos de PVC y PS, encontraron que la viabilidad del proceso era un desafío, con insumos relativamente sencillos en comparación con los complejos envases multicapa. Los desafíos clave para la regeneración a partir de disolventes de empaques de plástico complejos, incluyen pasos adicionales de solvación y separación, el tiempo y la energía necesarios para la eliminación de los disolventes, el impacto del disolvente residual en el producto polimérico y la capacidad de reciclar disolventes contaminados con los aditivos extraídos (Kasier *et al.*, 2018).

La despolimerización térmica (la pirólisis y la gasificación)

Con un par de excepciones²⁵, no se pueden utilizar directamente los productos de la pirólisis y de la gasificación de plásticos para la producción de polímeros. Se produce carbón, petróleo, alquitrán y gas con moléculas de hidrocarburos mixtos que contienen una gama de contaminantes, que deberán pasar por los mismos procesos y refinamiento que requiere el petróleo crudo antes de que se pueda desarrollar en polímeros. Por lo tanto, estos procesos esencialmente generan materia prima de hidrocarburos crudos para fabricar polímeros, en vez de fabricar monómeros o polímeros directamente. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los problemas económicos generalmente resultan en que estos hidrocarburos crudos se vendan y quemen como una forma de producir combustible fósil reconstituido con residuos plásticos, en vez de que se les utilice como polímeros nuevos o materia prima petroquímica.

Las corporaciones petroquímicas y productoras de plástico afirman que estas tecnologías tomarán insumos de residuos plásticos mixtos con ni-

23 <https://www.apk-ag.de/en/newcycling/>

24 En muchos países de bajos ingresos, FMCGC comercializa productos alimenticios como salsas, salsa de tomate ketchup y cosméticos, como champú, en bolsitas de papel de aluminio/plástico. La justificación es que a los consumidores pobres que no pueden comprar productos en envasados más grandes, tienen la 'oportunidad' de comprar estos productos en pequeñas cantidades.

25 Se pueden someter los residuos de PMMA y PS a la pirólisis para producir monómeros, pero sólo con materia prima heterogénea y bajo condiciones cuidadosamente controladas.

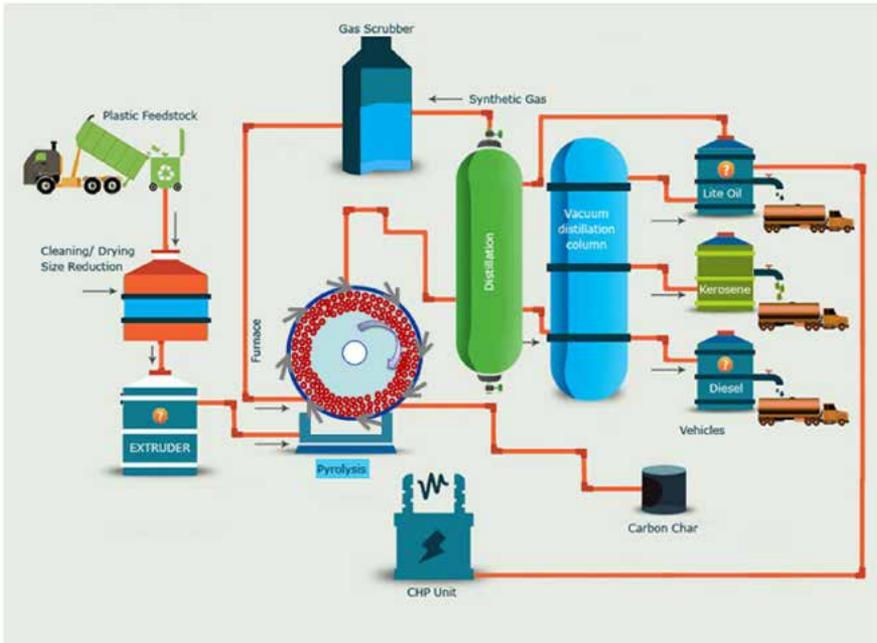


Figura 17. Esquema de planta de pirólisis plástica con reactor de vórtice.

Fuente: Ragaert y Delva 2017

veles significativos de contaminación y producirán materia prima nueva y limpia para la producción de polímeros. La condensación en el gas de síntesis permite la separación de contaminantes de los productos blanco y los concentra en los residuos del proceso. Sin embargo, de hecho, se ha limitado el uso de sintegás en las turbinas de gas debido a los niveles de contaminantes que ha mostrado en el pasado, incluyendo halógenos, partículas finas, azufre, amoníaco, cloruros, mercurio y otros metales traza.

Las tecnologías de la pirólisis y la gasificación han existido durante décadas, y muchas veces se han propuesto como una técnica para generar excedentes de energía 'verde' a partir de residuos municipales mixtos. La mayoría de las operaciones de tamaño comercial, no han logrado suministrar energía comercialmente económica. En Alemania, al Estado le salió muy caro entender que esta tecnología no podía entregar energía excedente más allá de cargas parasitarias, (Gleis, 2012), debido a fallas y finalmente el cierre de las plantas, el Estado terminó perdiendo la inversión masiva que realizara en la gasificación de los residuos municipales para generar energía.

Aunque la pirólisis a escala industrial fracasó en el pasado, existen nuevas empresas incipientes que están reconfigurando la tecnología, la cual sigue enfrentando el obstáculo de un alto consumo de energía, de hasta un 5-20% del poder calorífico de los insumos de residuos (Aguado *et al.*, 2003; Rollinson y Oladejo, 2019). Los insumos de plásticos mixtos para los procesos de pirólisis también tienen un potencial significativo de desarrollar hidrocarburos aromáticos policíclicos tóxicos (HAP) y dioxinas. La preocupación más importante referente a mejorar la pirólisis es que:

“existe una incertidumbre significativa sobre si la construcción de una infraestructura de pirólisis para reciclar plásticos realmente llevará a obtener materiales nuevos, o sólo combustibles. Este tipo de bloqueo lineal claramente no está alineado con los principios básicos de una economía circular y es una de las principales preocupaciones al considerar el papel que desempeña la pirólisis en la economía del plástico” (Comisión Europea 2018).

El principio básico detrás de la versión de estas tecnologías correspondiente a transformar los residuos en energía, es calentar los residuos en cámaras cerradas en ambientes sin oxígeno (pirólisis) o con un nivel bajo de oxígeno (gasificación) para producir gas de síntesis (sintegás), que posteriormente se podrá quemar para generar vapor para turbinas generadoras de electricidad. El factor clave del fracaso comercial de estas tecnologías es la incapacidad de generar energía excedente debido a los altos insumos de energía externa requerida para calentar los residuos a temperaturas pirolíticas. Cuando se calcula el consumo de energía para la pre-clasificación y el secado de los residuos, es muy poco favorable el balance entre masa y energía de la pirólisis.

Rollinson y Oladejo señalan en su artículo seminal de 2019 sobre el fracaso comercial de la pirólisis y la gasificación para generar balances energéticos significativos a partir de residuos municipales que:

“Con base en los métodos de revisión de literatura y de estudios de caso, junto con las solicitudes de permisos civiles y los resultados de los experimentos, se muestra que una planta de pirólisis para la obtención de energía autosostenible a partir de residuos no se comprueba termodinámicamente, es poco factible y ambientalmente irracional. También se identifica un vínculo entre los fracasos comerciales generalizados y la falta de atención a los fundamentos termodinámicos, junto con un ambiente de indiferencia o ignorancia con respecto a los balances energéticos y la sostenibilidad cuando se presentan, evalúan y financian estas tecnologías. La situación presenta un alto riesgo para los inversionistas y

tiene el potencial de tener un impacto adverso sobre las transiciones sociales hacia un futuro más sostenible.”

Las críticas de Rollinson se refieren a los altos insumos de energía y a las características de la producción deficiente de energía provenientes del procesamiento de los residuos sólidos municipales (RSM) a partir de la pirólisis y la gasificación, incluyendo los plásticos, a cualquier otra escala que no sea la de un reactor de lotes pequeños. La despolimerización térmica del plástico por pirólisis y gasificación comparte muchas de las deficiencias de los procesos de RSM, pero también tiene diferentes productos y objetivos que el procesamiento de los RSM. Las críticas de Rollinson se pueden aplicar más directamente cuando se discuten las variaciones de la conversión del plástico en combustible por medio de la ‘despolimerización’, es decir, cuando los productos se utilizan para la combustión, en vez de reciclarse. Con el fin de resaltar estas cuestiones, esta sección aborda primero la ‘despolimerización para la producción de plásticos’ y después la ‘despolimerización para la producción de combustible’.

La despolimerización para la producción de plásticos

La despolimerización mediante pirólisis o gasificación descompone el plástico en compuestos de hidrocarburos más simples. En un ambiente de bajo niveles de oxígeno, los polímeros se descomponen en pequeñas moléculas de hidrocarburos, que se pueden condensar a partir del gas caliente. Sin embargo, la división de los enlaces de las moléculas es más aleatoria, generando fracciones ligeras de hidrocarburos y fracciones cerosas, las cuales cuando se condensan y combinan, forman una sustancia aceitosa que se puede utilizar como combustible (Onwudili, Insura y Williams, 2009). En caso de que existan condiciones y materias primas cuidadosamente controladas, se pueden crear tanto monómeros de PMMA como de PS a partir de la pirólisis, lo que permite la conversión directa en polímeros. Sin embargo, en términos generales, se produce una gama de fracciones de hidrocarburos que se pueden utilizar como materia prima para la fabricación de sustancias químicas, la producción de polímeros o combustible, pero - antes de que se puedan convertir en productos finales- se deben someter a un proceso de refinación y producción similar al de otras materias primas petroquímicas.

Aunque existen muchas propuestas y ensayos para usar la pirólisis y la gasificación para despolimerizar los plásticos, se promueve y enfoca la atención en la capacidad que tienen para producir monómeros para su reutilización y prácticamente no toman en cuenta los impactos asociados con la salud humana y el medio ambiente. Hay poca, si no es que ninguna información sobre los productos del proceso de pirólisis o gasificación de



Figura 18. El reciclado de TDI a través de OASC - Planta de Kobe Steel, Ltd. Fuente: Goto 2016

Figura 19. Planta piloto de Panasonic para la recuperación de FRP. Fuente: Goto 2016



los plásticos, como las emisiones tóxicas, el potencial de calentamiento global, los residuos y la calidad de los gases. Sin embargo, se pueden hacer ciertas inferencias sobre estos factores con base en la experiencia con la pirólisis y la gasificación de los RSM.

Se ha demostrado que el uso de insumos mixtos de residuos plásticos genera sustancias tóxicas en carbón y emisiones como los hidrocarburos poliaromáticos (HAP) y las dioxinas (Crippa *et al.*, 2019; Rollinson y Oladejo, 2019). Los investigadores pudieron “*cuantificar que la calificación de la toxicidad de los productos PCDD/DF de la pirólisis era tres veces mayor que la de los insumos en pleno rendimiento operativo y once veces mayor que los insumos a escala piloto, y que estas toxinas también estaban presentes tanto en el gas como en el petróleo*” (Chen *et al.*, 2014, citado en Rollinson y Oladejo, 2019). Se descubrió que las dioxinas son particularmente problemáticas cuando la materia prima incluye plásticos clorados como el PVC.

La contaminación por dioxinas arrastrada (con la probable presencia de otros COP) en los productos de hidrocarburos obtenidos, implica que las dioxinas se transportan como contaminantes a los productos poliméricos o combustibles finales. También se pueden liberar en emisiones del proceso, lo que representa un riesgo para la salud de los trabajadores y la comunidad. Además el destino del material carbonizado cobra importancia, ya que el material carbonizado, al ser un material carbonáceo, es una matriz ideal de adsorción para las dioxinas y otros COP creados no intencionalmente. De hecho, el carbón activado se inyecta en los incineradores de residuos con el propósito específico de adsorber dioxinas de los gases de combustión (Mukherjee *et al.*, 2016).

El uso de energía de la pirólisis y de la gasificación es muy alto. La pirólisis opera a temperaturas de entre 300oC y 600oC, mientras que en la gasificación llega a un rango de entre 1,200°C y 1,500°C. Para calentar el sistema a esta temperatura, se requieren fuentes externas de energía, generalmente provenientes de combustibles fósiles. Algunas plantas de procesamiento de residuos a partir de la pirólisis y la gasificación afirman ser autosostenibles, argumentando que aprovechan los hidrocarburos (y el material carbonizado) que generan para las cargas parasitarias. Sin embargo, como señalan Rollinson y Oladejo:

“Se han reportado modestos balances energéticos positivos, pero sólo bajo las siguientes condiciones poco prácticas e insostenibles:

- 1. Cuando la energía de secado se ha establecido fuera del límite del sistema.*

2. *No se consideran las pérdidas fundamentales de calor (segunda ley de la termodinámica).*
3. *Se descuenta la energía auxiliar esencial para gestionar la planta como, por ejemplo, pero no exclusivamente, la limpieza del gas, el pre-procesamiento y los combustibles complementarios para el reactor”.*

En otras palabras, no es plausible que estos sistemas alcancen la autosuficiencia energética y generen energía o combustible como excedente, por lo que su balance energético es esencialmente negativo.

La despolimerización a partir de la oxidación en agua supercrítica (OASC)

En la mayoría de los casos, la despolimerización de los plásticos se lleva a cabo por medio de la pirólisis y la gasificación (despolimerización térmica) o bien de la despolimerización química, ambas descritas anteriormente. Muchas veces se pasa por alto la tecnología de despolimerización de plástico a partir de la oxidación en agua supercrítica (OASC). Aunque más adelante se describe esta técnica, en el contexto de la destrucción de plásticos contaminados con COP, también se ha modificado para la despolimerización.

A partir del uso de aguas supercríticas o de metanol supercrítico, resulta relativamente fácil despolimerizar los plásticos que se desarrollan a través del proceso de polimerización por condensación, incluyendo el PET y el nylon, para recuperar monómeros. Se pueden someter a los polímeros reticulados a reacciones selectivas de des-reticulación en OASC sin que haya una pérdida significativa de las cadenas vertebrales (Goto, 2016). El PET se puede despolimerizar a monómeros de alta pureza con una eficiencia superior al 99% con OASC o metanol supercrítico y se han desarrollado tanto plantas piloto como comerciales.

Los poliuretanos se producen a través de una reacción de poliisocianato con polialcohol (poliol). A través de la descomposición de la espuma del poliuretano en agua subcrítica, se puede producir tolienediamina (TDA) y poliol, que corresponden al isocianato inicial que se requiere para la producción de poliuretano (Nagase *et al.*, 1998).

Basado en esto, ya desde 1997, Kobe Steel, Ltd. (Japón) había desarrollado un proceso de reciclado en agua supercrítica, utilizando agua subcrítica para convertir residuos pesados procedentes de la destilación de diisocianato de tolieno (TDI) en TDA. Desde 1998, la planta ha operado a una capacidad de 10 toneladas diarias. Normalmente, se incineraban los residuos de TDI, pero este proceso permite la recuperación de 99.5% de la TDA pura para la producción de poliuretano (Goto, 2016). En el año

2007, la corporación Hanwha Chemical estableció en Corea una planta separada con capacidad para procesar 20 toneladas de TDI diarias mediante agua subcrítica (Adschiri *et al.*, 2011). En 2002, Panasonic también desarrolló un proceso para recuperar y reciclar plásticos reforzados con fibra de vidrio de alta resistencia (PRFV) a partir de residuos de PRFV utilizando hidrólisis bajo condiciones de agua subcrítica. La PRFV es un material complejo compuesto de una estructura laminada que contiene resina de poliéster con fibra de vidrio y relleno. Con procesos similares, también se recuperaron exitosamente plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP por sus siglas en inglés).

La despolimerización con bacterias

Aunque esta técnica en gran medida todavía se encuentra a nivel experimental, una empresa, Carbios, la está mejorando y predice que dentro de cinco años podrá instalar una planta a escala industrial. La técnica utiliza una enzima hidrolasa bacteriana para reducir el PET a monómeros. La enzima bacteriana se basa en una bacteria natural que se modificó científicamente para procesar el PET de manera más eficiente, argumentando que en diez horas se consigue una despolimerización de un 90% (Tournier *et al.*, 2020). Carbios se asoció con Novozymes, una compañía que produce enzimas, para mejorar la producción bacteriana utilizando hongos a un nivel industrial.

Se ha informado que esta enzima tiene una alta eficiencia y produce 16.7 gramos de tereftalato por litro por hora y que el costo de la enzima es tan solo un 4% del costo del plástico virgen producido a partir de petróleo. Siguen habiendo preguntas sobre cómo es que las bacterias lidian con los aditivos y los contaminantes, así como sobre la naturaleza peligrosa del flujo de residuos generado después de que se ha retirado el PET de los residuos plásticos. Puede que lo prolongado de los plazos para que llegue a estar disponible esta solución comercialmente y los resultados de los ensayos para mejorarla, no reflejen lo promisorio que aparentaba ser esta técnica inicialmente. Se han desarrollado otros enfoques bacterianos, incluyendo el uso de bacterias *Pseudomonas* para descomponer el poliuretano (Espinosa *et al.*, 2020), y de hongos que pueden descomponer el PET, aunque parece que faltan años, sino es que décadas, para que pueda adoptar cualquier forma de actividad comercial.

3. LA CONVERSIÓN DE PLÁSTICOS EN COMBUSTIBLES

A medida que las reservas de residuos plásticos van creciendo a tasas sin precedentes en todo el mundo, muchos partidarios de esta solución están presionando para que se adopten los combustibles derivados de los residuos plásticos como ‘sustituto’ de los combustibles fósiles y compensar así la extracción de petróleo, gas y carbón. La realidad es que en todos los casos, salvo en unas pocas excepciones, el producto resultante es un combustible fósil o simplemente una forma re-embalsada de residuos plásticos que por motivos financieros, regulatorios o de subsidios se rebautiza como ‘producto’ en vez de ‘residuo’. Una excepción es la conversión de residuos plásticos en hidrógeno, que es un combustible de combustión limpia. Aún con este ejemplo, el camino para crear hidrógeno puede implicar procesos intensivos en el consumo de energía que niegan cualquier beneficio neto en términos de la huella de carbono. La siguiente sección discute la conversión de plásticos en combustibles fósiles por medio de la despolimerización, la conversión del plástico en combustibles no fósiles (hidrógeno) y el uso de combustibles derivados de residuos (CDR) y productos asociados.

LA DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES (FÓSILES)

La variabilidad de la materia prima obtenida de residuos plásticos mixtos, que se puede utilizar en la pirólisis y la gasificación, y los productos parecidos al combustible en términos de materia prima de hidrocarburos, que se pueden generar con un pos-procesamiento mínimo, sugiere que la conversión del plástico a combustible va a dominar este sector del mercado. Actualmente, la creación de diferentes tipos de diésel, de queroseno y de petróleo ligero —esencialmente combustibles fósiles para la combustión— es el único mercado viable para los productos derivados de la pirólisis a partir del procesamiento de residuos plásticos. Esto crea la probabilidad muy real de un ‘bloqueo lineal’ de los residuos plásticos que socavaría la circularidad en el contexto del reciclado químico de residuos plásticos (Crippa *et al.*, 2019).

Las empresas de nueva creación que utilizan estas técnicas compiten con las poderosas corporaciones petroquímicas por obtener parte del mercado



Figura 20. La conversión del plástico en combustible fósil a través de la pirólisis.

de materias primas químicas y poliméricas. Estas corporaciones cuentan con capacidades de producción a gran escala bien establecidas que permiten la producción de materias primas de bajo costo. Para las nuevas empresas emergentes, la competencia basada en los precios será considerable, y las empresas que recién llegan al mercado, se encuentran en una desventaja casi insuperable, ya que los bajos precios del petróleo son equiparables a los bajos precios del plástico virgen. Es probable que tales presiones empujen a los procesadores de residuos plásticos basados en la pirólisis y la gasificación hacia el mercado más fácilmente disponible del plástico convertido en combustible bajo la forma de diésel para su uso en centrales eléctricas y barcos (Crippa *et al.*, 2019). En los países de ingresos bajos y medios, también se podría utilizar este diésel para vehículos.

El uso de plástico convertido en combustible tiene varias implicaciones graves para la economía circular, la salud humana y el clima:

- **La linealidad** – Aparte del valor energético calórico recuperado de los residuos plásticos, la conversión del plástico en combustibles fósiles es esencialmente un camino directo hacia la destrucción de recursos y mantiene el marco económico lineal de la petroquímica que va de extracción–producción–eliminación (combustión). Agregar un paso pirólitico intensivo en energía para convertir el plástico a partir de petroquímicos de nuevo en petroquímicos para la combustión bien podría socavar el equilibrio entre la masa y la energía del proceso (Rollinson y Oladejo, 2019). Ante la evidente expansión de la producción de plástico a gran escala, se debe cuestionar si se está produciendo algún efecto compensatorio real entre los combustibles fósiles vírgenes como resultado del uso de combustible producidos a partir del plástico.
- **Las emisiones tóxicas** – Existen pruebas de que la pirólisis genera y libera COP no intencionales como las dioxinas. Conesa *et al.* (2008) afirman que: “En los procesos tanto de combustión como de pirólisis, resulta importante la formación de PCDD/DF. En la pirólisis, pue-

de haber un aumento significativo de congéneres y/o un aumento de la toxicidad total debido a la redistribución de los átomos de cloro a los congéneres más tóxicos.” Se ha encontrado que el sintegás de los residuos plásticos está contaminado con una serie de contaminantes como dioxinas, HAP y alquitrans, que dificultan su uso en motores de combustión sin mayor refinamiento (Rollinson y Oladejo, 2019). Los mismos contaminantes afectan a los aceites y al carbón procedentes de la pirólisis. Cuando se queman estos productos similares al petróleo, liberan sus contaminantes. Aunque los operadores a cargo de la pirólisis pueden sugerir que sus emisiones de dioxinas son bajas, es probable que esto sea a costa de transferir dichos contaminantes a los productos derivados del proceso: gas, petróleo, alquitrán y material carbonizado. De hecho, *“los investigadores encontraron que el índice de toxicidad de los productos de PCDD/DF procedentes de la pirólisis equivalía a tres veces la de los insumos en su pleno rendimiento operativo y once veces mayor que los insumos a escala piloto, y que estas toxinas también estaban presentes tanto en el gas como en el petróleo”* (Chen *et al.*, 2014, citado en Rollinson y Oladejo, 2019). Durante la combustión, se liberan COP arrastrados y otros contaminantes en los productos directamente a la atmósfera.

- **El potencial de calentamiento global** – No se puede ignorar el potencial de calentamiento global de los combustibles fósiles desarrollados a partir de la pirólisis del plástico. Para los productos plásticos convertidos en combustibles a través de la pirólisis, se puede considerar su tiempo como producto como una breve pausa en el proceso lineal desde su extracción como petroquímicos hasta su combustión final como combustibles fósiles. Sin embargo, además del CO₂ que normalmente se liberaría por la combustión del contenido de combustible fósil calorífico del plástico, hay que considerar la energía adicional ‘incrustada’ procedente de la extracción, el transporte y la producción originales del artículo de plástico. Además, está la energía utilizada para recolectar, clasificar y separar el plástico que se alimenta a la unidad de pirólisis, así como la energía utilizada por la propia unidad de pirólisis para generar el calor necesario para el proceso. Un proceso de pirólisis requiere de niveles elevados de energía de calefacción. En definitiva, el potencial de calentamiento global de los combustibles fósiles derivados del plástico es extremadamente alto.

**ES MUY ELEVADO
EL POTENCIAL DE
CALENTAMIENTO GLOBAL DE
LOS COMBUSTIBLES FÓSILES
DERIVADOS DEL PLÁSTICO.**

LA CONVERSIÓN DEL PLÁSTICO EN COMBUSTIBLES NO FÓSILES (HIDRÓGENO)

Se le ha prestado menos atención a la conversión de residuos plásticos en hidrógeno, un combustible no contaminante y no fósil. Se han establecido algunas plantas piloto a escala industrial para convertir residuos plásticos mixtos no reciclables en combustible de hidrógeno. Cuando se utiliza el hidrógeno como combustible en vehículos o fuentes estacionarias a través de una celda de combustible de hidrógeno, se produce agua y aire caliente. Literalmente, el uso de combustible de hidrógeno en un vehículo casi no genera emisiones de carbono en comparación con los combustibles fósiles producidos a través de una refinería o derivados de plásticos. Sin embargo, el método utilizado para producir el hidrógeno puede afectar significativamente el potencial general de calentamiento global del proceso. Se han utilizado los términos hidrógeno verde, hidrógeno azul e hidrógeno gris para referirse a la intensidad energética de la producción de hidrógeno por diferentes métodos.

El hidrógeno verde es hidrógeno producido a través de la electrólisis utilizando energía renovable baja en carbono, como la energía solar y eólica. El hidrógeno gris, que representa alrededor de un 98% de la producción total de hidrógeno en la actualidad, se produce a través del reformado de metano con vapor del gas natural en la industria petroquímica, sin ningún intento por compensar las emisiones de carbono, y representa una forma de producir hidrógeno con un alto contenido de carbono. El hidrógeno azul implica el mismo proceso petroquímico (Figura 21) y también es una forma de producir hidrógeno con un alto contenido de carbono, aunque se argumenta que es una forma más limpia, ya que implica la compensación, captura y almacenamiento o reutilización de las emisiones de carbono.

Se considera que la economía del hidrógeno juega un papel clave en una transición hacia un futuro con bajas emisiones de carbono.²⁶ Los vehículos, las construcciones (McClarty *et al.*, 2016) e incluso las acerías²⁷ ya pueden funcionar con hidrógeno. Sin embargo, esto depende en gran medida del grado en que el hidrógeno verde puede pasar de ser un proveedor menor de hidrógeno a un proveedor importante dentro de la economía. Actualmente, el hidrógeno gris y azul son mucho más económicos, pero se espera que el precio del hidrógeno verde caiga considerablemente durante la próxima década, mientras que el precio del carbono puede forzar a que aumente el precio del hidrógeno gris y azul.

26 <https://www.iea.org/commentaries/the-clean-hydrogen-future-has-already-begun>

27 <https://reneweconomy.com.au/another-nail-in-coals-coffin-german-steel-furnace-runs-on-renewable-hydrogen-in-world-first-55906/>

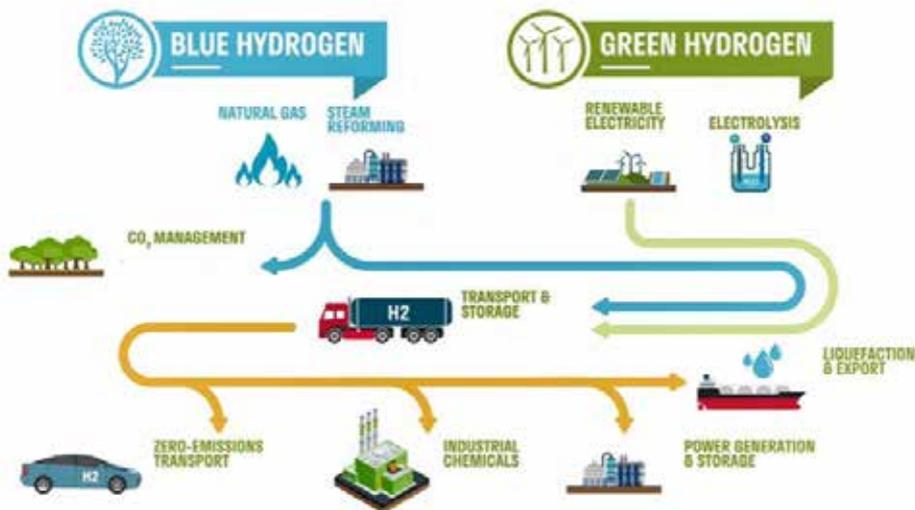


Figura 21. Vías de producción de hidrógeno verde y azul. Fuente: Woodside Petroleum.

Actualmente existen dos vías para generar hidrógeno a partir de residuos plásticos: la pirólisis y la fotorreformación.

La pirólisis

La pirólisis se utiliza para convertir residuos plásticos en sintegás, material carbonizado y alquitrán. El sintegás consiste principalmente en metano, monóxido de carbono e hidrógeno. Se puede proceder a aislar el hidrógeno del resto de los componentes del sintegás, que se queman para obtener energía. Esta es básicamente una versión diferente de la producción de hidrógeno gris.

En la etapa de la pirólisis, este proceso sufre de linealidad, emisiones y residuos, además de tener una huella de carbono relativamente alta considerando la energía incorporada en producir el plástico, clasificarlo y prepararlo para la pirólisis, así como el uso de energía en la planta de pirólisis para producir hidrógeno. Sin embargo, puede representar un resultado ambiental potencialmente más racional para los residuos plásticos no reciclables que la incineración o su eliminación en rellenos sanitarios. Ciertamente representa un mejor resultado que la producción de combustible fósil por medio de la pirólisis. Aunque el hidrógeno puede ser un ‘combustible limpio’, se seguirá quemando metano y otros componentes

del sintegás (incluyendo contaminantes como las dioxinas), lo cual plantea problemas similares como la conversión del plástico en combustible fósil. Actualmente, se está proponiendo que la compañías que Powerhouse Energy y Waste2tricity instalen plantas piloto en el Reino Unido.²⁸ Actualmente, no se ha instalado ninguna industria más allá de estas propuestas piloto.

La fotorreformación

Se utiliza la fotorreformación para convertir residuos plásticos en hidrógeno. Se está desarrollando una tecnología emergente para generar hidrógeno a partir de residuos plásticos no reciclables, sin las desventajas del proceso de pirólisis. Científicos del Reino Unido han desarrollado un sistema que utiliza puntos cuánticos de sulfuro de cadmio como fotocatalizadores para degradar los plásticos en presencia de luz solar y generar hidrógeno. El proceso opera bajo temperatura ambiente y presión ambiental normal, genera hidrógeno puro y convierte los polímeros de los residuos en productos orgánicos como formiato, acetato y piruvato (Uekert *et al.*, 2018).



Figura 22. Fotorreformación de residuos plásticos a hidrógeno.

Annika Friberg de Chemistry World informa que,

“Se coloca el fotocatalizador sobre el plástico y se procede a sumergir el plástico en una solución alcalina. La irradiación con la luz solar reduce el agua de la solución a hidrógeno, mientras que simultáneamente los polímeros del plástico se oxidan en pequeñas moléculas orgánicas. El grupo sometió el sistema a prueba, a través de fotorreformular tres polímeros comunes: el ácido poliláctico, el tereftalato de polietileno y el poliuretano. Los resultados coincidieron con los de los sistemas de fotocatalisis de evolución de hidrógeno de última generación que emplearon costosos reactivos de sacrificio.”

28 <https://www.rechargenews.com/transition/turning-plastic-waste-into-hydrogen-first-commercial-plant-moves-step-closer/2-1-733678>

El proceso, tal como se ha desarrollado hasta este momento, funciona de manera eficiente independientemente de los contaminantes orgánicos externos en los residuos plásticos o los aditivos incrustados. Aunque la técnica actualmente se encuentra en proceso de mejora, aún no se ha aplicado a escala piloto. Si bien básicamente es un proceso lineal, genera sustancias químicas finales útiles, así como hidrógeno que se puede utilizar como fuente de energía. Potencialmente, podría ser una forma de gestionar las grandes reservas existentes de residuos plásticos no reciclables que fuera más sencilla y menos perjudicial para el medio ambiente, sin los impactos negativos de la pirólisis.

LOS COMBUSTIBLES DERIVADOS DE RESIDUOS (CDR) Y LOS HORNOS DE CEMENTO

Aunque estrictamente hablando, los combustibles derivados de residuos (CDR) no son una forma de reciclado químico, es una forma de conversión de plásticos en combustible y, por lo tanto, se ha incluido en este punto con fines comparativos.

Han surgido numerosos términos para describir este ‘producto’, que es un combustible re-ensogado, mezclado o ‘diseñado’ hecho de residuos plásticos mezclados con otros elementos de residuos comerciales, industriales o municipales para ser quemados en hornos de cemento. Se le ha llamado: ‘combustible derivado de residuos’, ‘combustible alternativo’, ‘combustible procesado’, ‘combustibles secundarios’, ‘combustibles sustitutos’, ‘combustibles sólidos recuperados’, Climafuel®, etcétera. Para ser prácticos, en lo sucesivo se les denominará ‘CDR’.

Según el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible estos materiales son:

“Residuos y subproductos seleccionados con un valor calorífico recuperable (que) se pueden utilizar como combustible en un horno de cemento, reemplazando parte de los combustibles fósiles convencionales, como el carbón, siempre y cuando cumplan con especificaciones estrictas. A veces sólo se pueden utilizar después del pre-procesamiento para proporcionar combustibles ‘hechos a medida’ para el proceso de producción de cemento.”

En realidad, son sencillamente residuos plásticos, y residuos municipales, comerciales e industriales procesados y conformados en unidades basadas en el contenido calorífico para que la industria los queme. En otras palabras, son sencillamente residuos re-ensogados y combustibles fósiles en una etapa intermedia previa a la combustión. Las emisiones producto de la combustión son similares, si no es que idénticas, a las emisiones

tóxicas, de material particulado y de gases de efecto invernadero, que provendrían si se les quemara bajo su forma de ‘residuos mixtos sueltos’. La combustión de estos productos no se limita a los hornos de cemento (aunque consumen la mayoría de tales ‘combustibles’), sino que también se les quema en incineradores de residuos y en otras industrias de producción especializadas basadas en calderas.

Los ‘ingredientes’ de los CDR generalmente consisten en materiales reciclables secos, incluyendo:

- Madera
- Plástico
- Cartón
- Papel
- Textiles
- Residuos sólidos municipales

La producción de los CDR generalmente implica la recepción de residuos mixtos que están sujetos a:

- Recorte de bolsas / Trituración
- Cribado de tamaño
- Separación magnética
- Clasificador de aire (separación de densidad)
- Trituración gruesa
- Refinamiento de la separación a través de separación infrarroja
- Evaluación del contenido calorífico
- Empacado
- Peletización

Generalmente se diseña el procesamiento de residuos en CDR para eliminar materiales inorgánicos (vidrio, metales, arena, piedra, residuos orgánicos húmedos) y cualquier otro material que inhiba la combustión, y distribuir los diversos flujos de residuos dentro del producto terminado para homogeneizar el contenido calorífico del empaque o de los pellets.

Los defensores de los CDR argumentan que conducen a una reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del horno de



Figura 23. La creación de pacas y carga de CDR en Irlanda con destino al incinerador Landskrona Energi Swedish. Fuente: Geminor



Figura 24. Pellets de CDR. Fuente: Nexen Biomass

cemento o incinerador ya que los CDR desplazan a los combustibles fósiles. Por lo general, estos argumentos se basan en comparaciones con los residuos que se envían a rellenos sanitarios que llevan a emisiones altas de metano (un GEI potente) en vez de que se les procese como CDR. Nunca se comparan los resultados con el uso de energía renovable para compensar los combustibles fósiles, ya que, comparativamente, los resultados de los CDR son negativos. La quema de residuos mixtos para obtener energía como CDR en hornos de cemento o en incineradores de residuos, tiene el mayor potencial de calentamiento global por unidad de energía generada en comparación incluso con otros combustibles fósiles (ver la Figura 25), sin contar las energías renovables, como la energía solar o eólica.

La diferencia entre quemar residuos o quemar CDR en hornos de cemento es en gran medida una cuestión semántica que le vale millones de dólares a los productores de CDR y a los hornos de cemento que los utilizan. Las contorsiones del lenguaje involucradas en tratar de fingir que los CDR (y sus homónimos) son cualquier cosa menos residuos salieron a la luz recientemente cuando Filipinas investigó los envíos de CDR que hiciera

ResourceCo, una compañía basada en Australia, a Holcim Cement en Filipinas.²⁹

Con las tensiones diplomáticas entre Canadá y Filipinas a punto de llevar a una ruptura (incluyendo amenazas de guerra), debido a que Canadá no recuperó cientos de contenedores de residuos enviados ilegalmente³⁰, un mayor escrutinio de los contenedores transportados identificó envíos de residuos clasificados como CDR provenientes de Australia.³¹

El furor que siguió llevó a los funcionarios portuarios a cuestionar el etiquetado del cargamento: *“La pregunta es, ¿son los mismos? Ellos insisten en que sí lo son, pero discúlpenme si discrepo porque la basura es basura, y el combustible es combustible”*. En una posterior rueda de prensa, el portavoz presidencial Salvador Panelo argumentó: *“No vamos a permitir que nos traten como tiraderos de basura”*. Para complicar el problema, la Secretaría del Medio Ambiente declaró que el cargamento era legal porque eran CDR que se dirigían a los hornos de cemento de Holcim Filipinas.

Se siguen discutiendo las definiciones, discusión que se complica por la prohibición recientemente puesta en vigor por el Convenio de Basilea y la enmienda de Basilea³², que prohíbe que los Estados miembros de la OCDE y de la Unión Europea y Liechtenstein (los países del anexo VII) envíen desechos peligrosos, como se definen en el convenio, a países que no estén incluidos en el anexo VII³³—generalmente países de ingresos bajos a medios que no tienen la capacidad para gestionar esos residuos de manera ambientalmente racional. Bajo ciertas condiciones, el Convenio de Basilea permite que el país importador determine si un envío de un material determinado se considera desecho “peligroso” y, por lo tanto, que pueda rechazar el cargamento. Esto dependería del contenido y la concentración de materiales que pueden ser peligrosos dentro de los CDR o el flujo espiratorio máximo (PEF).³⁴ Se puede atribuir el aumento de los CDR a su naturaleza lucrativa. No sólo pueden los productores de CDR cobrarle a la industria y al gobierno local por los residuos que reciban, sino que también le puede cobrar al destinatario del CDR (por ejemplo, los hornos de cemento). En la trayectoria, también pueden beneficiarse

29 <https://cnnphilippines.com/news/2019/5/23/denr-emb-customs-fuel-holcim-australia-mismis-oriental.html>

30 <https://www.thetimes.co.uk/article/duterte-threatens-war-against-canada-over-dumped-rubbish-tb-msdj3nx>

31 <https://cnnphilippines.com/news/2019/5/23/denr-emb-customs-fuel-holcim-australia-mismis-oriental.html>

32 http://wiki.ban.org/The_Basel_Ban:_A_Triumph_Over_Business-As-Usual

33 <https://ipen.org/documents/basel-ban-amendment-guide>

34 U.S. Environmental Protection Agency, Emissions & Generation Resource Integrated Database, eGRID Versión 1.0, 9ª edición, (datos de 2010), publicado el 24 de febrero de 2014. <https://www.epa.gov/egrid> Datos resumidos y analizados por Energy Justice Network aquí: <http://www.energyjustice.net/egrid>

CO₂ (lbs/MWh)

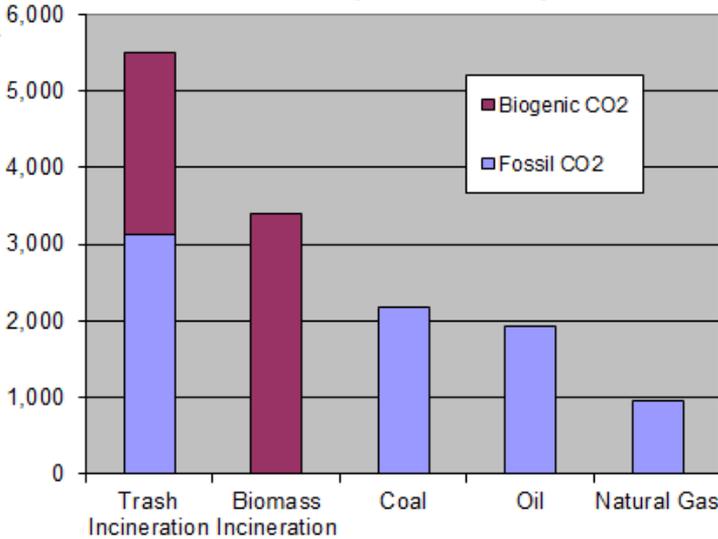


Figura 25. Emisiones de CO₂ de los residuos de combustión en comparación con otros combustibles por megavatio-hora. Fuente: US EPA³⁴

del valor monetario de la fracción de biomasa del CDR bajo varios protocolos de los gases de efecto invernadero, como el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea³⁵, el Certificado de Obligación Renovable del Reino Unido³⁶ y el Fondo de Reducción de Emisiones del gobierno australiano.³⁷ Se considera que la fracción de la biomasa, como el papel, el cartón y la madera, genera energía renovable, aunque hay estudios que han desacreditado efectivamente esta proposición de contabilidad del carbono (Haberl *et al.*, 2012, Searchinger 2010).

En su búsqueda de combustibles de alto poder calorífico, los hornos de cemento todavía tienen que limitar el uso de plásticos de desecho debido a los efectos corrosivos de los productos de degradación térmica. Hahladakis *et al.* (2018) afirma, “*Los halógenos emitidos por la combustión de residuos plásticos también pueden causar corrosión en incineradores y otras plantas térmicas. El cloro y el bromo pueden acumularse en los sistemas de los hornos de cemento, limitando así su capacidad de recuperación térmica del plástico.*”

³⁵ https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en

³⁶ <https://www.ofgem.gov.uk/environmental-programmes/ro/about-ro>

³⁷ <https://www.environment.gov.au/climate-change/government/emissions-reduction-fund>

De mayor preocupación para el medio ambiente y la salud humana son las implicaciones de que los hornos de cemento no funcionen según los estándares de las MTD y las MPA cuando utilizan plástico halogenado (bromo, cloro, flúor) como combustible. *“Sin embargo, la combustión descontrolada de los residuos plásticos y, en particular, de aquellos que contienen halógenos como el PVC, el politetrafluoretileno/teflón, el plástico que contiene retardantes de llama bromados, etcétera, puede causar emisiones de sustancias peligrosas, como gases ácidos y contaminantes orgánicos persistentes no intencionales (COPNI) como las dioxinas”* (Hahladakis *et al.*, 2018).

Los hornos de cemento que queman combustibles fósiles tradicionales representan un menor riesgo de este tipo de emisiones tóxicas. Sin embargo, si se incluyen residuos plásticos mixtos rebautizados como CDR, sólo aumentan estos riesgos, en particular para los países que no dispongan de las disposiciones sobre el monitoreo de las emisiones, su ejecución y monitoreo en general que se requieren para que los hornos de cemento funcionen según los estándares de las MTD y las MPA en Europa.

En conclusión, el término CDR consiste simplemente en cambiar el nombre que se le da a los residuos como producto para atraer subsidios de mitigación climática a expensas de una verdadera energía renovable, evitar las restricciones al comercio de residuos y obtener ganancias a través de transferir la carga de residuos de los países ricos a los países menos capaces de gestionarla.

CONCLUSIÓN SOBRE EL RECICLADO QUÍMICO

Los procesos de reciclado de sustancias químicas plásticas son tecnologías emergentes que se encuentran casi en su totalidad en una etapa piloto, con la excepción de algunas tecnologías de OASC. Las corporaciones que venden grandes volúmenes de plástico bajo la forma de productos y envases, como BASF³⁸, Unilever³⁹, Procter and Gamble⁴⁰, Mitsubishi Chemical Corporation⁴¹, Dow Chemical⁴², Chevron Phillips Chemical Company LLC⁴³ y otras, se están asociando o adquiriendo nuevas empresas de ingeniería, instalando compañías de reciclado químico e introduciendo tecnolo-

38 <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2019/basf-invests-in-quantafuel.html>

39 <https://www.unilever.com/news/news-and-features/Feature-article/2018/our-solution-for-recycling-plastic-sachets-takes-another-step-forward.html>

40 <https://purecycletech.com/2019/09/successful-run-of-feedstock-evaluation-unit/>

41 <https://www.hydrocarbonengineering.com/petrochemicals/26022020/mitsubishi-chemical-acquires-chemical-recycling-companies/>

42 <https://recyclinginternational.com/plastics/dow-signs-up-to-chemical-recycling/27557/>

43 <https://www.chron.com/business/energy/article/Chevron-Phillips-subsidiary-launches-chemical-13810002.php>

gías para enfocarse en la conversión de residuos plásticos en materias primas plásticas o químicas. Las empresas que producen bienes de consumo de alta rotación (FMCGC por su siglas en inglés), se han dedicado a difundir ampliamente sus intentos de aprovechar el reciclado químico como una solución al problema de la contaminación con plásticos, desviando la atención del público y de los formuladores de políticas con respecto a los impactos ambientales del plástico. El reciclado químico también es el eje de las soluciones propuestas por la Alianza para ponerle fin a los residuos plásticos (AEPW por su siglas en inglés)⁴⁴, cínicamente denominado consorcio por parte de compañías como Dow Chemical, RSM, ExxonMobil, Formosa Plastics Corporation y muchas otras petroquímicas y FMCGC que producen los productos petroquímicos y los plásticos que son el centro del problema de la contaminación.

Como ejemplo, Coca-Cola ha suscrito acuerdos tanto con Ioniqa⁴⁵, que recientemente comisionó la instalación de una planta con una capacidad de 10,000 toneladas anuales en los Países Bajos, como con Loop Industries⁴⁶ para poder tener acceso a contenidos de PET reciclado y despolimerizado para sus envases. Loop Industries, Inc., despolimeriza plástico PET y fibra de poliéster, botellas de plástico, envases, alfombras y textiles, así como plásticos oceánicos que se han degradado por la exposición al sol y a la sal. El sistema Loop descompone los residuos de PET en sus monómeros Dimetil Tereftalato (DMT) y Monoetilenglicol (MEG) a bajas temperaturas a presión atmosférica.⁴⁷

En lugar de limitar el crecimiento exponencial de la producción de plásticos, las grandes corporaciones petroquímicas ven el uso del reciclado químico como un medio para seguir funcionando como de costumbre, mientras que “los procesos de reciclado químico pueden contar como medios para alcanzar los objetivos del reciclado”⁴⁸. El objetivo no es reducir la producción de plásticos, sino más bien cumplir mínimamente con lo que estipulan los reglamentos y establecer una estrategia de comercialización que evite que se decreten prohibiciones a la producción de plásticos.

El reciclado químico permite conservar recursos y tal vez reciclar algunas formas de chatarra de plástico que el reciclado mecánico no puede reciclar (como los polímeros contaminados y mixtos). Este esfuerzo puede contribuir de manera marginal a la economía circular, aunque existe un gran número de preguntas sobre el mejoramiento de la producción, la

44 <https://endplasticwaste.org/>

45 <https://www.ptonline.com/news/coca-cola-invests-in-pet-recycling-initiatives->

46 <https://www.ptonline.com/articles/loop-industries-to-supply-100-recycled-pet-to-coca-cola-bottlers->

47 <https://www.loopindustries.com/en/tech>

48 BASF (2019) ‘BASF invests in Quantafuel to jointly drive chemical recycling of mixed plastic waste.’ <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2019/basf-invests-in-quantafuel.html>

intensidad energética, la contaminación y los residuos que se generan, que no se pueden responder debido a una falta de datos de la industria. Sin embargo, hay suficiente información en torno a técnicas como la pirólisis para sugerir que habrá problemas significativos; además, el concepto de “purificación” química/de disolventes sugiere que los residuos contaminados serán un producto considerablemente peligroso de estos procesos.

Sin embargo, a final de cuentas, mientras se sigan disparando las tasas de producción de plásticos a partir de petroquímicos, en un esfuerzo orientado a la producción de suministros por alejar a las compañías petroquímicas de las responsabilidades debidas al carbono contenido en los combustibles fósiles, no podrá haber un reciclaje químico (o mecánico) que pueda llegar a una resolución básica del problema de la contaminación con plástico. Mientras que las corporaciones petroquímicas sigan viendo la producción de plástico como un refugio seguro para mantener la extracción y producción de petroquímicos, la contaminación plástica seguirá plagando el planeta. Hasta que la regulación global pueda reducir la producción de plástico a un mínimo, dentro de límites ecológicamente sostenibles con altas tasas correspondientes de reciclado mecánico y químico, el reciclado químico seguirá siendo una distracción promovida por los departamentos encargados de relaciones públicas.

4. EL RECICLADO MECÁNICO

El reciclado mecánico sólo utiliza métodos mecánicos para reprocesar los residuos plásticos y esto generalmente implica moler, lavar, separar, secar, re-granular y mezclar compuestos (Ragaert *et al.*, 2014). Los materiales reciclados provenientes de estos procesos se pueden utilizar para reemplazar polímeros vírgenes en la producción de nuevos artículos de plástico. En el caso de los termoplásticos, después de volver a fundir los materiales reciclados, se les puede procesar por medio de moldeo por inyección o moldeo rotacional, extrusión y prensado por calor (Lettieri y Baeyens, 2009). Estas técnicas no son aplicables a los plásticos termoestables, ya que no se pueden volver a fundir.

El reciclado mecánico de residuos plásticos es una industria madura y bien establecida que opera muy por debajo de su capacidad debido a una gama de desafíos no sólo técnicos y financieros, sino además de desafíos relacionados con las políticas públicas. En la UE, en 2016, se reciclaron 8.4 millones de toneladas de plástico, mientras que se quemaron 11.3 millones de toneladas en incineradoras y alrededor de 7.4 millones de toneladas se depositaron en rellenos sanitarios (Delva *et al.*, 2019).

Entre estos desafíos, a la industria le ha resultado difícil superar los que se mencionan a continuación. A nivel técnico, muchos plásticos se han vuelto más complejos, están constituidos por múltiples capas y contienen muchos aditivos (incluyendo aditivos tóxicos) que impiden o inhiben la capacidad de los recicladores mecánicos para procesarlos o venderlos. Es tan grande la competencia de los plásticos baratos producidos a partir de plástico virgen a partir de petroquímicos que el volumen y la escala requeridos para recolectar, limpiar y procesar los residuos plásticos, limitan el mercado de los materiales plásticos reciclados. La incineración de residuos en algunas regiones y países (UE, Japón, los países escandinavos y Estados Unidos) compite por los suministros de plástico reciclable.

Los formuladores de políticas en la mayoría de los países, aún no han pasado a regular el contenido de plástico reciclado en los productos o establecer políticas de adquisición pública con el fin de impulsar la demanda de plástico reciclado, apoyar una economía circular y proporcionar un impulso significativo a la inversión en el reciclado de plástico. La excesiva dependencia de un modelo de exportación de residuos por parte de muchos países desarrollados ha dejado a su infraestructura nacional de reciclaje en un estado de subdesarrollo, con inversiones insuficientes y una baja demanda interna. Australia es un ejemplo de un país que depen-

día en gran medida de las exportaciones de residuos plásticos a China, mientras descuidaba su infraestructura nacional de reciclaje sólo para llegar a enfrentar una crisis cuando se implementó la política ‘Espada Nacional’ de China.⁴⁹ Muchos países han dependido de la exportación de residuos plásticos de bajo valor de países de ingresos altos a países de ingresos bajos y medianos que reciclan parte de los residuos mientras que el resto se quema o se tira al medio ambiente, contaminando así la cadena alimentaria (IPEN, Nexus 3, Ecoton, 2019). Esas exportaciones reducen la necesidad de establecer industrias nacionales de reciclado mecánico de residuos plásticos en muchos países de ingresos altos.

LOS PROCESOS TÉCNICOS CLAVE

La recolección

Para que un sistema de reciclado mecánico de plástico sea eficiente y rentable, es muy importante la separación en la fuente y los sistemas de recolección de fuentes públicas, comerciales e industriales. Estos procesos se deben complementar con esquemas de recolección específicos de fuentes agrícolas, automotrices y de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).⁵⁰ Los principales métodos de recolección utilizados en muchos países desarrollados son la recolección en la acera, en puntos de entrega, la readquisición y los programas de reembolso de depósitos. Estos se enfocan en los envases de plástico y los productos de consumo. Los residuos industriales de plásticos (recortes y chatarra) procedentes directamente de las fábricas pueden ser particularmente valiosos debido a la falta de contaminación debida a la mezcla con residuos orgánicos. Entre más limpios sean los residuos plásticos entrantes, menos intensiva en recursos es la fase de limpieza. En los países de bajos ingresos, los procesos de recolección, clasificación y limpieza son menos sofisticados e implican altos riesgos para los trabajadores, aunque también pueden ser muy eficientes (ver la sección 1).

La clasificación y la limpieza

La mayoría de los plásticos mixtos llegan contaminados con materia orgánica y otros materiales a la planta de reciclado mecánico y se deben clasificar, separar y limpiar para facilitar el reciclado mecánico. El primer

49 <https://www.abc.net.au/news/2019-01-11/australias-recycling-crisis-one-year-on-whats-changed/10701418>

50 Aunque es importante recolectar plásticos de estas fuentes, se debe tener mucho cuidado para garantizar que se evalúe su contenido de COP. Fracciones significativas de RAEE y plásticos para automóviles contienen retardantes de llama bromados, que pueden contaminar a los polímeros no bromados durante el procesamiento de la creación de materiales reciclados de polímeros.

paso es la eliminación de materiales no plásticos como metales, madera y papel. Durante los siguientes pasos, se da la trituración para facilitar la separación. La separación de los plásticos rígidos de los plásticos no rígidos (como los paquetes de chips de plástico y los plásticos laminados) es seguida por la división en plásticos de colores y transparentes. Finalmente, se tiene que separar los tipos de polímeros en diferentes fracciones. Los metales se pueden retirar por medio del uso de imanes y corrientes de torbellino. Los plásticos no rígidos se pueden separar por medio de sopladores y tamices de viento. La separación por colores se lleva a cabo mediante sensores ópticos de reconocimiento de color (Delva *et al.*, 2019).

La clasificación de los polímeros

Los polímeros mixtos disminuyen el valor del material reciclado y contribuyen a la degradación de la fuerza y otras propiedades de los productos finales, o bien pueden causar dificultades en el procesamiento debido a las diferentes temperaturas de fusión. La clasificación de los polímeros se lleva a cabo por medio de métodos directos e indirectos. Los métodos directos incluyen la separación por diferencia de densidades (Figura 30), pero para la mono separación, puede que se necesiten técnicas más avanzadas debido a la superposición de densidades, como la flotación o la flotación de espuma (Burat *et al.*, 2009), el uso de centrifugadoras o de hidrociclones (Pascoe, 2006). Los métodos indirectos implican el uso de escáneres ópticos para detectar y separar los polímeros por tipo. La tecnología utilizada más comúnmente es el sensor FT-NIR (Transformada de Fourier cercana al infrarrojo), aunque puede que resulte en una falsa detección de plásticos negros y contaminantes. El campo de los sensores se está desarrollando rápidamente, y actualmente se están utilizando sensores de plástico negro y equipos de detección de PVC (ver las figuras 27, 28 y 29). Recientemente, la introducción de bioplásticos también ha suscitado preocupación por la contaminación de la cadena de reciclaje y la potencial incompatibilidad con los polímeros basados en combustibles fósiles (Alaerts *et al.*, 2018).

La refundición y la extrusión

Posteriormente, se pueden someter a los polímeros clasificados, limpiados y triturados a la refundición (excepto los plásticos termoestables) y a la extrusión, donde se forman en pellets a granel (conocidas, en inglés, como lágrimas de sirena o nurdles,) para su venta a fabricantes de productos de plástico. Con algunos polímeros como el PET, se aplica la policondensación en estado sólido (SSP) dentro de un vacío a temperaturas específicas (180-240 °C), haciendo que los contaminantes post-consumo suban a

la superficie del PET y sean eliminados por la fuerza del vacío (Cruze y Zanin, 2006).

LOS ADITIVOS TÓXICOS DESAFÍAN EL RECICLADO MECÁNICO Y QUÍMICO

En este informe, ya se han mencionado numerosos desafíos tanto institucionales y económicos como relacionados con las políticas públicas que enfrenta el reciclado, sin embargo, también hay desafíos técnicos relacionados tanto con la complejidad de los materiales poliméricos post-consumo como con su separación y procesamiento. La termodegradación de los polímeros durante el proceso de reciclado debido al calor y la esquila mecánica es un problema significativo (Delva *et al.*, 2019). Antes de llegar a la planta de reciclado, los residuos de plástico pueden haber sufrido otras formas de degradación, como exposición al calor, a la luz, al oxígeno y a la humedad (Ragaert, 2016), que también pueden degradar el producto realizado con material reciclado.

Un segundo desafío es la inmiscibilidad de los principales polímeros de alto volumen en la fase de refundición, lo que lleva a la subsiguiente degradación del producto final realizado con material reciclado. Los recicladores intentan segregar las mono-corrientes tanto como sea práctico para reducir la degradación del producto final a un mínimo. Ningún proceso de reciclado mecánico ha logrado alcanzar mono-corrientes 100% libres de contaminación, aunque frecuentemente se alcanzan niveles muy bajos de contaminación cruzada de los polímeros (Delva *et al.*, 2019).

El tercer gran reto técnico es la gestión de los aditivos. Como se describe en la sección 1, el uso generalizado de aditivos químicos en los plásticos para impartir características específicas conduce a problemas significativos en el reciclado químico y mecánico. Para la mayoría de las formas de reciclado mecánico, se transportan los aditivos químicos tóxicos, sus productos de degradación e incluso los ‘productos secundarios’ a través de la cadena de reciclado para introducirlos en el material plástico reciclado destinado a su inclusión en nuevos productos de plástico.

Los productos secundarios pueden incluir contaminantes atrapados en los aditivos durante su proceso de fabricación. Un ejemplo son las dioxinas bromadas altamente tóxicas que se forman durante la fabricación de los BFR que luego ‘siguen’ a los BFR hasta incorporarse en los polímeros cuando se añaden BFR a los productos plásticos finales (Watson *et al.*, 2010). Se pueden detectar las dioxinas bromadas no sólo en el producto final al que se le añadieron BFR, sino también conforme va avanzando junto con el plástico triturado en la fase del reciclado mecánico, para posteriormente incluirse en productos nuevos que utilizan materiales de

plástico reciclado (Petrlik *et al.*, 2018), e incluso incorporarse al medio ambiente después de la eliminación.

Los trabajadores del reciclado mecánico se encuentran en una situación particularmente vulnerable durante las fases de trituración y extrusión de los polímeros. La temperatura para la extrusión del plástico se encuentra dentro del rango de la formación y liberación de dioxinas (Hahladakis *et al.*, 2018). En ese momento, se pueden liberar otras sustancias tóxicas y sustancias químicas que perturban el sistema endocrino (EDC), lo que da lugar a la exposición a metales, compuestos orgánicos volátiles (COV), ftalatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), PBDE (éteres de difenilo polibromados), poliamida-epiclorhidrina (PAE), polibromo dibenzopardioxinas y furanos (PBDD/F) entre otras sustancias (Tang *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2013).

LOS PRODUCTORES DE PLÁSTICO VIRGEN DESCARGAN EL COSTO DE LAS EXTERNALIDADES ASOCIADAS CON SUS PRODUCTOS EN EL SECTOR DEL RECICLADO MECÁNICO. LA ADICIÓN DE ADITIVOS TÓXICOS E INCOMPATIBLES A LOS POLÍMEROS EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN REPRESENTA DESAFÍOS COSTOSOS PARA LOS RECICLADORES MECÁNICOS UBICADOS RÍO ABAJO QUE REDUCE SU VIABILIDAD ECONÓMICA.

Los trabajadores del reciclado químico también pueden estar sujetos a exposiciones de gases volátiles y partículas fugitivas de aditivos tóxicos durante la fase de procesamiento, ya sea que estén utilizando disolventes, calentado en plantas de pirólisis, en un pre-tratamiento a los residuos plásticos para su procesamiento o manejando los residuos tóxicos del reciclado químico.

El reciclado mecánico representa una contribución útil al objetivo general de una economía circular, aunque frente a los aumentos exponenciales de la producción de plástico virgen económico, no

representa una solución al paradigma actual de la contaminación plástica. Los productores de plástico virgen descargan el costo de las externalidades asociadas con sus productos en el sector del reciclado mecánico. La adición de aditivos tóxicos e incompatibles a los polímeros en la etapa de producción representa desafíos costosos para los recicladores mecánicos aguas abajo, con lo cual se reduce su viabilidad económica.

Es necesario que se obligue a los productores de plástico virgen a responsabilizarse por los aditivos que usan (sean tóxicos o de otro tipo) y por los productos no reciclables (laminados complejos, etcétera), por medio

de regulaciones, impuestos u otros instrumentos de política pública y del mercado para así permitir que el reciclado mecánico adopte una posición significativa en la economía circular. Estas medidas también implicarían considerables beneficios para la salud humana y el medio ambiente derivados de la reducción de la exposición. Aunque se pueden aplicar estas medidas de inmediato, aún así no resultan suficientes. En última instancia, el pre-requisito esencial para avanzar hacia una economía circular para los plásticos es congelar o reducir los niveles actuales de producción de plásticos y, paralelamente, regular el contenido de los polímeros reciclados.

EL INFRA-RECICLADO

Un problema común asociado con el reciclado mecánico es la degradación y mezcla de polímeros que conduce a la pérdida de las características que hicieron que los polímeros pre-reciclados inicialmente fueran deseables. Conforme se van degradando las cualidades del plástico a través del proceso de reciclado, puede que algunos materiales reciclados no puedan regresar como insumos para plásticos nuevos y se les utiliza para crear productos de plástico con un valor menor y una aplicación limitada.

Algunos ejemplos incluyen:

- bancos para parques
- postes de plástico para jardines
- tuberías de drenaje
- alfombras
- durmientes para ferrocarril
- revestimientos para cajas de furgonetas
- carreteras de plástico

La mayoría de estos productos han perdido tantas características estructurales que no se les pueden volver a reciclar después de haber llegado a este punto. No queda claro si se puede aplicar el reciclado químico a estos productos infra-reciclados en un esfuerzo por recuperar monómeros o polímeros.

Existe gran preocupación por proyectos recientes que intentan integrar los residuos plásticos en el encarpado de las carreteras como un medio de infra-reciclado. Se espera que las carreteras duren entre 4 y 6 años (Hahladakis *et al.*, 2018) antes de que se deterioren, y no queda claro cómo se va a gestionar los materiales procedentes del mantenimiento o la demolición. Muy pocos estudios han intentado examinar las implicaciones

para el medio ambiente y la salud humana de mezclar residuos plásticos en el betún asfáltico o los materiales para la pavimentación utilizando sólo plásticos derretidos.

Algunas de las preocupaciones incluyen:

- que se perpetúe un ciclo lineal de extracción-producción-eliminación de plásticos que ‘oculte’ los residuos;
- los riesgos que corren los trabajadores de carreteras por inhalar emisiones tóxicas provenientes de los plásticos que se derriten durante la construcción, incluyendo las dioxinas cloradas y bromadas (de PVC y plásticos retardantes de llama bromados, respectivamente);
- los riesgos que corren los trabajadores de carreteras por inhalar otros gases provenientes de plásticos que se derriten durante la construcción, como PP, PS o PE, incluyendo especialmente monóxido de carbono, acroleína, ácido fórmico, acetona, formaldehído, acetaldehído, tolueno y etilbenceno, así como de la amplia gama de aditivos incorporados en los plásticos, como los ftalatos;
- la liberación de aditivos químicos y microplásticos en el medio ambiente a partir de una combinación del desgaste y la abrasión de los neumáticos de los vehículos y el consiguiente impacto sobre el medio ambiente.

Al infra-reciclar los residuos plásticos mediante la trituración y la extrusión en productos y usos de menor valor, también existe un riesgo significativo para los trabajadores que participan en el proceso de fabricación, donde el calentamiento de los residuos libera compuestos volátiles o partículas (y esto también se puede aplicar a los trabajadores de la construcción de carreteras con materiales que contienen plástico). Los procesos de trituración y calentamiento pueden poner en peligro a los trabajadores por medio de la exposición a emisiones como dioxinas, ftalatos y COV, pero también a monómeros adsorbidos por partículas con características tóxicas, como el bisfenol A (BPA), el estireno y los monómeros de cloruro de vinilo.

5. LA GESTIÓN DEL PLÁSTICO CONTAMINADO CON COP

Los plásticos que están contaminados con contaminantes orgánicos persistentes (COP) debido a que se les han añadido deliberadamente para imprimirle una propiedad al plástico (retardante de fuego, etcétera), o que se han añadido inadvertidamente porque el COP es un contaminante traza de otro aditivo, o porque el plástico en forma de desecho se ha contaminado por COP (como es el caso de algunos residuos marinos plásticos), en la mayoría de los casos se deben de considerar por separado de la mayoría de las otras formas de residuos plásticos. El Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes exige que todas las partes destruyan o transformen irreversiblemente los residuos de COP (incluyendo los plásticos contaminados con COP) para que ya no presenten características de COP. Estas características incluyen toxicidad en pequeñas cantidades, persistencia en el medio ambiente, capacidad de viajar largas distancias y la bioacumulación en tejidos grasos de organismos vivos que causan contaminación de la cadena alimentaria.

Para ser definido como residuos de COP y ser objeto de las medidas estipuladas en el artículo 6 del Convenio de Estocolmo, el plástico debe contener uno o más COP y que cada COP exceda el nivel de concentración prescrito conocido como nivel de bajo contenido de COP (NBCC). Estos niveles se revisan periódicamente y, a veces, se reducen conforme la ciencia demuestra que los COP son peligrosos a niveles más bajos de lo que se pensaba anteriormente. Por lo tanto, si un pieza de plástico contiene un COP o una mezcla de COP a una concentración superior al NBCC, se le debe destruir y no se le debe reciclar, a menos que se pueda eliminar el COP y gestionarlo por separado (existen algunos casos en los que esto sí es posible).

¿POR QUÉ SE DEBE DE DESTRUIR EL PLÁSTICO CONTAMINADO CON COP Y NO SE LE DEBE RECICLAR?

No se deben reciclar los plásticos contaminados con COP. El Convenio de Estocolmo prohíbe el reciclado de residuos de COP para evitar que las sustancias químicas altamente tóxicas se introduzcan a otros productos y causen exposiciones no intencionales y peligrosas. Sin embargo, de vez en cuando, bajo presión política, el Convenio ha concedido exenciones limi-

tadas en el tiempo para permitir el reciclado de materiales contaminados con algunos COP, como los retardantes de llama bromados, el pentaBDE comercial y el octaBDE comercial. En enero de 2020, la Unión Europea anunció la revocación de la exención del reciclado de plásticos y otros materiales que contengan éteres de difenilo polibromados (PBDE), un retardante de llama bromado ampliamente utilizado en la producción de plásticos. La exención que permite el reciclado de estos COP demostró ser un error muy costoso.

Estudios realizados por IPEN han demostrado que el plástico contaminado con PBDE (generalmente proveniente de residuos electrónicos y plásticos de la industria automotriz), se ha infiltrado en la cadena de reciclado de plásticos no contaminados. Como resultado, se ha descubierto que los bienes de consumo con un alto potencial de exposición, como los juguetes para niños y los utensilios de cocina, fabricados a partir de plástico reciclado, contienen niveles elevados de estos COP. Otros COP también se están introduciendo en la cadena de reciclado de plásticos, contaminando así productos hechos a partir de plástico reciclado con parafinas cloradas de cadena corta (PCCC)⁵¹, dioxinas, dioxinas bromadas⁵², hexabromociclo-dodecano (HBCD) y otras sustancias químicas altamente tóxicas que son COP.

La continua contaminación de la cadena de reciclado de plástico con contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos amenaza con envenenar la economía circular antes de que salga de su infancia. Por lo tanto, antes de que se dé cualquier discusión sobre los méritos relativos de las diferentes 'soluciones' a los residuos plásticos al final de su ciclo de vida, es importante reconocer que se debe identificar el plástico contaminado con COP y se le debe eliminar del sistema general del reciclado, y posteriormente se le debe destruir o tratar de tal manera que se eliminen los COP o que el plástico deje de presentar características de COP⁵³, permitiendo así que se reciclen los polímeros restantes por otros medios. Existen unos cuantos ejemplos muy limitados en los que se pueden eliminar o separar los COP (como la regeneración de disolventes y la OASC). Según las directrices del Convenio, se debe de destruir el resto del plástico contaminado con COP de la manera más ambientalmente racional posible.

51 https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-sccps-report-v1_5-en.pdf

52 <https://ipen.org/documents/toxic-soup-dioxins-plastic-toys>

53 Este es un requisito del artículo 6 del Convenio de Estocolmo.

TÉCNICAS PARA LA GESTIÓN AMBIENTALMENTE RACIONAL DE LOS PLÁSTICOS CONTAMINADOS CON COP

En esta sección sólo se examinan las tecnologías ambientalmente racionales para la destrucción del plástico contaminado con COP, y algunas tecnologías específicas en las que se pueden separar los COP del plástico y permitir el reciclado de los polímeros restantes.

Uno de los requisitos de las tecnologías ambientalmente racionales es que destruya o transforme los COP de manera irreversible, sin generar más COP en el proceso de manera no intencional. Los COP no intencionales o COPNI son subproductos de las tecnologías de combustión en las que los residuos de cloro y carbono se encuentran entre la materia prima (la vía de formación de precursores) y la síntesis *de novo* en la que se forman policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDD) y policlorodibenzofuranos (PCDF), conocidos comúnmente como dioxinas y furanos, en la fase posterior a la combustión. El Convenio de Estocolmo incluye los COPNI en las listas de los anexos C, parte I del Convenio de Estocolmo:

- Hexaclorobenceno (HCB)
- Hexaclorobutadieno (HCBd)
- Pentaclorobenceno (PeCB)
- Bifenilos policlorados (PCB)
- Policlorodibenzo-p-dioxinas y policlorodibenzofuranos (PCDD/PCDF) y
- Naftalenos policlorados (NCP).

La combustión y otros procesos de incineración, como los incineradores que convierten residuos en energía, la pirólisis, la gasificación, los hornos de cemento, los altos hornos metalúrgicos y las unidades de arco de plasma, tienen una fuerte tendencia a formar COPNI en las emisiones y en los residuos provenientes de sus filtros, como las cenizas volantes, el polvo de horno de cemento (CKD), las cenizas depositadas y los efluentes de aguas de lavado donde se utilizan depuradores húmedos para eliminar los gases de combustión. IPEN no considera que estas tecnologías sean ambientalmente racionales debido a su propensión a generar COPNI altamente peligrosos⁵⁴, perpetuando así el ciclo de contaminación por COP. Este informe no discute más a fondo el uso de estas tecnologías para el tratamiento de los plásticos contaminados con COP.

⁵⁴ Ver el anexo C del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>



Mixed PP/PE fraction

Figura 26. Sistema de clasificación UniSort BlackEye de Steinert para la separación de plásticos negros con retardantes de llama bromados.

Fuente: Steinert Global

SEPARACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS CONTAMINADOS CON COP PROVENIENTES DE OTROS POLÍMEROS

Para gestionar los residuos plásticos contaminados con COP de una manera económicamente eficiente, se requiere de la separación de los residuos no afectados. Esto presenta algunos desafíos, ya que las pruebas de COP pueden ser complejas y costosas ante la ausencia general del etiquetado de plásticos que contengan aditivos de COP. Es probable que las cubiertas duras para computadoras y productos eléctricos (poliestirenos de alto impacto - HIP), por ejemplo, contengan retardantes de llama bromados identificados como subconjuntos de octaBDE, pentaBDE y decaBDE del grupo PBDE. Se utilizan COP como las PCCC como plastificantes en diferentes tipos de plásticos, pero especialmente en el PVC. Sin embargo, se han desarrollado algunas técnicas para simplificar el proceso de identificación.

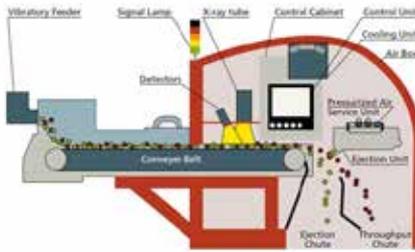
Se han desarrollado algunos métodos electrónicos de tamizaje para separar los plásticos contaminados con COP bromados de otros polímeros, incluyendo tecnologías de imagenología y de fluorescencia de rayos X (XRF).

UniSort BlackEye de STEINERT es un tipo de equipo de imagenología que puede clasificar el plástico por tipo de polímero (incluyendo el plástico negro).⁵⁵ El equipo UniSort BlackEye utiliza tecnología de imagenología hiperespectral (HSI).

El equipo UniSort BlackEye clasifica plásticos negros como PE, PP, PVC y estirenos, además de recuperar material reciclado de los materiales que fueron enviados previamente para someterse a procesos como la recuperación térmica.

⁵⁵ <https://steinertglobal.com/au/magnets-sensor-sorting-units/sensor-sorting/nir-sorting-systems/uni-sort-blackeye/>

Operating principal



Principle chute system

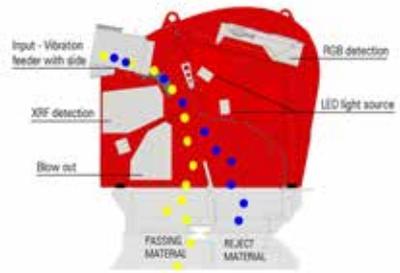


Figura 27. Separador de plástico basado en Redwave XRF.

Fuente: Redwave Austria

Brominated plastic (sorted with REDWAVE-XRF)



Brominated plastics (BFR)

bromine-free plastic

Figura 28. Plásticos post-separación divididos en plástico bromado y no bromado utilizando el sistema Redwave XRF. Fuente: Redwave Austria

LA SEPARACIÓN DE XRF (FLUORESCENCIA DE RAYOS X)

El uso de XRF para detectar materiales con base en la composición química es un método eficaz para identificar los retardantes de llama bromados en los plásticos, aunque también se le podrá aplicar a los plásticos fluorados en el futuro debido a la capacidad de la XRF para detectar elementos halogenados, como bromo, cloro y flúor. La método desarrollado por la compañía Redwave es un ejemplo de esta aplicación de XRF para la separación de plásticos bromados.⁵⁶ Han incorporado una tecnología de detección basada en XRF en una cinta transportadora, y tecnología de separación para la detección masiva de plásticos que permite separar los productos en plásticos bromados y plásticos libres de bromo.

Una alternativa a los sistemas de separación fija incluye los dispositivos XRF portátiles que se pueden aplicar a la revisión de los lotes de plástico que se envían para su reciclado que se sospeche que están contaminados con COP bromados. También se pueden utilizar para detectar la posible

⁵⁶ <http://www.redwave-us.com/recycling-solutions/plastics/>



Regulatory Compliance Concentration Limits

Element / Regulation	RoHS/ WEEE	Consumer/ CPSIA	Halogen-Free
Cd	<100 ppm	N/A	N/A
Cr	Cr ⁶⁺ <1000 ppm	N/A	N/A
Hg	<1000 ppm	N/A	N/A
Pb	<1000 ppm	<100 ppm substrate <90 ppm surface	N/A
Br	PBB PBDE <1000 ppm	N/A	<900 ppm
Cl	N/A	N/A	<900 ppm
Br + Cl	N/A	N/A	<1500 ppm



Figura 29. Dispositivo portátil Delta XRF. Fuente: Olympus

contaminación con COP bromados de superficies en los centros de reciclado y procesamiento de plásticos donde se han manejado plásticos bromados. Los dispositivos XRF portátiles se pueden calibrar para detectar y medir una gama de elementos, incluidos el bromo y el cloro. Un ejemplo de este dispositivo ampliamente disponible es el que produce Olympus⁵⁷ (que también está asociado con Redwave para la producción de suministros de componentes para sistemas fijos), y está diseñado para examinar bienes de consumo, analizar tanto metales y aleaciones como la contaminación de superficies con elementos como el plomo y el mercurio.

IPEN utiliza este dispositivo para examinar plásticos y bienes de consumo (incluyendo juguetes para niños) que se sospecha puedan estar contaminados con COP bromados como resultado de haber sido producidos a partir de plásticos reciclados en los cuales los PBDE han entrado en la cadena de reciclado. Posteriores análisis de laboratorio de los artículos identifi-

⁵⁷ <https://www.olympus-ims.com/en/innovx-xrf-xrd/>

cados como contaminados pueden producir un límite de cuantificación más bajo y diferenciar los congéneres individuales de BFR, si es necesario, para una garantía de calidad adicional. El dispositivo XRF puede ser un método de detección rentable para excluir artículos no afectados en lugar de utilizar análisis de laboratorio más costosos para cada artículo.

LA SEPARACIÓN DE DENSIDAD DE PLÁSTICOS BFR A TRAVÉS DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN POR FLOTADO/HUNDIDO

Un estudio sobre los aditivos químicos como barreras al reciclado de plásticos en el sector informal de la India (Haarman y Gasser, 2016) incluye un excelente análisis del uso del método de separación por flotado/hundido basado en la densidad de los polímeros. El estudio confirma que el método de separación por flotado/hundido para plásticos pre-triturados tiene un alto grado de efectividad, además de ser el único método con implica un mínimo de problemas de salud ocupacional. Otros métodos, como la prueba de Beilstein, que consiste en aplicar alambre de cobre caliente a fragmentos de plástico para ver si el brillo de la llama es color verde (halógeno positivo), pueden generar emisiones potencialmente dañinas, por lo cual no se les considera ambientalmente racionales.

Haarman y Gasser investigaron métodos empleados previamente por el sector informal en la India para separar diferentes grupos de polímeros. Descubrieron que se puede utilizar agua potable para separar las poliolefinas (PE, PP) de otros plásticos, y que las mezclas de agua y etanol pueden separar los plásticos con densidades más bajas que el agua potable (como PE de PP). Para los plásticos con retardantes de llama bromados, se pueden utilizar soluciones salinas (como soluciones con NaCl) para separar polímeros con densidades mucho más altas (como, ABS/HIPS/PP20 de plásticos más pesados). También describen cómo se pueden organizar los baños de flotado/hundido de diferentes densidades en serie para obtener varias fracciones homogéneas.

Haarman y Gasser informan que cuando se utiliza una solución en agua con una densidad de 1.08-1.10 g/cm³, la fracción flotante de los plásticos queda libre de plásticos en aquellos lugares en los que se agregaron BFR intencionalmente durante la fabricación. Puede que no segregue a los plásticos que se hayan contaminados con niveles mínimos de BFR como resultado del uso de plástico reciclado contaminado en su producción. Prácticamente todos los plásticos que se hunden están contaminados con BFR como aditivo intencional añadido durante la producción. Algunos otros plásticos más pesados también pueden terminar en los polímeros que se hunden, incluyendo el PVC, el PC y el PET, debido a que se superponen en la densidad de los polímeros. Sin embargo, establecer cuidado-

samente soluciones de diferentes densidades en los baños subsiguientes puede separar estos plásticos en grupos de polímeros homogéneos.

La investigación de las técnicas del sector informal de la India por parte de Haarman y Gasser está respaldada en gran medida por estudios de laboratorio sobre la separación de la densidad de flotación de las fracciones bromadas de plásticos hechos a partir de RAEE europeos (Schlummer y Maurer, 2006; Lloyd-Smith e Immig, 2018). Las técnicas de separación de densidad por flotado/hundido no son 100% efectivas, aunque sí tienen altas tasas de recuperación y separación que se pueden aplicar a países con grandes sectores informales, recursos limitados para sistemas separadores ópticos relativamente costosos y grandes reservas de residuos plásticos que se necesitan clasificar. La gama de tecnologías y proveedores de clasificación óptica y de frecuencias no se limita a las que se examinaron anteriormente, que se presentan como ejemplos de los diferentes enfoques disponibles.

LOS COP EN LA BASURA MARINA PLÁSTICA

Una de las categorías más inusuales de los residuos plásticos contaminados con COP es la basura marina plástica. Numerosos estudios (Bouhroum *et al.*, 2019; Van *et al.*, 2012; Mato *et al.*, 2001; Endo *et al.*, 2005; Takada *et al.*, 2006; Ogata *et al.*, 2009) han demostrado la adsorción de contaminantes orgánicos persistentes en la basura marina plástica. El

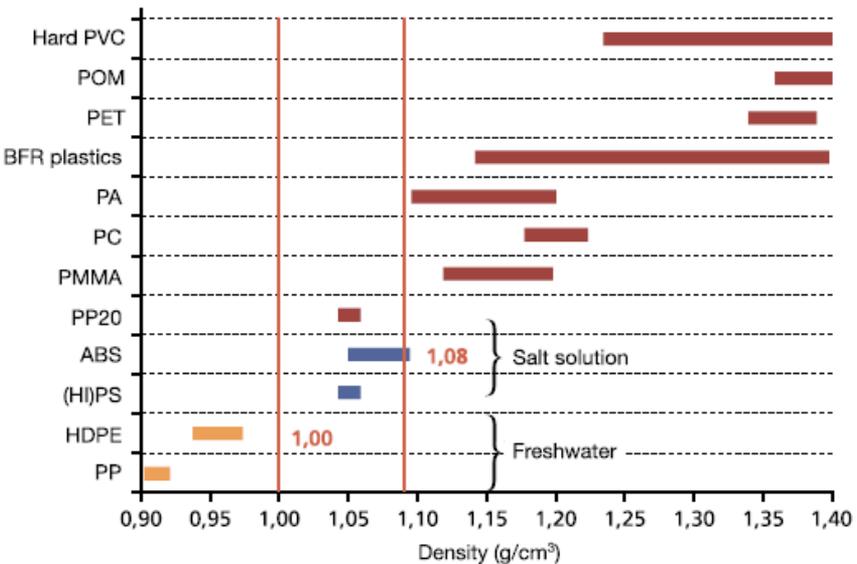


Figura 30. Aplicación de densidad y solución para diferentes polímeros.

Fuente: Haarman y Gasser 2016

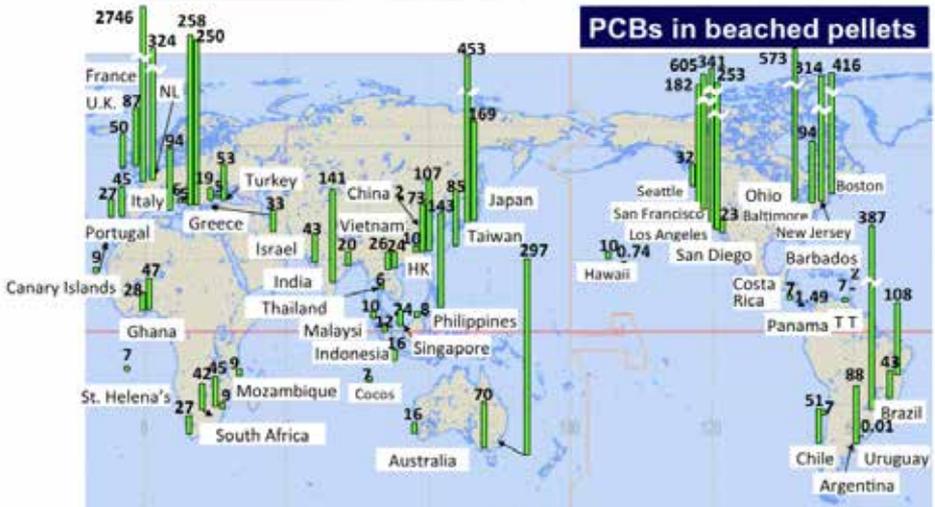


Figura 31. Mapeo de Pellet Watch de los niveles de PCB en pellets de plástico dispersos a nivel mundial - Los números indican ng/g-pellet.

mecanismo es a través de la naturaleza hidrofóbica inherente de los COP que tienen el impulso de pasar de una matriz marina o acuática hacia una matriz con presencia de aceites, grasas e hidrocarburos. La base petroquímica de la mayoría de los plásticos significa que son particularmente vulnerables a la adsorción de COP lipofílicos. Se ha identificado la adsorción de COP en las superficies de los plásticos de hasta un millón de veces la concentración en el agua marina, como una nueva fuente significativa de contaminación con COP de la cadena alimentaria (Teuten *et al.*, 2009).

'Pellet Watch' es una iniciativa científica única del Dr. Hideshige Takada de la Universidad de Agricultura y Tecnología de Tokio. El Dr. Takada y su equipo organizan voluntarios en todo el mundo para recolectar pequeños pellets de plástico de las playas siguiendo un protocolo unificado.

El Dr. Takada explica: “*Los pellets de resina plástica son pequeños granulos generalmente con forma de cilindro o disco con un diámetro de unos pocos milímetros. Estas partículas de plástico son materia prima industrial transportada a sitios de fabricación donde los ‘plásticos de usuario’ se fabrican mediante la re-fusión y el moldeo en productos finales.*” Debido a los tiraderos de basura, los derrames y la naturaleza ubicua de la fabricación de plástico, estos pellets ahora se distribuyen en los océanos de todo el mundo.

Estos pellets de plástico absorben contaminantes orgánicos persistentes y otras sustancias químicas tóxicas como PCB, DDE y nonilfenol. Las

criaturas del mar los consumen confundidos con comida y los pellets se trasladan por el océano llegando a los estuarios y playas. Cuando los voluntarios devuelven los pellets, se analizan en los laboratorios de vigilancia de pellets en Japón (Pellet Watch) y los resultados se mapean en una base de datos global que muestra los niveles relativos de contaminantes como los PCB en diferentes áreas geográficas (Figura 31). Los resultados se documentan en artículos revisados por pares (Mato *et al.*, 2000; Endo *et al.*, 2005). El programa Pellet Watch⁵⁸ sigue en marcha, analizando los plásticos contaminados con COP de todo el mundo.

Además de los plásticos que pueden entrar en el medio marino con una 'precarga' de aditivos de COP, como los retardantes de llama bromados, existe una creciente necesidad de gestionar los plásticos contaminados con COP que adsorben en su superficie la contaminación ambiental de los COP en el medio ambiente marino. Algunas organizaciones bien intencionadas que recolectan este tipo de basura marina tan solo para quemarla en las playas, terminan promoviendo la conversión de pirólisis cruda en combustibles o intentan otros métodos de manejo ambientalmente irracionales, muchas veces sin darse cuenta de los problemas de contaminación y propagación de COP y COPNI que implican estos enfoques. Las tecnologías para la gestión ambientalmente racional y la destrucción de residuos contaminados con COP que se describen a continuación son igualmente aplicables a la basura marina plástica impactada por los COP y a los plásticos que tienen aditivos intencionales de COP.

58 <http://www.pelletwatch.org/en/what.html>

6. LAS TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA COMBUSTIÓN PARA PLÁSTICOS CONTAMINADOS CON COP

Las siguientes tecnologías tienen la capacidad de destruir el plástico contaminado con COP de una manera ambientalmente racional o de separar los COP del plástico, lo que permite destruir los COP y reciclar el plástico.

REDUCCIÓN QUÍMICA EN FASE GASEOSA (REDUCCIÓN DE HIDRÓGENO)

La reducción química en fase gaseosa (RQFG) se desarrolló inicialmente para destruir residuos de COP, como los PCB. La RQFG se desarrolló en la década de los años ochenta en Canadá, y operó a escala de laboratorio antes de que se comercializara, llegando a operar a escala completamente comercial en la década de los años noventa. Por un periodo de cinco años, durante la década de los años noventa, funcionó con éxito una planta a gran escala en Kwinana, Australia Occidental. Esta planta destruyó toda la reserva de PCB de ese estado y gran parte de las reservas de COP de Australia. La misma tecnología se desarrolló más y posteriormente se estableció a escala tanto piloto como comercial en Canadá, Estados Unidos y Japón, teniendo una capacidad demostrada de destruir todos los COP a niveles de alta eficiencia de destrucción (ED).

La tecnología RQFG se basa en el uso de hidrógeno a temperaturas elevadas (aprox. 875 °C) y a baja presión para lograr la reducción termoquímica de los compuestos orgánicos. Los materiales sólidos a granel contaminados, se colocan en una cámara sellada llamada procesador de reducción térmica por lotes (PRTL), donde los COP pasan por un proceso de desorción térmica y se transportan al reactor por medio del gas de hidrógeno calentado. Los COP líquidos se precalientan e inyectan directamente al PRTL. Se procede a procesar los lotes de suelos y sedimentos contaminados en un sistema de reactor TORBED, o lecho fluidizado, una versión modificada del PRTL que permite un mayor procesamiento.



Figura 32. Unidad RQFG en funcionamiento en Australia Occidental, 1996.

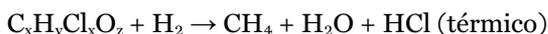
Fuente: Hallett Environmental & Technology Group Inc. 2018



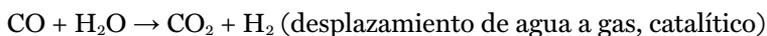
Figura 33. Procesador de reducción térmica por lotes (PRTL) de la unidad RQFG. Fuente: Hallett Environmental & Technology Group Inc. 2018

Es necesario que algunos residuos pasen por un pre-tratamiento; además, para la depuración, el sistema requiere de electricidad, hidrógeno, agua y cáustica. La tercera generación de la tecnología (desarrollada por Hallett Environmental & Technology Group Inc. de Ontario, Canadá) también puede generar energía a partir del exceso de gas de proceso de metano rico en hidrógeno que excede significativamente los requisitos parasitarios del proceso⁵⁹ y permite la exportación de energía. Las reacciones que se producen generan metano y, subsiguientemente, el metano se convierte en gas hidrógeno en un sistema auto-regenerador y re-circulante de gases de proceso.

Se puede expresar la química general de la conversión de una estructura de hidrocarburos que contienen cloro y posiblemente oxígeno de la siguiente manera:



El metano se convierte en hidrógeno a través del reformado con vapor y las reacciones de desplazamiento de gas a agua, que se expresan de la siguiente manera:



Los residuos del proceso incluyen licor depurador y agua que es adecuada para la descarga industrial, y materiales sólidos (tambos metálicos, etcétera) que se descontaminan y son adecuados para rellenos sanitarios. Las emisiones son principalmente cloruro de hidrógeno, metano y otros hidrocarburos, incluyendo el benceno. Un espectrómetro de masas en línea puede analizar todos los gases de salida del reactor para garantizar la decloración completa, y después de la depuración del cloruro de hidrógeno, se puede proceder a re-circular los gases plenamente o bien a dividirlos entre el reactor y el combustible para alimentar la caldera. El sistema puede funcionar en modos modulares, transportables y fijos, incluyendo los PRTL transportables para abordar la descontaminación in situ de los sitios contaminados con COP.

Un sistema de doble PRTL puede procesar alrededor de 75 toneladas de sólidos por mes. Los insumos líquidos se pueden procesar a 2-4 litros por minuto. Un reactor TORBED semi-móvil puede procesar alrededor de 300-600 toneladas por mes. Las principales ventajas son la destrucción completa de todos los COP, la auto-regeneración del gas de proceso de hidrógeno, la movilidad y la huella pequeña (1,000m²) para sistemas con

⁵⁹ Se refiere a la energía necesaria para que funcione la tecnología.

Matrix		Solid Material	Liquid and granular solid mixture
Dioxin/furan TEQ levels in waste feed (ng/g)		6500	8.5
Dioxin/furan TEQ levels in Outputs	Treated material (ng/g)	0.087	0.00086
	Scrubber water (ng/L)	0.013	0.0000021
	Stack Gas (ng/m ³)	0.0031	< 0.016
Destruction efficiency (%)		99.99993	99.99999

Figura 34. Eficiencia de destrucción de la RQFG para las dioxinas en los residuos. Fuente: Hallett Environmental & Technology Group Inc. 2018

un procesamiento de 70 ton/mes para reservas más pequeñas o sitios contaminados más pequeños, bajas cantidades de residuos sólidos procesados y una larga historia de utilización comercial exitosa. Los estimados de costos recientes para el establecimiento de una planta de RQFG son de alrededor de \$ 50 millones de dólares para su construcción y \$ 1 millón de dólares para la capacitación del personal.⁶⁰ Esto corresponde a alrededor de un 10% del costo de una incineradora moderna de residuos. En Canadá, se está desarrollando un nuevo reactor a escala piloto para el tratamiento de los residuos de la trituradora de automóviles (ASR), que son materiales poliméricos altamente contaminados con retardantes de llama bromados procedentes de la tapicería de los automóviles.

Una de las ventajas de este proceso para destruir los plásticos contaminados con COP es que se puede desarrollar el hidrógeno excedente y utilizar para procesar residuos, así como para generar energía. También tiene algunas de las limitaciones de materia prima de otras tecnologías, lo que permite que se carguen lotes de materiales en el PRTL.

MOLIENDA DE BOLAS O DESTRUCCIÓN MECANOQUÍMICA (MCD)

Esta tecnología es una aplicación mecanoquímica que combina el impacto mecánico con reactivos químicos para crear una reacción de reducción para sustratos clorados como PCB o plaguicidas. El objetivo es lograr la deshalogenación reductora de los residuos contaminados con COP. Los residuos contaminados con COP se colocan en el dispositivo del molino de bolas con un compuesto alcalino metálico que actúa como donante de hidrógeno y se le hace vibrar vigorosamente para permitir la agitación de las bolas de acero, el reactivo y la mezcla de residuos. El proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente, en recipientes cerrados, sin necesidad de

60 Comunicación personal con Hallett Environmental & Technology Group, Inc. 2018



Source: D Hallett True Energy Inc.



Figura 35. Sí es posible la carga de residuos plásticos por lote en el PRTL.

calentamiento. No hay que manejar ningún gas de proceso, lo que evita la liberación de compuestos orgánicos peligrosos.

El cloro en los residuos de COP se convierte en compuestos inorgánicos llamados CaCl_2 o $\text{Ca}(\text{ClOH})$. Los reactivos pueden incluir óxido de calcio (CaO), magnesio (Mg), sodio y otros metales, incluyendo sus respectivos óxidos. El material contaminado se coloca en el molino de bolas, que es esencialmente un recipiente metálico que puede funcionar como reactor por lotes, o incluso como reactor continuo con el reactivo y los rodamientos de las bolas de metal. Se ha aplicado con éxito tanto a PCB como a plaguicidas, así como a suelos contaminados con dioxinas. Se han desarrollado tres aplicaciones comerciales de buena calidad, las cuales se basan en los mismos principios: la deshalogenación de Tribochem por reacción mecanoquímica (DMCR), la destrucción mecanoquímica (MCD) de EDL y Radicalplanet (del instituto de investigación: Research Institute Pty Ltd). Los experimentos realizados en laboratorio basados en la molienda de bolas, también han demostrado ser eficaces para destruir hexabromociclododecano (Zhang *et al.*, 2014a) y éteres de polibromodifenilos (Zhang *et al.*, 2014b).

Un proveedor de tecnología (EDL Europe) describe así su proceso de destrucción mecanoquímica (MCD): “...los puntos de colisión de las bolas entre sí y entre las bolas y la superficie son las principales regiones de fractura donde se inician las reacciones químicas. Las reacciones inducidas en el punto de fractura incluyen la formación de radicales y la transferencia de electrones que resultan en la destrucción de los enlaces químicos. EDL aprovecha estos fenómenos químicos para destruir hasta los contaminan-

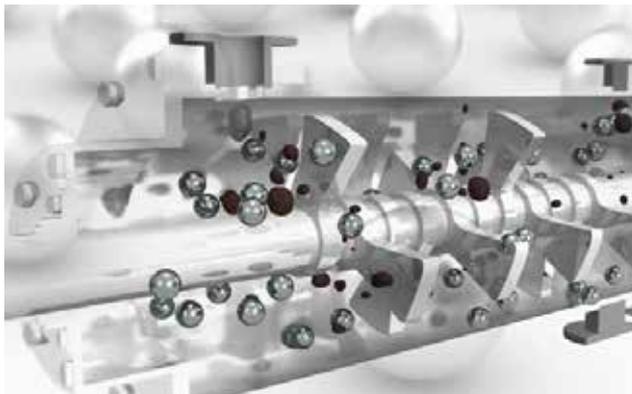
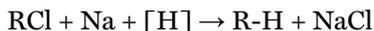
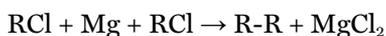


Figura 36. Ilustración del interior de un molino de bolas giratorio. Fuente: EDL Asia

tes más persistentes que representan una amenaza para la salud humana y ambiental.”

EDL utiliza una versión patentada de esta tecnología, conocida como Destrucción Mecanoquímica (MCD), para remediar suelos y plaguicidas. Su versión de esta tecnología, incluye un eje central giratorio adicional equipado con rotores en el recipiente del reactor principal. Conforme va girando el eje, agita las bolas de metal a una alta velocidad, llevando a un nivel de impacto mucho mayor de las bolas entre sí y entre las bolas y la superficie. El proceso químico es muy complejo y se basa en transformaciones radicales que involucran especies radicales metal-orgánicas. A continuación se presentan versiones simplificadas de estas reacciones (ONUUDI, 2007).



Más recientemente, EDL Europe llevó a cabo una prueba conjunta financiada por el PNUD y el FMAM para remediar una vieja base aérea estadounidense en Bien Hoa, Vietnam, donde se le dio tratamiento a 150 toneladas de suelo contaminado con dioxinas y PCB similares a las dioxinas. La tecnología logró una alta eficiencia de destrucción para las dioxinas, reduciendo sus niveles en el suelo hasta 1,000 ppt (1 ppb). En el sitio de Bien Hoa, se pusieron a prueba otras tecnologías para evaluar

su idoneidad para la remediación a gran escala del sitio. La MCD ha sido preseleccionada entre los criterios de selección y las estimaciones de costos en comparación con la incineración de los residuos de dioxinas, ya que el costo del proceso de MCD resulta hasta \$60 millones de dólares más bajo, además de que no genera COPNI. También han completado proyectos de tratamiento de plaguicidas, PCB y dioxinas para el ejército estadounidense en Alaska y California, y para el gobierno japonés y múltiples proyectos privados. La primera remediación importante del sitio se hizo en Mapua, Nueva Zelanda, un sitio altamente contaminado con lindano, DDT, dieldrina y aldrina. El sitio es actualmente un sitio de uso mixto residencial y recreativo.

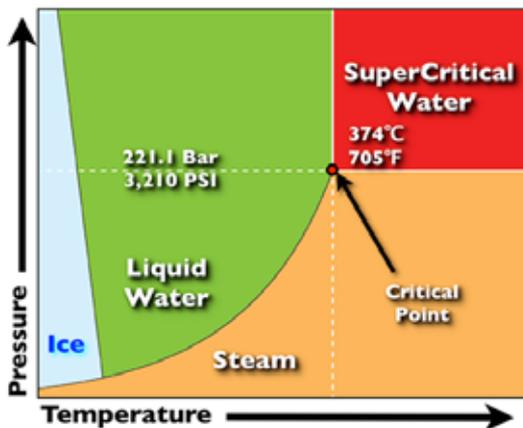
También se ha comprobado la efectividad de la molienda de bolas para desbrominar plásticos contaminados con retardantes de llama bromados, lo cual puede permitir que se reciclen los polímeros de forma segura (Zhang *et al.*, 2014a y 2014b).

OXIDACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA (OASC) Y OXIDACIÓN EN AGUA SUPERCRÍTICA PARA SU ESCALAMIENTO INDUSTRIAL (OASCI)

A lo largo de los últimos 30 años, diferentes compañías han estado desarrollando sistemas de oxidación en agua tanto supercrítica como subcrítica y algunas de ellas cuentan con una experiencia comercial sustancial en la destrucción de COP como el PCB. Las tecnologías comparten principios similares de destrucción de contaminantes orgánicos utilizando un agente oxidante como peróxido de hidrógeno, oxígeno o nitrito. El término 'supercrítico' se refiere al estado del agua inmediatamente anterior a su fase de cambio de líquido a gas bajo una temperatura y presión determinadas (por ejemplo, 374°C y 218 atmósferas). El agua subcrítica se refiere al estado del agua inmediatamente por debajo de su nivel crítico (por ejemplo, 370°C y 262 atmósferas). En este estado, los materiales orgánicos se pueden oxidar y descomponer rápidamente. Para la destrucción de PCB, las condiciones típicas de reacción son temperaturas de entre 400 y 500°C, una presión de 25MPa, con un tiempo de reacción de entre 1 y 5 minutos.

A los sistemas supercríticos, en general, se les inyectan los residuos en una columna junto con el agua y el oxígeno; se mezclan, calientan y comprimen hasta que alcancen el punto supercrítico. Se trata de un sistema totalmente cerrado. En esta fase, las propiedades del agua cuentan con una elevada energía cinética molecular que es altamente reactiva y, combinada con oxígeno, puede oxidar y destruir los residuos orgánicos. La reacción produce nitrógeno, agua y dióxido de carbono. La destrucción de COP clorados lleva a la producción de niveles elevados de ácido clorhídrico. El

Figura 37. Parámetros del agua supercrítica.



ambiente altamente ácido que esto genera, requiere que el equipo estructural de los recipientes del proceso sean resistentes a la corrosión, como aleaciones de titanio en combinación con aditivos anticorrosivos como el carbonato de sodio. El proceso no es adecuado para lotes de sólidos, pero sí se le puede utilizar para dar tratamiento a residuos acuosos, aceites, disolventes, lodos y sólidos con un diámetro menor a 200 μm . Las versiones iniciales de esta tecnología eran susceptibles a la corrosión, pero esto se resolvió con el uso de materiales resistentes a la corrosión.

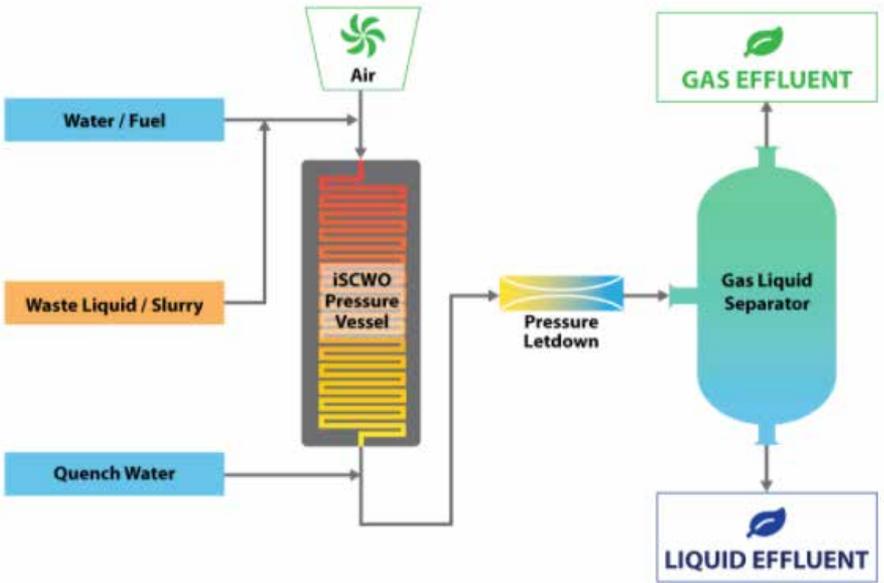
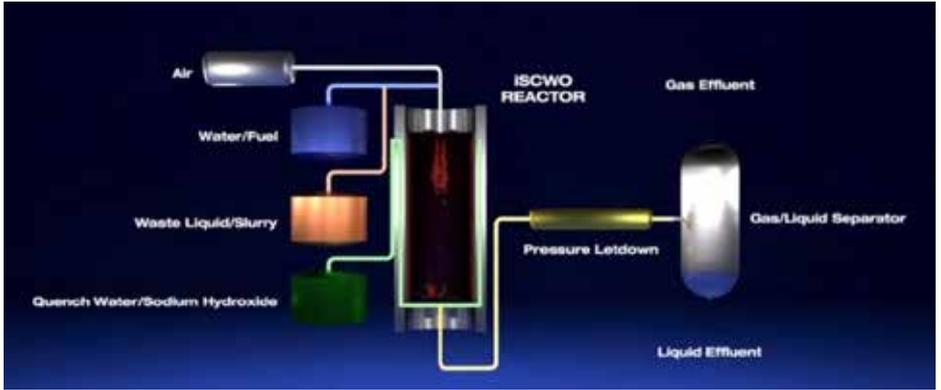
A partir del año 2013, hubo 3 plantas plenamente operativas, 5 ya construidas y 9 planeadas para la construcción. Desde entonces, muchas de estas plantas se han vuelto operativas. La planta que lleva más tiempo de instalada, la opera la compañía Japan Environmental Safety Corporation (JESCO), ubicada en Japón; se le utiliza para la destrucción de PCB y cuenta con una capacidad de 2000 kg de PCB diarios (Marrone *et al.*, 2013). Aunque los costos pueden variar significativamente debido a la capacidad y el tipo de OASC que se desarrolle, un estudio realizado por Aki *et al.* (1998) halló que la destrucción de desechos peligrosos procedentes de la industria petroquímica se podría realizar a costos significativamente más bajos a través de implementar la OASC en vez de utilizar la incineración. Los costos de instalación son 15% menos elevados y los costos operativos de la OASC son sólo alrededor de un 10% de los costos de la incineración de líquidos peligrosos. Actualmente el ejército estadounidense utiliza la OASC ampliamente para la destrucción de desechos peligrosos y de armas químicas, incluyendo las unidades móviles basadas en barcos.

Marrone, al resumir una revisión integral del estado global de la OASC, señala que *“la comercialización de la tecnología de la OASC sigue siendo un área de gran interés y actividad”*. Las principales ventajas de la OASC son que es baja en emisiones, de bajo costo, de alta eficiencia de destrucción y requiere de bajos recursos asociados (catalizadores) para su operación en áreas remotas. Diferentes investigadores (Goto, 2016, Liu *et al.*, 2016) y operadores industriales han realizado estudios sobre la OASC y los residuos plásticos.

Una empresa desarrolló la aplicación a un mayor grado de comercialización que puede tratar residuos plásticos. General Atomics desarrolló modelos de procesamiento relativamente elevados, diseñados para la destrucción tanto de residuos industriales peligrosos, en general, como de desechos no peligrosos. A esta tecnología se le refiere como Oxidación en Agua Supercrítica para su escalamiento industrial o OASCI. Actualmente, se está implementando un proyecto financiado por FMAM para el tratamiento de depósitos de residuos de DDT en Kirguistán que utiliza esta tecnología. Aunque todavía no se han desarrollado plantas independientes de destrucción de plásticos contaminados con COP, la tecnología tiene la capacidad de procesar plásticos. Además, varias plantas de OASC ya llevan dos décadas despolimerizando plásticos en Japón.

La OASCI de la compañía General Atomics funciona a través del siguiente proceso: se bombea aire hacia un recipiente de acero cerrado del reactivo y se le somete a una presión de 3200 psi, para posteriormente calentarlo a 650oC. Se le bombea agua y conforme va fluyendo el líquido hacia el recipiente del reactivo, se activa la pre-ignición. Se calienta el agua y se le presuriza por encima del punto crítico, en términos termodinámicos de 650oC a 235 bar. Cuando se alcanza el punto crítico, se le agregan los residuos orgánicos mezclados con agua de enfriamiento (además de hidróxido de sodio, si se le requiere). Las condiciones supercríticas permiten que se mezclen en agua los materiales orgánicos, los reactivos y los productos de la oxidación; se les oxida y se les destruye. Se procede a descargar el líquido restante a través de una reducción de la presión a condiciones atmosféricas.

Los productos de desecho líquidos y gaseosos procedentes del proceso consisten de dióxido de carbono, agua y, según los residuos de los que se trate, de sales y óxidos metálicos. Se ventila el vapor hacia la atmósfera. No se libera ninguna partícula o bien puede que se requiera de filtros de reducción de la contaminación. Se produce agua limpia que no requiere de ningún pre-tratamiento para descargarla al drenaje (el uso de las aguas residuales se ve limitado por el elevado nivel de salinidad y de óxidos metálicos).



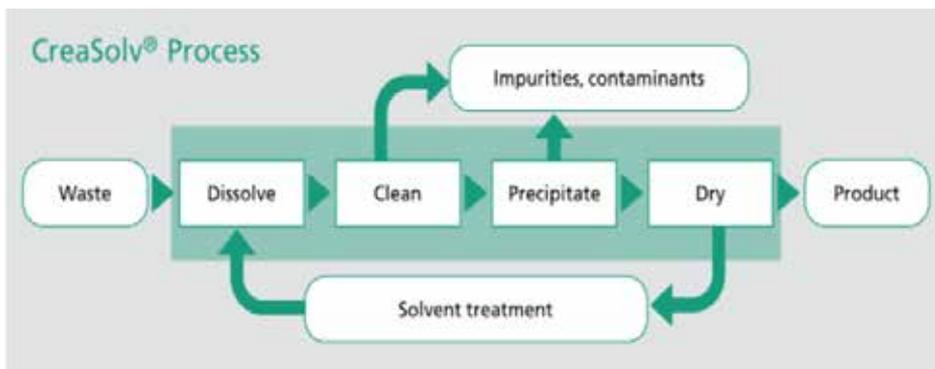


Figura 38. Diagrama de flujo del proceso de CreaSolv®.

EL PROCESO DE CREASOLV®

Inicialmente, se desarrolló el proceso de CreaSolv® para maximizar las oportunidades del reciclado de los residuos de poliestireno extruido (XPS) que habían sido tratados con retardantes de llama bromados incluidos como COP en las listas del Convenio de Estocolmo, incluyendo PBDE y HBCD. Aunque aquí se menciona el proceso como un método para tratar plásticos contaminados con COP (a través de separar los COP de los materiales reciclados), también cumple con la definición de 'reciclado químico' descrita en otra sección de este informe. El proceso de CreaSolv® no destruye a los COP, sino que actúa como separador eficaz, permitiendo que los COP se concentren y se destruyan a través de una de las otras tecnologías mencionadas anteriormente o de otras tecnologías alternativas a la destrucción sin combustión.

El proceso utiliza un disolvente patentado para disolver los residuos plásticos y separar los contaminantes y aditivos de los polímeros blanco. Los polímeros tienen una solubilidad específica, y se puede enfocar en el disolvente para seleccionar el polímero objeto y eliminarlo a un alto nivel de pureza.

Después de la fase de disolución, se retira el material sólido restante utilizando medios mecánicos. Se eliminan, a nivel molecular, los polímeros no objeto, los aditivos y las sustancias peligrosas, como los BFR mediante un proceso de purificación. En la etapa posterior a la purificación, queda una solución de macromoléculas de los polímeros objeto, que es de calidad virgen. Se procede a eliminar los polímeros objeto del disolvente a través de la precipitación y del secado. Se regresa al proceso cualquier disolvente recuperado durante la etapa de purificación, secado y precipitación. Se pueden utilizar los polímeros objeto como materia prima para la produc-

ción de plástico. En el caso de la extracción de los BFR, se puede incorporar una segunda etapa para recuperar el bromo; una segunda etapa que incorpora la incineración de las impurezas y contaminantes eliminados durante el proceso de CreaSolv®. El bromo se captura en depuradores selectivos y luego se re-vende a los fabricantes de productos de bromo. Este proceso secundario no es necesario para la recuperación de los polímeros plásticos y tiene impactos ambientales significativos debido a la etapa de incineración.

Inicialmente se desarrolló CreaSolv® para tratar, separar y reciclar poliestireno, y cumple con esa tarea con éxito y eficiencia. Sin embargo, más recientemente Unilever ha intentado utilizar la tecnología para reciclar el polietileno que proviene de pequeños residuos de envases de plástico conocidos como bolsitas. Las bolsitas se utilizan para empaquetar cantidades muy pequeñas de un producto, incluyendo cualquier cosa desde champú hasta salsas picantes, y se pretende que sean las personas con ingresos extremadamente bajos que no pueden comprar grandes volúmenes, quienes las compran. Las bolsitas son pequeñas, laminadas, no reciclables y, por lo tanto, no tienen ningún valor. Como resultado, son un aspecto muy visible de la contaminación con residuos plásticos en muchos países en desarrollo. Unilever afirma que puede reciclar el polietileno, que representa el 60% de los materiales en las bolsitas.

Los informes oficiales de Unilever sobre su primera planta de reciclado CreaSolv® Sachet, con una capacidad de tres toneladas diarias, sugieren que sí está funcionando, pero que están ‘resolviendo problemas comerciales y técnicos’⁶¹ antes de aumentar la capacidad a una planta de 30 toneladas diarias. Siguen existiendo problemas importantes con la recolección de las pequeñas bolsitas como residuos plásticos, que tradicionalmente no aborda el sector informal del reciclado debido a su falta de valor. Las ONG

61 <https://www.unilever.com/news/news-and-features/Feature-article/2018/our-solution-for-recycling-plastic-sachets-takes-another-step-forward.html>



Figura 39. I-D: Autoclave Bondtech, autoclave in situ con mesa de elevación en un hospital, contenedor de basura.



Figura 40a. Sistema de desinfección de residuos médicos Sanitech como unidades montadas en camiones y unidades estacionarias.



Figura 40b. Productos de residuos desinfectados y triturados de una unidad de Sanitech.

que monitorean la operación actual han informado sobre una serie de incendios que se han dado en la planta y una escasez de bolsitas de plástico para procesar, así como preocupaciones de que se está forzando al proceso a tratar residuos para los que no se le diseñó. También se requiere más información sobre la caracterización, la toxicidad y el destino de un 40% del material que no se recupera en el proceso de reciclaje de estas bolsitas de plástico.

2006-2016 evolution of plastic waste treatment (EU28+NO/CH)

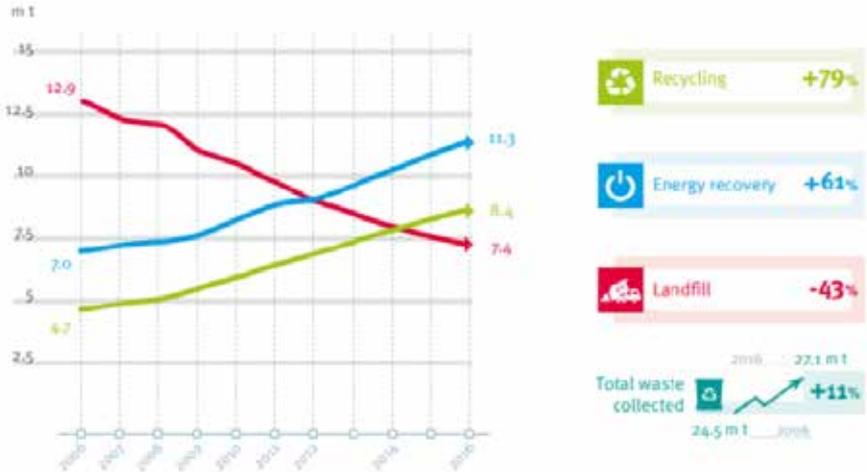


Figura 41. Evolución del tratamiento de residuos plásticos en Europa 2006-2016. Fuente: Delva et al. 2019

LAS TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA COMBUSTIÓN PARA LOS RESIDUOS MÉDICOS PLÁSTICOS

Bajo circunstancias normales, las instalaciones médicas generan cantidades significativas de residuos médicos, incluyendo residuos médicos infecciosos, que se deben gestionar con cuidado para garantizar que su eliminación no dé lugar a una exposición humana innecesaria y a la propagación de enfermedades. Una fracción significativa de estos residuos son de plástico y pueden incluir equipos de protección personal (EPP), como mascarillas y escudos faciales, gorras, guantes, delantales y cubre botas. También se puede encontrar en forma de equipo médico, como jeringas, bolsas de sangre, tubos, bolsas, etcétera. En circunstancias inusuales como una pandemia, se puede acelerar rápidamente la tasa de acumulación de residuos médicos plásticos usados, y las opciones de gestión requieren de la capacidad para tratar dichos residuos que pueden llegar a requerir de unidades de desinfección transportables.

En el pasado, muchas veces se utilizaban los incineradores de residuos médicos para eliminar residuos médicos plásticos infecciosos. Sin embargo, la alta proporción de PVC utilizada en el EPP médico y otros equipos lleva a emisiones elevadas de dioxinas y cenizas contaminadas provenientes de muchos incineradores, particularmente en los países de bajos ingresos, donde los incineradores de residuos son de construcción rudimentaria

con poco o ningún control de la contaminación del aire. El contenido de cloro del PVC tiene una influencia significativa sobre la generación de dioxinas en las cámaras de combustión.

Afortunadamente, existen tecnologías alternativas a la combustión firmemente establecidas y comercialmente disponibles para tratar esta forma de residuos. La mayoría son unidades de desinfección de diferentes formas y tamaños que utilizan el tratamiento con vapor para desinfectar los residuos médicos. Estas van desde unidades bastante pequeñas para clínicas comunitarias hasta unidades industriales a gran escala para hospitales y prestadores de servicios de tratamiento de residuos médicos. Algunos operan en forma fija y otros son móviles. Los autoclaves son relativamente fáciles de operar en comparación con los incineradores de residuos, y no requieren de un equipo exorbitantemente costoso de control de la contaminación del aire (CCA) para los incineradores de residuos médicos. Como mínimo, los incineradores de residuos médicos deben estar equipados con CCA, incluyendo precipitadores electrostáticos para la captura de partículas, inyección de carbón activado para la minimización de las dioxinas y los COPNI, e inyección de cal para reducir las emisiones de gases ácidos. Algunos también pueden estar equipados con cámaras de filtros cuya instalación y mantenimiento resultan costosos. Los incineradores también generan importantes gases de efecto invernadero en comparación con las tecnologías alternativas a la combustión basadas en vapor y microondas.

Tanto el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) como la Organización Mundial de la Salud (OMS), apoyan el uso de tecnologías alternativas a la combustión por encima de la incineración debido a los COPNI que libera la tecnología de la incineración (PNUMA, 2003; PNUMA, 2012). A veces se proponen tecnologías de combustión distintas de la incineración, como los hornos de cemento, para la quema de residuos médicos. Sin embargo, según la Parte II de las Directrices de las MTD/MPA para las categorías de las fuentes incluidas en el Convenio de Estocolmo, inciso (b): los desechos peligrosos procedentes de la combustión en hornos de cemento, no son adecuados para la quema de residuos médicos.

Existe una amplia gama de unidades de vapor y microondas disponibles para adaptarse a la mayoría de las aplicaciones clínicas y el tratamiento de lotes. En el Compendio de Tecnologías para el Tratamiento y la Destrucción de Residuos Sanitarios de 2012 del PNUMA, hay una evaluación detallada que incluye las tasas de procesamiento y los residuos.⁶²

62 Disponible en línea en <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8628>

Las unidades de autoclave utilizan vapor en lugar de la combustión para la desinfección y no requieren de CCA, ya que no tienen emisiones peligrosas. No producen residuos de cenizas peligrosas después del tratamiento, sino que producen una versión desinfectada de los residuos tratados. La mayoría de las unidades de autoclave son fijas, aunque existen algunos diseños que son altamente móviles, como las unidades Sanitech. En las unidades Sanitech, se trituran los residuos y se les somete a desinfección con vapor a través de calefacción por microondas. La compañía Sanitech sugiere que se puede reciclar el flujo de residuos como productos de plástico de menor grado de calidad. Esto dependería en cierta medida de los insumos de materia prima y la separación de otros materiales, como objetos punzantes y vendajes, que contaminarían una flujo potencial de residuos reciclados. La prioridad de las tecnologías de autoclave es desinfectar y no reciclar, por lo que los productos de este proceso se depositan en rellenos sanitarios.

Las unidades Sanitech operan con una trituradora de materiales que expone el material de desecho a un ambiente de vapor calentado por microondas a altas temperaturas a través de un tornillo de Arquímedes para garantizar que el tiempo de residencia sea suficiente para destruir cualquier patógeno en los residuos. Se realiza una prueba periódica utilizando esporas de *Bacillus atrophaeus* para realizar la validación de la inactivación microbiana mediante la inserción de una cápsula en lotes de residuos, que se recupera al final del proceso y se analiza para garantizar que se hayan destruido los patógenos por completo. Tiene un nivel de procesamiento relativamente alto de 810 kg/h y opera en configuraciones estacionarias, que se pueden instalar en terrenos hospitalarios, y se pueden transportar fácilmente (se les construye siguiendo las especificaciones de los contenedores en los cuales se les transporta). También cuentan con vehículos expresamente convertidos que albergan unidades Sanitech para su envío rápido a múltiples plantas para el tratamiento por lotes de los residuos.

En situaciones de pandemia, se pueden instalar rápidamente varias unidades para tratar volúmenes de residuos más altos de lo habitual o pueden ser conducidas o transportadas a lugares más remotos donde se han producido brotes de la enfermedad, lo que ayuda a reducir el transporte de residuos infecciosos y exposiciones potenciales. La compañía Sanitech afirma que se pueden reciclar los residuos del proceso en productos de plástico de menor grado de calidad, aunque comúnmente se les envía a rellenos sanitarios municipales.

Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) emissions (18 months)



Long-term sampling with an uptime of > 95%, could measure under ideal condition emission levels of 0,2 pg TEQ PCDD/F /Nm³ (794 hours). However, during start-ups levels of dioxins were found to be much higher: 1,7 ng TEQ/Nm³. In the figure above levels of PCDD/Fs are shown during the different stages of start-up (red) of flushing (SU-2), heating-up (SU-3) and start waste feed (SU-4). High PCDD/F levels are observed, when without waste combustion cleaning operation are performed and no air pollution control devices are obliged.

Figura 42. Emisiones ocultas de dioxinas de un incinerador de última generación, Países Bajos. Fuente: Arkenbout y Petrlik 2019

7. LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Se reconoce ampliamente que el uso de la incineración para generar energía (convertir residuos en energía) a partir de residuos plásticos, es contraproducente para un concepto de economía circular y para mitigar el cambio climático, a la vez que genera contaminantes tóxicos. La UE ha desarrollado una capacidad de incineración excesiva, ya que se prohibió el uso de rellenos sanitarios para la eliminación de residuos o bien se sometió este tipo de eliminación de residuos a altas cuotas con el fin de disuadir el uso de los rellenos sanitarios para residuos que se podrían reciclar, así como para proteger el suministro de agua subterránea.

Sin embargo, en años recientes, se ha reconocido que la incineración de residuos municipales, una gran parte de los cuales son plásticos, estaba consumiendo recursos de forma incompatible con la economía circular, compitiendo con el reciclado y, en algunos casos, llevando a que se tuvieran que importar residuos para alimentar a los incineradores. En 2016, se estimó que se incineraron 11.3 millones de toneladas de plástico en la UE, un aumento de un 61% en una década (Delva *et al.*, 2019).

Estas preocupaciones han dado lugar a propuestas de la UE de imponer impuestos sobre la incineración de residuos, y específicamente sobre la incineración de plásticos. A partir de junio de 2018, el comisario del presupuesto de la UE, Günther Oettinger, anunció planes para introducir un nuevo impuesto a escala de la UE de 0.80 euros por cada kilogramo de residuos plásticos incinerados (800 € por tonelada métrica). Dinamarca ya impuso un impuesto de 45 dólares estadounidenses por tonelada (1016 kg) a la incineración de residuos mixtos.

En un reconocimiento más del potencial de calentamiento global de las emisiones de los incineradores, la UE excluyó la conversión de residuos en energía y la incineración de residuos de la taxonomía de finanzas sostenibles recientemente desarrollada.⁶³ La Comisión Europea acordó que la taxonomía, un instrumento regulador de la inversión directa para la mitigación del cambio climático, debe excluir la incineración de su lista de actividades, y el artículo 9 establece que reducir la incineración a un mínimo y evitar la eliminación de residuos contribuirá a la economía circular.

Aparte de los altos volúmenes de emisiones dañinas para el clima, la incineración de residuos plásticos también produce compuestos tóxicos como emisiones y residuos. Las emisiones de sustancias químicas altamente tóxicas, como los contaminantes orgánicos persistentes, en particular las dioxinas, ha deteriorado la industria durante décadas y existen pruebas tanto de los daños que las emisiones han causado a la salud humana como de los impactos que tienen sobre la cadena alimentaria (Xu *et al.*, 2019; Tait *et al.*, 2019).

Con un costo enorme, los incineradores modernos han reducido significativamente las emisiones de dioxinas a la atmósfera al transferirlas, a través de dispositivos de filtración y depuración, a los residuos sólidos producidos por la incineración: las cenizas residuales volantes y depositadas. Sin embargo, existen evidencias de que esto ha llevado a contaminar la cadena alimentaria, ya que la ceniza vuelve a entrar en el medio ambiente (IPEN, Arnika, NTN, 2017). Además, se está indagando cuál es el nivel real de emisiones de dioxinas de los incineradores, ya que la tecnología

63 <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14970-2019-ADD-1/en/pdf>

y los requisitos de control regular actualmente están bajo escrutinio. El equipo estándar toma una o dos muestras ‘instantáneas’ al año mientras que las nuevas unidades de muestreo pueden generar datos prácticamente continuos. El uso de equipos de muestreo semi-continuo ha revelado ‘emisiones ocultas de dioxinas’ que no se detectan bajo los métodos estándar utilizados durante décadas y que comúnmente siguen en uso (Arkenbout y Petrlík, 2019).

El muestreo semi-continuo a largo plazo realizado a través del sistema AMESA demostró que incluso un incinerador de última generación en los Países Bajos emitía niveles de dioxina mucho más altos de los que mostraba el antiguo método de control estándar. Utilizando el sistema AMESA, se registraron emisiones muy elevadas de dioxinas durante la puesta en marcha después de haber efectuado el mantenimiento de la limpieza interna del incinerador (ver la figura 42).

Los aditivos en el plástico también pueden provocar emisiones descontroladas y no reguladas. El uso de nanocargas en los plásticos, por ejemplo, puede llevar a que las chimeneas de los incineradores emitan sustancias químicas preocupantes para la salud humana y el medio ambiente. Las emisiones de nanopartículas por parte de los incineradores no están reguladas. Según la Comisión Europea: *“los termoplásticos con nanocargas generarán niveles significativos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de alto peso, que se consideran más tóxicos que los HAP de bajo peso. Se supone que estas sustancias se forman en la materia nanoparticulada liberada durante la descomposición térmica”* (Comisión Europea, 2018).

Además de las emisiones tóxicas, las liberaciones y el alto PCG, la incineración compite con la tecnología para el reciclado de materiales como los plásticos. En el pasado, la industria de los incineradores afirmaba que debían ser una ‘parte de la mezcla’ para la economía circular, y que sus residuos blanco eran residuos post-reciclado que sólo se pueden manejar a través de los rellenos sanitarios. Sin embargo, la aparición del reciclado químico que puede gestionar los residuos plásticos residuales contaminados puede proporcionar mejores resultados en la recuperación de recursos que la incineración, lo que de alguna manera socava el argumento de que la incineración es la única opción para dichos residuos.

La incineración sigue siendo una de las ‘falsas soluciones’ más contaminantes al problema de la contaminación plástica y, a largo plazo, no parece tener ningún papel que desempeñar en la gestión ambientalmente racional de los residuos plásticos en una economía circular.

8. LOS RELLENOS SANITARIOS

Los rellenos sanitarios, al igual que la incineración para la eliminación de residuos, languidecen en la parte inferior de la jerarquía de los residuos debido a sus impactos ambientales, en particular sobre las aguas subterráneas. La razón principal que explica los impactos de los rellenos sanitarios que contienen residuos sólidos municipales es tanto la fracción orgánica de la putrefacción de los residuos como la generación de gases, así como el ambiente reductivo dentro del relleno sanitario. El principal gas que se emite es el metano procedente de la descomposición de la materia orgánica, un potente contaminante que contribuye al cambio climático. También hay docenas de emisiones de gases tóxicos secundarios relacionadas con la descomposición de los residuos de sustancias químicas y productos químicos dentro del relleno sanitario. Los lixiviados (líquidos) en el ambiente anaeróbico reductivo de un relleno sanitario tienden a ser ácidos y aceleran la lixiviación de metales tóxicos de los materiales de desecho. Cuando se llega a filtrar el revestimiento de un relleno sanitario, los lixiviados contaminados entran y contaminan las aguas subterráneas que se encuentran debajo del relleno sanitario.

Por lo general, los rellenos sanitarios solo se tapan por completo una vez que se ha agotado su capacidad espacial. En ese momento, se puede recurrir a sistemas de extracción de metano para extraer metano y convertirlo en energía o simplemente quemarlo. Algunos rellenos sanitarios pueden instalar extractores de metano en una etapa anterior, de manera escalonada, para tratar de capturar el metano durante una etapa más temprana del ciclo de vida de un relleno sanitario. El ciclo de vida esperado de la generación de metano de un relleno sanitario es de hasta 50 años a partir de su desactivación. Desde una perspectiva ambiental, no existen muchas razones para recomendar el uso de rellenos sanitarios para los residuos sólidos municipales (RSM).

Sin embargo, cuando se compara el mono relleno sanitario de plástico bajo condiciones controladas, no se aplican muchos de los problemas de los rellenos sanitarios de RSM. Si dentro de un relleno sanitario seco específicamente diseñado para alojar plásticos, sólo se entierra plástico en ausencia de materia orgánica, entonces los problemas de generación de metano y lixiviados se reducen en gran medida. Aunque el plástico puede generar metano y etileno (Royer *et al.*, 2018), esto se da principalmente cuando está sujeto a la radiación solar ambiental. Cuando se entierra, las emisiones de estos gases se reducen considerablemente.

La lluvia también puede penetrar un relleno sanitario de este tipo, a menos que se le tape y se le proteja de manera tal que evite que las precipitaciones entren en el relleno sanitario y que se dé la lixiviación de sustancias químicas tóxicas de los plásticos.

¿POR QUÉ SE ENVIARÍAN RESIDUOS PLÁSTICOS A UN RELLENO SANITARIO?

Bajo circunstancias normales y en rellenos sanitarios de residuos mixtos, se tomarían todas las medidas necesarias para evitar la lixiviación de sustancias químicas tóxicas de los plásticos. Sin embargo, bajo determinadas condiciones, puede resultar más ambientalmente racional ‘almacenar’ residuos plásticos en pacas comprimidas bajo tierra (preferentemente clasificadas por tipos de polímeros), como medida transitoria. Lo mismo se puede argumentar con respecto a almacenar plástico en la superficie del suelo, aunque puede que esta opción quede excluida por la posibilidad de potenciales incendios y la pérdida de valiosas superficies de tierra. Mientras vayan madurando las técnicas para el reciclado seguro de los plásticos y se vayan volviendo económicamente viables, puede que resulte necesario recurrir a rellenos sanitarios para almacenar plásticos en seco, separados de cualquier desecho orgánico u otras formas de desecho. Los ‘bancos’ de residuos plásticos y su valor intrínseco podría ayudar a las comunidades remotas, los países de bajos ingresos y los estados insulares aislados a gestionar los residuos plásticos sin incinerarlos, filtrarlos de manera descontrolada al medio ambiente o sufrir exposición a los impactos de la incineración.

Bajo algunas circunstancias, puede que sea necesario almacenar los residuos plásticos en rellenos sanitarios para permitir que las tecnologías y la reglamentación ‘se pongan al día’ con el problema de los residuos y se establezcan técnicas de procesamiento descentralizadas y ambientalmente racionales. En ese momento, se podrán desenterrar los residuos plásticos y procesarlos según una gestión ambientalmente racional (GAR), o bien se les podrá exportar a países ricos que tengan la capacidad para procesarlos.

De ninguna manera se puede considerar que esta sea una ‘solución’ al problema de la contaminación con plásticos, sino que es más bien una estrategia que surge de la necesidad. La única solución a largo plazo es reducir la producción de plástico a un mínimo.

REFERENCIAS

- Adschiri, T., Lee, Y.-W., Goto, M., Takami, S., (2011) *Green Chem.*, *13*, 1380.
- Alaerts, L., Augustinus, M., Van Acker, K. (2018) Impact of Bio-Based Plastics on Current Recycling of Plastics. *Sustainability*, *10*, 1487; doi:10.3390/su10051487
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R. *et al.* (2019) Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nat. Geosci.* *12*, 339–344 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- American Chemical Society. (2008, June 7). Lead Leaching and Faucet Corrosion In PVC Home Plumbing. *ScienceDaily*. Retrieved May 25, 2020 from www.sciencedaily.com/releases/2008/06/080602091241.htm
- Arkenbout A, and Petrik, J. (2019) Hidden Emissions of UPOPs: Case Study of a Waste Incinerator in The Netherlands. *Proceed. Dioxin 2019 Krakow Poland*.
- Andrady, A.L. (2011) Microplastics in the marine environment, *Mar. Pollut. Bull.* *62*(2011) 1596–1605.
- Bakir, A., Rowland, S., Thompson, R., (2014) Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions, *Estuarine Coast. ShelfSci.* *140* (2014) 14–21.
- Bi, X., Simoneit, B., Wang, Z., Wang, X., Sheng, G., Fu, J. (2010) The major components of particles emitted during recycling of waste printed circuit boards in a typical e-waste workshop of South China, *Atmos. Environ.* *44* (2010) 4440–4445.
- Bignardi C, Cavazza A, Lagana C, *et al.* (2017). Release of non-intentionally added substances (NIAS) from food contact polycarbonate: Effect of ageing. *Food Control.* *71*:329-35.
- BLASTIC (2019) *Plastic waste pathways into the Baltic Sea*. <https://www.blastic.eu/>
- Bouhroum, R., Boulkamh, A., Asia, L., Lebarillier, S., Ter Halle, A., Syakti, A., Doumenq, P., Malleret, I. and Wong-Wah-Chung, P., (2019) Concentrations and fingerprints of PAHs and PCBs adsorbed onto marine plastic debris from the Indonesian Cilacap coast and the North Atlantic gyre, *Regional Studies in Marine Science*, *Volume 29*, 2019, 100611, ISSN 2352-4855, <https://doi.org/10.1016/j.risma.2019.100611>.
- Bradley EL, and Coulier L. (2007). An investigation into the reaction and breakdown products from starting contact plastics used to produce food contact plastics. *CSL York*.
- Burat, F., Güney, A., and Kangal, A. (2009) Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method, *Waste Management*, *Volume 29*, *Issue 6*, 2009, Pages 1807-1813, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.018>.
- Cantwell, M. G. *et al.* Source determination of benzotriazoles in sediment cores from two urban estuaries on the Atlantic Coast of the United States. *Mar. Pollut. Bull.* *101*, 208–218 (2015).
- Centre for European Policy Studies (2017) *The Circular Economy A review of definitions, processes and impacts*. Research Report No 2017/08, April 2017
- Chen, D., Yin, L., Wang, H. and He, P. (2014) Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste Manag.* *34*, 2466–2486
- Centre for International Environmental Law (2019) *Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet*. <https://www.ciel.org/plasticandclimate/>
- Conesa, J., Font, R., Fullana, A., Martín-Gullón, I., Aracil, I., Galvez, A., Molto, J., Gomez-Rico, M. (2008) Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, doi:10.1016/j.jaap.2008.11.022
- Creech Jr, J., and Johnson, M. (March 1974). “Angiosarcoma of liver in the manufacture of polyvinyl chloride”. *Journal of Occupational Medicine.* *16* (3): 150–1. PMID 4856325.

- Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., Leyskens, J., Linder, M., Muncke, J., ... Wagner, M. (2019). A circular economy for plastics: Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions. *European Commission EC*. <https://doi.org/10.2777/269031>
- Cruz, S and Zanin, M. (2006) PET recycling: Evaluation of the solid-state polymerization process March 2006 *Journal of Applied Polymer Science* 99(5):2117 - 2123
DOI: 10.1002/app.22526
- ECHA. Estimating the number and types of applications for 11 substances added to the Authorisation List in February 2020. (2020) doi:10.2823/11134.
- Endo, S., Takizawa, R., Okuda, K., Takada, H., Chiba, K., Kanehiro, H., Ogi, H., Yamashita, R., and Date, T. (2005) Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences. *Mar. Pollut. Bull.* 50, 1103–1114.
- European commission (2018) *Incinerating nano-enabled thermoplastics linked to increased PAH emissions and toxicity*. Science for Environment Policy.
- Espinosa, M., Blanco, A., Schmidgall, T., Atanasoff-Kardjalieff, A., Kappelmeyer, U., Tischler, D., Pieper, D., Heipieper, H. and Eberlein, C. (2020) Toward Biorecycling: Isolation of a Soil Bacterium That Grows on a Polyurethane Oligomer and Monomer. *Front. Microbiol.*, 27 March 2020 | <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00404>
- Fasano, E., Bono-Blay, F., Cirillo, T., Montuori, P., Lacorte, S. (2012) Migration of phthalates alkylphenols, bisphenol A and di(2-ethylhexyl)adipate from food packaging, *Food Control* 27 (2012) 132–138.
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Plastics. Production, use and fate of all plastics ever made. *Science Advances* (3), 1–5.
- Ghanta, M., Fahey, D. & Subramaniam, B. Environmental impacts of ethylene production from diverse feedstocks and energy sources. *Appl Petrochem Res* 4, 167–179 (2014). <https://doi.org/10.1007/s13203-013-0029-7>
- Gleis, M., (2012). Gasification and pyrolysis - reliable options for waste treatment? In: Thomé-Kozmiensky, Thiel, S. (Eds.), *Waste Management 3*. Vivis, TK Verlag, pp. 403–410.
- Goodson, A., Robin, H., Summerfield W., Cooper, I. (2004) Migration of bisphenol A from can coatings-effects of damage, storage conditions and heating, *FoodAddit. Contam.* 21 (10) (2004) 1015–1026.
- Goto, M. (2016). "Subcritical and Supercritical Fluid Technology for Recycling Waste Plastics." *Journal of the Japan Petroleum Institute* 59(6): 254–258.
- Haberl, et. al., (2012) "Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy," *Energy Policy*, 45 (2012) 18–23, pp.19–20. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512001681>
- Hahladakis, J., Velis, C., Weber, R., Iacovidou, E., and Purnell, P. (2018) An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials* 344 (2018) 179–199.
- Halden, R. (2010). Plastics and Health Risks. *Annual Review of Public Health*. 31: 179–94. doi:10.1146/annurev.publhealth.012809.103714
- He, Z., Li, G., Chen, J., Huang, Y., An, T. and Zhang, C. (2015) Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops, *Environ. Int.* 77 (2015) 85–94.
- Huang, D., Zhou, S., Hong, W., Feng, W. and Tao, L. (2013) Pollution characteristics of volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters emitted from plastic wastes recycling granulation plants in Xingtian Town South China, *Atmos. Environ.* 71 (2013) 327–334.
- Ignatyev, I.A., Thielemans, W., Vander Beke, B., (2014) Recycling of Polymers: A Review. *Chemoschem* 7, 1579–1593.
- IPEN ARNIKA (2017a) *Toxic Toy or Toxic Waste: Recycling POPs into New Products. A Summary for decision makers*. International Pollutants Elimination Network and Arnika Association. Gothenburg and Prague. 2017. https://ipen.org/sites/default/files/documents/toxic_toy_report_2017_update_v1_5-en.pdf

IPEN, ARNIKA, NTN (2017b) *Toxic Ash Poisons the Food Chain*. International Pollutants Elimination Network, Arnika Association and National Toxics Network (Australia). Gothenburg, Prague and Perth. 2017. <https://ipen.org/documents/toxic-ash-poisons-our-food-chain>

IPEN, ARNIKA (2018) *Toxic Soup: Dioxin in Plastic Toys*. International Pollutants Elimination Network and Arnika Association. Gothenburg and Prague. 2018. <https://ipen.org/documents/toxic-soup-dioxins-plastic-toys>

International Pellet Watch (2020) Global survey of benzotriazole-type UV stabilizers in microplastics (pellets and fragments) unpublished data.

Katami, T., Yasuhara, A., Okuda, T., Shibamoto, T., *et al.* (2002). "Formation of PCDDs, PCDFs, and Coplanar PCBs from Polyvinyl Chloride during Combustion in an Incinerator". *Environ. Sci. Technol.* **36**(6): 1320–1324.

Kasier, K., Schmid, M. & Schlummer, M. (2018). Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review. *Recycling*, *3*, 1, doi:10.3390/recycling3010001.

Kubwabo, C., Kosarac, I., Stewart, B., Gauthier, B., Lalonde, K. and Lalonde, P. (2009) Migration of bisphenol A from plastic baby bottles, baby bottle liners and reusable polycarbonate drinking bottles, Food Addi. Contamin.: Part A 26(2009) 928–937.

Labunska, I., Harrad, S., Santillo, D., Johnston, P. and Brigden, K. (2013) Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in soil sediment and dust samples collected from various electronic waste recycling sites within Guiyu town, southern China, *Environ. Sci.: Processes Impacts* *15* (2013) 503–

Lettieri, P. and Baeyens, J. (2009) "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste Manag., vol. 29, no. 10, pp.* 2625–2643, 2009.

Liu, K., *et al.* (2016). "Advanced degradation of brominated epoxy resin and simultaneous transformation of glass fiber from waste printed circuit boards by improved supercritical water oxidation processes." *Waste Manag* *56*: 423–430.

Lloyd-Smith, M and Immig, J. (2018) Ocean Pollutants Guide: Toxic Threats to Human Health and Marine Life. Prepared for the *International Pollutants Elimination Network (IPEN) and the National Toxics Network (Australia)*. October 2018. https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-ocean-pollutants-v2_1-en-web.pdf

Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C. and Kaminuma, T. (2001) Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ. Sci. Technol.* *35*, 318–324.

McClarty, D., Brouwer, J., and Ainscough, C. (2015) Economic analysis of fuel cell installations at commercial buildings including regional pricing and complementary technologies. *Energy and Buildings* *113* (2016) 112–122.

Mersowski I. and J. Ejlertsson (1999). "Long-term Behaviour of PVC Products Under Landfill Conditions." Technical University of Hamburg-Harburg, Germany; Linköping University, Sweden, July.

Mukherjee, A., Debnath, B., and Sadhan Kumar Ghosh, A Review on Technologies of Removal of Dioxins and Furans from Incinerator Flue Gas, *Procedia Environmental Sciences, Volume 35*, 2016, Pages 528–540, ISSN 1878–0296, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.037>.

M.R.G. PlasticsEurope (MRG) (2008), *Business Data and Charts 2007*. Status September 2008. Plastics Europe Association of Plastics Manufacturers.

Nagase, Y., Yamagata, M., Matsuda, T., Naito, T., Kodama, K. and Fukuzato, R. (1998) *Proc. 5th Meeting on Supercritical Fluids*. P.127.

Nam, S., Seo, Y., Kim, M. (2010) Bisphenol A migration from polycarbonate baby bottle with repeated use, *Chemosphere* *79* (2010) 949–952.

Nelms, S.E., Barnett, J., Brownlow, A. *et al.* (2019) Microplastics in marine mammals stranded around the British coast: ubiquitous but transitory? *Sci Rep* *9*, 1075 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37428-3>

Nkwachukwu, O.I., Chima, C.H., Ikenna, A.O. *et al.* (2013) Focus on potential environmental issues on plastic world towards a sustainable plastic recycling in developing countries. *Int J Ind Chem* *4*, 34 (2013). <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-34>

- Ogata, Y., Takada, H., Mizukawa, K., Hirai, H., Iwasa, S., Endo, S., (2009) International pellet watch: global monitoring or persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1437-1446.
- Onwudili, J. A., Insura, N. and Williams, P. T. (2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 86, Issue 2*, 293-303.
- Pascoe, R.D. (2006) Investigation of hydrocyclones for the separation of shredded fridge plastics, *Waste Management, Volume 26, Issue 10*, 2006, Pages 1126-1132, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.017>.
- Petrlík, J., Behnisch, P. and DiGangi, J. (2018) Toxic Soup: Dioxins in Plastic Toys. Arnika Association, Prague and IPEN, Gothenburg.
- Pivnenko, K., Eriksen, M., Martín-Fernández, J., Eriksson, E., Astrup, T. (2016) Recycling of plastic waste: presence of phthalates in plastics from households and industry, *Waste Manage.* 54 (2016) 44-52.
- PlasticsEurope (2015) Plastics – The Facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data. https://www.plasticseurope.org/application/files/3715/1689/8308/2015plastics_the_facts_14122015.pdf
- PlasticsEurope (2018) Plastics - The Facts 2018: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data,” 2018. https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf
- PlasticsEurope (2019) Plastics - The Facts 2019: An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data,” 2019 https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf.
- Puype, F., Samsonek, J., Knoop, J., Egelkraut-Holtus, M., Ortlieb, M. (2015) Evidence of waste electrical and electronic equipment (WEEE) relevant substances in polymeric food-contact articles sold on the European market, *Food Addit.Contam. Part A Chem. Anal. Control Exposure Risk Assess.* 32 (2015)410-426.
- Ragaert, K., Delva, L. and Geem K. Van, (2017) “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste,” *Waste Manag.*, 2017.
- Ragaert, K. (2016) “Trends in mechanical recycling of thermoplastics,” in *Conference: Kunststoff Kolloquium* Leoben, 2016.
- Rollinson, A. and Oladejo J., (2019) ‘Patented blunderings’, efficiency awareness, and self-sustainability claims in the pyrolysis energy from waste sector. *Resources, Conservation & Recycling* 141 (2019) 233-242
- Royer S-J, Ferrón S, Wilson ST, Karl DM (2018) Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLOS ONE* 13(8): e0200574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574>
- Ryan (2015), A Brief History of Marine Litter Research, in M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages (Eds), *Marine Anthropogenic Litter*, Berlin Springer, 2015, Plastics Europe.
- Schlummer, M. and Mäurer, A. (2006) Recycling of styrene polymers from shredded screen housings containing brominated flame retardants. *Journal of Applied Polymer Science*, 15 October 2006, Vol.102(2), pp.1262-1273
- Searchinger, T (2010) “Biofuels and the need for additional carbon,” *Environmental Research Letters* 5 (2010) 024007. http://iopscience.iop.org/1748-9326/5/2/024007/pdf/1748-9326_5_2_024007.pdf
- Takada, H., Mato, Y., Endo, A., Yamashita, R., Zakaria, M.P. (2006) Call for pellets! International pellet watch global monitoring of POPs using beached plastic resin pellets. *Mar. Pollut. Bull.* 52, 1547-1548.
- Takada, H., Tanaka, K., Yamashita, R. & Watanuki, Y. ENVR 139: Transfer of additives from ingested plastics to seabirds and their accumulation in the tissue. in ACS Spring 2019 National Meeting & Exposition (2019).
- Tanaka, K., Yamashita, R. & Takada, H. Transfer of Hazardous Chemicals from Ingested Plastics to Higher-Trophic-Level Organisms. in (eds. Takada, H. & Karapanagioti, H. K.) 267-280 (Springer International Publishing, 2019). doi:10.1007/698_2018_255.

- Tanaka, K. et al. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Mar. Pollut. Bull.* 69, 219–222 (2013).
- Tanaka, K., van Franeker, J. A., Deguchi, T. & Takada, H. Piece-by-piece analysis of additives and manufacturing byproducts in plastics ingested by seabirds: Implication for risk of exposure to seabirds. *Mar. Pollut. Bull.* 145, 36–41 (2019).
- Tanaka, K. et al. In Vivo Accumulation of Plastic-Derived Chemicals into Seabird Tissues. *Curr. Biol.* 30, (2020).
- Tait, P., Brew, J., Che, A., Constanzo, A., Danyluk, A., Davis, M., Khalaf, A., McMahon, K., Watson, A., Rowcliff, K. and Bowles, D. (2019) The health impacts of waste incineration: a systematic review. *Aust NZ J Public Health.* 2019; Online; doi: 10.1111/1753-6405.12939
- Tang, Z., Huang, Q., Cheng, J., Yang, Y., Yang, J., Guo, W., Nie, Z., Zeng, N. and Jin, L. (2014) Polybrominated diphenyl ethers in soils, sediments, and human hair in a plastic waste recycling area: a neglected heavily polluted area, *Environ. Sci. Technol.* 48 (2014) 1508–1516.
- Teuten, E.L., Saquing, J.M., Knappe, D.R.U., Barlaz, M.A., Jonsson, S., Bjorn, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C., Galloway, T.S., Yamashita, R., Ochi, D., Watanuki, Y., Moore, C., Viet, P.H., Tana, T.S., Prudente, M., Boonyatumanond, R., Zakaria, M.P., Akkhang, K., Ogata, Y., Hirai, H., Iwasa, S., Mizukawa, K., Hagi, Y., Imamura, A., Saha, M. and Takada, H., (2009) Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 364, 2027– 2045.
- Tollefson, J (2013) Methane leaks erode green credentials of natural gas. *Nature* 493, 12 (03 January 2013)
- Tournier, V., Topham, C.M., Gilles, A. et al. (2020) An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature* 580, 216–219 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- Uekert, T., Kuehnelt, M., Wakerley, D. and Reiser, E. (2018) Plastic waste as a feedstock for solar-driven H₂ generation *Energy Environ. Sci.*, 2018,11, 2853-2857.
- UNEP (2003) *Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of Biomedical and Healthcare Wastes (Y1; Y3)*. United Nations Environment Programme
- UNEP (2012) *Compendium of Technologies for Treatment/Destruction of Healthcare Waste*. United Nations Environment Programme. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8628>
- UNEP, (2016) *Marine Plastic Debris and Microplastics. Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change*, (2016) United Nations Environment Programme
- UNEP/POPS/POPRC.16/4 (2020) Proposal to list UV-328 in Annex A to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants
- Van, A., Rochman, C., Flores, E., Hill, K., Vargas, E., Vargas, S. and Hoh, E. (2012) Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California, *Chemosphere, Volume 86, Issue 3*, 2012, Pages 258-263, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.039>.
- Watson, A., Brigden, K., Shinn, M. and Cobbing, M. (2010) Toxic Transformers; - a review of the hazards of brominated & chlorinated substances in electrical and electronic equipment. Greenpeace Research Laboratories Technical Note 01/2010.
- Weber, R., Kuch, B. (2003) Relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans, *Environ. Int.* 29 (2003) 699–710.
- Weatherby, G., Baldwin, A., and Ranville, J. (2019) It's raining plastic. *US Geological Survey. Open-File Report 2019-1048* <https://pubs.usgs.gov/of/2019/1048/ofr20191048.pdf>
- Whitehead, T. P., Brown, F. R., Metayer, C., Park, J. S., Does, M., Petreas, M. X., Buffler, P. A., & Rappaport, S. M. (2013). Polybrominated diphenyl ethers in residential dust: sources of variability. *Environment international*, 57-58, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.03.003>
- Wowkonowicz P and Kijeńska M (2017) Phthalate release in leachate from municipal landfills of central Poland. *PLOS ONE* 12(3): e0174986. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174986>

Xu, P., Wu, L., Chen, Y., Xu, D., Wang, X., Shen, H., Han, J., Fu, Q., Chen, Z., and Lou, X. (2019) High intake of persistent organic pollutants generated by a municipal waste incinerator by breastfed infants. *Environmental Pollution* 250 (2019) 662e668

Zhang, K., Huang, J., Wang, H., Yu, G., Wang, B., Deng, S. and Liu, K. (2014a) Mechanochemical degradation of hexabromocyclododecane and approaches for the remediation of its contaminated soil. *Chemosphere*. 2014 Dec;116 40-45. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.02.006. PMID: 24613442.

Zhang, K., Huang, J., Wang, H., Yu, G., Wang, B., Deng, S., Kanoband, J., and Zhang, Q. (2014b) Mechanochemical destruction of decabromodiphenylether into visible light photocatalyst BiOBr. *RSC Advances* 4(28):14719-1472 DOI: 10.1039/c3ra47738j

Zion Market Research (2019) "Plastic Additives Market by Type (Plasticizers, Stabilizers, Flame Retardants, Impact Modifiers, and Others) and by Application (Packaging, Automotive, Consumer Goods, Construction, and Others): Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis, and Forecast, 2018-2025"

RECONOCIMIENTOS

A IPEN le gustaría agradecer el financiamiento del Gobierno de Suecia, de la Sociedad Sueca para la Conservación de la Naturaleza, del Fondo de Soluciones Plásticas (Plastic Solutions Fund) y de otros donantes, que hizo posible la producción de este documento. Los puntos de vista aquí vertidos no necesariamente reflejan la opinión oficial de los donantes.



<http://pelletwatch.org/>



por un futuro sin tóxicos

www.ipen.org

ipen@ipen.org

@ToxicsFree