

Revisión de los métodos químicos aplicados a residuos de EPS

Yeimy Gisela Palencia Ruiz y Dany Marcela Villabona Rangel

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingenieras Químicas

Director

Giovanni Morales Medina

Doctorado en ingeniería química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios, quien hace que nuestros proyectos, metas, sueños y anhelos se cumplan.

A mi familia, en especial a mis padres, Luz Esperanza y Ramiro por su apoyo, consejos y comprensión.

A mi hermana Karen Julieth, por su compañía, comprensión y apoyo.

A mi compañera de proyecto Dany Villabona, por su dedicación y esmero que hicieron que este proyecto terminara con éxito.

Yeimy Gisela Palencia Ruiz

Dedicatoria

A Dios por disponer de los tiempos, las personas y los lugares.

Dany Marcela Villabona Rangel

Agradecimientos

Al profesor Giovanni Morales Medina, por guiarnos, acompañarnos y animarnos durante todo el transcurso de la investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	17
1.1. Objetivo general	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. Descripción metodológica	18
3. Resultados	19
3.1. Análisis bibliométrico	19
3.2. Definición de temas o líneas de desarrollo	23
3.3. Línea de desarrollo 1: tratamiento con catalizadores	24
3.3.1. Degradación catalítica	24
3.3.2. Reacciones de Friedel Crafts	26
3.3.3. Reacciones de sulfonación	30
3.3.4. Reacción de acetilación	31
3.4. Línea de desarrollo 2: pirólisis	32
3.4.1. Pirólisis en atmósfera de nitrógeno	32
3.4.2. Pirólisis en atmósfera de argón	32
3.4.3. Pirólisis en atmósfera de aire	33
3.4.4. Pirólisis asistida por microondas	34
3.4.5. Pirólisis catalítica	35

3.5. Línea de desarrollo 3: reacciones químicas sin catalizadores.....	37
3.5.1. Reacciones de sulfonación.....	37
3.5.2. Reacción de acetilación.....	41
3.5.3. Reacciones de nitración	41
3.5.4. Reacción de isomerización	42
3.5.5. Reacción de polimerización.....	43
3.6. Comparación de las líneas de desarrollo identificadas	43
3.7. Comentarios finales	49
4. Conclusiones.....	50
5. Recomendaciones	52
Referencias bibliográficas.....	53
Apéndices.....	66

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Consolidado documentos obtenidos de las bases de datos	20
Tabla 2. Catalizadores empleados en degradación catalítica.....	26
Tabla 3. Catalizadores empleados en la categoría pirólisis	36
Tabla 4. Comparación entre categorías de tratamiento químico	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Cantidad de documentos publicados por año	21
Figura 2. Distribución por años de los 42 documentos seleccionados para el análisis.....	23
Figura 3. Categorías de las líneas de desarrollo identificadas	24

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Etapas metodológicas y selección de documentos	66
Apéndice B. Ilustraciones de las reacciones químicas analizadas	82
Apéndice C. Artículos más citados en Scopus y Web of Science	85
Apéndice D. Gráficas relacionadas con la bibliometría de los documentos seleccionados.....	92
Apéndice E. Bibliometría.....	94
Apéndice F. Condiciones para el pretratamiento de EPS.....	103
Apéndice G. Condiciones de operación para la degradación catalítica.....	104
Apéndice H. Condiciones de trabajo para la pirólisis	106
Apéndice I. Condiciones y composición de los productos de pirólisis	108
Apéndice J. Escala de las líneas de tratamiento	110
Apéndice K. Información de seguridad.....	112
Apéndice L. Análisis	116

Abreviaturas

2,4-DCP: 2,4 diclorofenol

a-HBCD: a- hexabromociclododecano

AIBN: azobisisobutironitrilo

B₁₅C₅: benzo-15-corona-5

BTA: ácido benceno-1,2,4-tricarboxílico

CC: cloruro cianúrico

c-HBCD: c-hexabromociclododecano

DB₁₈C₆: dibenzo-18-corona-6

DBP: ftalato de dibutilo

DCE: 1,2- dicloroetano

DCE-FDA: dicloroetano - formaldehído dimetil acetal

DCM-CC: diclorometano – cloruro cianúrico

DMSO: dimetilsulfóxido

d-SPE: método de extracción dispersiva en fase sólida

EPS: poliestireno expandido

FDA: formaldehído dimetil acetal

HAc-FDA: ácido acético glacial - dimetilacetal

HBCD: hexabromociclododecanos

HIPS: poliestireno de alto impacto

iBPBCD: isobutoxipentabromociclododecanos

IC: índigo carmín

LC-MS: cromatografía de líquidos con espectrómetro de masas

MAC: carbón activado magnético

MAP: pirólisis asistida por microondas

MB: azul de metileno

OPS: poliestireno biorientado

PCM: material de cambio de fase (phase change material)

PET: tereftalato de polietileno

PS: poliestireno

PSNH₂: poliamino estireno

PSS: poliestireno parcialmente sulfonado

PSSA: ácido poliestireno sulfónico

PSS-CdS: poliestireno parcialmente sulfonado – sulfuro de cadmio

PVP: polivinilpirrolidona

SDS: dodecilsulfato de sodio

SFC: cromatografía de fluidos supercríticos

SHCP: resina de poliestireno hiper reticulado sulfonado

SWPS: poliestireno de desecho sulfonado

TC: clorhidrato de tetraciclina

THF: tetrahidrofurano

WCO: aceite ácido simulado que contiene ácido oleico y aceite de girasol

WEPS: residuos de poliestireno expandido

YPS: recipientes de poliestireno de leche Yakult

γ -CD: γ -ciclodextrina

Resumen

Título: REVISIÓN DE LOS MÉTODOS QUÍMICOS APLICADOS A RESIDUOS DE EPS*

Autores: Yeimy Gisela Palencia Ruiz, Dany Marcela Villabona Rangel**

Palabras Clave: Poliestireno expandido, Pirólisis, Degradación catalítica, Sulfonación, Friedel Crafts, Nitración, Acetilación, Polimerización - Isomerización

Descripción: Esta revisión bibliográfica tuvo como propósito evaluar el impacto de los métodos químicos empleados para el aprovechamiento de residuos de poliestireno expandido (EPS), a nivel mundial desde 2010 hasta el presente. Para ello se realizó la búsqueda de información por medio de palabras claves definidas con anterioridad, cuyo propósito era buscar la mayor cantidad de documentos para luego hacer una selección con filtros establecidos. Se inició con un total de 413 documentos, cuya cifra se redujo a 193 una vez fueron excluidas las repeticiones por título de documento. Adicionalmente, tal cifra disminuyó a 42, correspondiente a aquellos archivos que presentaron en su *abstract* específicamente el uso de un método químico. Luego, se procedió a la identificación de las líneas de desarrollo aplicadas a residuos de EPS, las cuales fueron tres: tratamiento con catalizadores (degradación catalítica, reacciones de Friedel Crafts, reacciones de sulfonación y reacción de acetilación); pirólisis (en atmósfera de nitrógeno, de argón, de aire, asistida por microondas y por catalizadores); reacciones químicas sin el uso de catalizadores (sulfonación, acetilación, nitración, isomerización, polimerización). Finalmente, se procedió a la descripción de los procedimientos realizados, su validación experimental, la información de seguridad de los principales materiales utilizados, las aplicaciones de los productos obtenidos y el enfoque de aplicación a nivel laboratorio o escalable a industrial.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Doctorado en Ingeniería Química.

Abstract

Title: REVIEW OF CHEMICAL METHODS APPLIED TO EPS WASTE*

Authors: Yeimy Gisela Palencia Ruiz, Dany Marcela Villabona Rangel**

Key Words: Expanded polystyrene, Pyrolysis, Catalytic degradation, Sulphonation, Friedel Crafts, Nitration, Acetylation, Polimerization - Isomerization

Description: The purpose of this literature review was to evaluate the impact of the chemical methods used for the utilization of expanded polystyrene (EPS) waste, worldwide from 2010 to the present. To this end, a search for information was carried out by means of previously defined keywords, the purpose of which was to search for the largest number of documents and then make a selection with established filters. We started with a total of 413 documents, whose number was reduced to 193 once the repetitions by document title were excluded. Additionally, this number was reduced to 42, corresponding to those files that specifically presented in their abstract the use of a chemical method. Then, we proceeded to identify the lines of development applied to EPS waste, which were three: treatment with catalysts (catalytic degradation, Friedel Crafts reactions, sulfonation reactions and acetylation reaction); pyrolysis (in nitrogen atmosphere, argon, air, assisted by microwaves and by catalysts); chemical reactions without the use of catalysts (sulfonation, acetylation, nitration, isomerization, polymerization). Finally, we proceeded to the description of the procedures carried out, their experimental validation, the safety information of the main materials used, the applications of the products obtained and the application approach at laboratory level or scalable to industrial level.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Giovanni Morales Medina. PhD in chemical engineering.

Introducción

En el mundo existen siete islas formadas por residuos plásticos, metales ligeros y desechos orgánicos en descomposición; estas islas son el resultado de 8 millones de toneladas de desechos que invaden los mares y los océanos. La mayor de ellas es denominada “*Great Pacific*” y cuenta con un área de 10 millones de km²; *Great Pacific* está situada entre California y el Archipiélago Hawaiano (*GQ España*, 2019). A pesar de esta contaminación, los plásticos corresponden a un renglón importante de la economía actual; como es el caso del sector europeo donde genera un volumen de negocio de 355.000 millones de Euros y empleos directos a más de 1,5 millones de personas (*Publicaciones: PlasticsEurope*, 2018). Ante este dilema de dependencia y contaminación, las técnicas de aprovechamiento y tratamiento de los residuos poliméricos aparecen como una opción en el sostenimiento de la industria de los plásticos a largo plazo.

El poliestireno expandido (EPS), hace parte de los materiales plásticos de difícil reciclaje (*National Geographic*, 2018) principalmente por su estructura (98% aire y 2% poliestireno), la cual hace que su recolección y almacenamiento sean actividades poco rentables (*Poliestireno Expandido | Textos Científicos*, 2005). Debido a lo anterior, en Colombia fue radicado un proyecto de ley para la prohibición del uso del EPS, (excepto en el sector de medicamentos), otorgando un período de 10 años para hacer la transición (*Revista Semana*, 2019). No obstante, municipios como Iza, Nobsa (Boyacá) y Guatapé (Antioquia) ya han aprobado tal disposición, por lo que ahora se busca su aplicación en todo el territorio nacional. Durante dicho tiempo de transición, la disposición de este material conllevará problemas de espacio en los basureros puesto que, en Colombia se generan 80.000 toneladas anuales de EPS y

solo el 1% de los residuos es reciclado (*Noticias RCN*, 2019). En este sentido ONU medio ambiente 2018 estableció una hoja de ruta para frenar los plásticos de un solo uso. Para ello propone enfocarse en los materiales más problemáticos, evaluar la disponibilidad de alternativas y apoyar proyectos ambientales. Asimismo, esta organización presentó las prohibiciones y/o los gravámenes que, para el caso del EPS, han sido aprobadas en Belice (2018) o han entrado en vigor en países como Filipinas (2011), Haití (2013), Guyana, Bandung y Sikkim (2016), Sri Lanka, San Vicente y las granadinas, Guatemala e Islas Marshall (2017) y Vanuatu (2018) (*Plásticos de Un Solo Uso: Una Hoja de Ruta Para La Sostenibilidad | UNEP - UN Environment Programme*, 2018). Adicionalmente, con la situación actual los residuos de EPS se han visto en aumento; *e.g.* en Singapur, durante el confinamiento de ocho semanas se desecharon 1.470 toneladas adicionales de envases de plástico para el transporte de comida (*Medio Ambiente - ELTIEMPO.COM*, 2020).

De acuerdo con la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales ASTM, el reciclaje incluye cuatro categorías: primario, referente al reprocesamiento mecánico de residuos limpios de una sola clase, para obtener productos con propiedades equivalentes; secundario, tratamiento mecánico del PET y polietilenos, para obtener productos con propiedades inferiores; terciario, destinado a la recuperación de componentes químicos valiosos como monómeros y aditivos; cuaternario, enfocado en la recuperación de energía. Considerando lo anterior, el reciclaje primario y secundario presentan limitaciones de aplicación (tipo de residuos). Los de tipo terciario y cuaternario conllevan a la valorización porque transforman los residuos en materia prima y energía. No obstante, el reciclaje cuaternario no reduce la demanda de material nuevo, genera emisiones tóxicas y cenizas volantes (plomo, cadmio). Entre tanto, el reciclaje terciario le apuesta a la sostenibilidad porque el flujo de material pasa de lineal a cíclico (Okan *et*

al., 2019). Por consiguiente, se desarrolló el presente documento bajo la categoría de reciclaje químico o terciario. Con base en lo anterior, el presente documento expone un estado del arte sobre los tratamientos químicos aplicados a los residuos de EPS a fin de responder al interrogante:

¿cuál es el impacto de dichos métodos a nivel mundial durante el período 2010-2021?

La metodología llevada a cabo consistió en seleccionar las herramientas bibliométricas (Scopus y Web of Science) y determinar las ecuaciones de búsqueda a utilizar. Luego, los documentos preseleccionados se filtraron y clasificaron en líneas de desarrollo. De esta manera se identificaron tres líneas de investigación: tratamiento con catalizadores, pirólisis y reacciones químicas sin catalizadores, recibiendo la segunda de éstas el mayor número de menciones (15 documentos). De ahí que la pirólisis corresponda a la línea de desarrollo que exhibe los mayores avances en el campo del tratamiento de residuos de EPS.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una revisión del estado del arte de los tratamientos químicos aplicados a residuos de poliestireno expandido (EPS) durante los años 2010-2021, disponibles en *Scopus* y *Web of Science*, considerando el enfoque de aplicación (laboratorio o escalable a industrial).

1.2 Objetivos Específicos

Desarrollar un análisis bibliométrico que identifique las instituciones, los autores, las áreas temáticas y el número de citas, relacionados con el desarrollo de métodos químicos para el tratamiento de residuos de EPS.

Establecer las líneas o temas de desarrollo en los métodos químicos aplicados a residuos de EPS, describiendo los procedimientos, su validación experimental y la información de seguridad de los principales materiales utilizados.

Definir los requerimientos de las líneas o temas de desarrollo, a través de una matriz comparativa con los procedimientos, las ventajas y las aplicaciones definidas por los autores

2. Descripción metodológica

La Figura 1 del Apéndice A resume las etapas propuestas para el cumplimiento de los objetivos específicos del presente trabajo de revisión. Las etapas de la metodología son detalladas a continuación.

Etapas 1. Búsqueda de información. La siguiente ecuación de búsqueda fue aplicada en las bases de datos Scopus y *Web of Science*:

“expanded polystyrene waste” or expanded polystyrene waste AND “chemical recycling” or chemical recycling or chemical or treatment or literature.

La búsqueda fue aplicada considerando las secciones *Article title, Abstract, Keywords* en el caso de Scopus, así como la opción *All fields* usando *Web of Science*, puesto que presentaban múltiples categorías similares.

Etapas 2. Análisis bibliométrico. Los diferentes índices bibliométricos fueron obtenidos, considerando los documentos resultantes de la ecuación de búsqueda. Para esto, la información concerniente a cada documento fue copiada en una hoja de Excel® y en el programa de uso libre VOSviewer (*VOSviewer - Descargar, 2021.*), a fin de analizar las instituciones, los autores y las áreas temáticas de mayor mención, así como el número de citas referidas.

Etapas 3. Clasificación. Los documentos resultantes de la ecuación de búsqueda fueron clasificados, según su título y/o *abstract*, identificando temas o líneas de tratamiento similares para los residuos de EPS.

Etapa 4. Análisis de los temas o líneas de tratamiento. Los documentos clasificados en cada tema o línea fueron leídos y analizados, definiendo la metodología experimental, los análisis de validación y los resultados obtenidos.

Etapa 5. Elaboración de una matriz de comparación de los temas o líneas de tratamiento. Los requisitos para cada método químico fueron definidos en una tabla de comparación, destacando la finalidad de los procedimientos, sus aplicaciones y el enfoque bajo el cual se desarrollaron (laboratorio o escalable a industrial).

Etapa 6. Análisis de la tabla de comparación. La información consignada en la tabla de comparación fue utilizada para identificar las aplicaciones más frecuentes, así como las inusuales, que por lo tanto indican posibles tendencias futuras.

3. Resultados

3.1. Análisis bibliométrico

De acuerdo con las ecuaciones de búsqueda indicadas en la metodología, 413 documentos fueron obtenidos; de estos, 243 y 170 documentos fueron reportados en Scopus y en *Web of Science*, respectivamente. Esta cifra se redujo a 193 con la exclusión de documentos repetidos. De estos 193, 37 fueron reportados en *Web of Science* y 89 en Scopus y 67 coincidieron en las dos bases de datos. Las clases de documentos conciernen a artículos de investigación (154), conferencias (20), capítulos de libros (5), revisiones de artículos (10), revistas (3) y resúmenes de reunión (1). La Tabla 1 resume lo expuesto y los detalles se presentan en el Apéndice A.

Tabla 1

Consolidado documentos obtenidos de la búsqueda en las bases de datos.

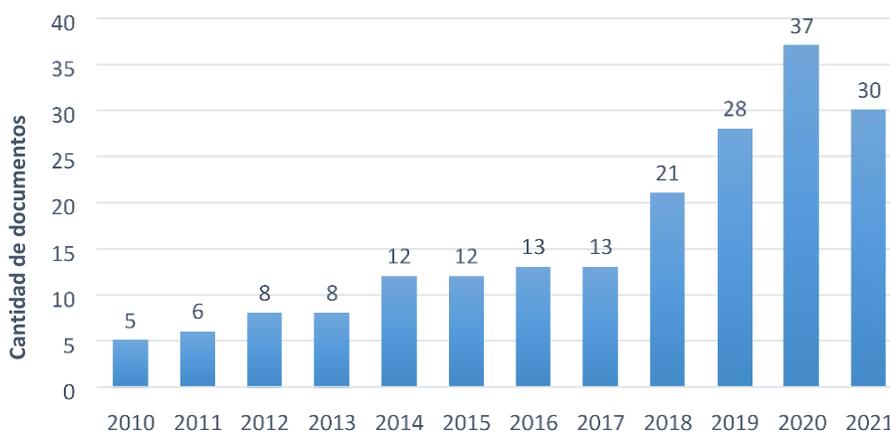
Indicador	Web of Science	Scopus	Total
Documentos totales hallados	170	243	413
Documentos totales sin repeticiones	37	89	
Tipos de documentos sin repeticiones	artículos (30)	artículos (61)	
	revisiones de artículos (6)	conferencias (20)	193
	resúmenes de reunión (1)	capítulos de libros (5)	
		revistas (3)	
Documentos compartidos entre las bases de datos	67		
Tipos de documentos compartidos	artículos (63)		
	revisiones de artículos (4)		

Complementando la Tabla 1 es posible mencionar que la ecuación de búsqueda que reportó el mayor número de documentos corresponde a “*expanded polystyrene waste*” AND *chemical*; con un total de 58 y 95 documentos, para Web of Science y Scopus, respectivamente. De otro lado, la Figura 1 muestra la distribución de los documentos por año de publicación. Según esta figura, la publicación de documentos en el tema de tratamiento químico de residuos de EPS presenta una tendencia creciente en la última década. A inicios de la década del 2010, el número de documentos publicados fue de 5, mientras que, al finalizar la década del 2020, este número aumento a más de siete veces (37). En lo que va de 2021, se han publicado 29

documentos a corte 15 de septiembre, por lo cual es de esperar que el número de publicaciones, a final de año, supere o iguale las publicadas en 2020.

Figura 1

Cantidad de documentos publicados por año



Nota: los documentos hallados presentan tendencia creciente

El crecimiento en el número de publicaciones exhibe un estancamiento entre los años 2014 – 2017 (Figura 2), pero retorna la tendencia de incremento en 2018, probablemente a causa de acciones o políticas ambientales establecidas en años inmediatamente anteriores. *E.g.*, la Unión Europea realizó un estudio en 2016, con el objetivo de identificar los diez productos principales que representaban el 86% de todos los artículos plásticos de un solo uso encontrados en las costas, dentro de los que se encontró envases de alimentos para comida rápida. Con base en ello, se evaluó la posibilidad de prohibir plásticos (fácil disposición de alternativas) mediante proyectos de ley. Dicha ruta, fue implementada en Chile (Ley de Reciclaje REP), con miras al incremento en las tasas de reciclaje de 4% a 60% en productos de envase y embalaje.

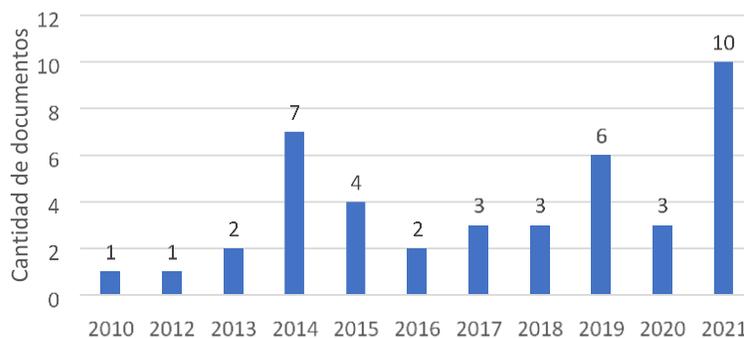
(*Regulación de Plásticos de Un Solo Uso En La Unión Europea: Foco No Está En Materialidad de Los Productos, Sino En Su Impacto En La Naturaleza y Su Capacidad de Reemplazo - País Circular, 2020.*).

Por su parte, la Tabla 1 del Apéndice C presenta los 10 primeros artículos más citados, resultantes de la ecuación de búsqueda. Según esta Tabla, los artículos con mayor número de citaciones corresponden a “*Use of recycled plastics in concrete: a critical review*” (188 citaciones) y “*Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution*” (180 citaciones). En el primero, Gu *et al.*, 2016 presentan una revisión sobre el uso de plásticos reciclados en el hormigón. Además, revisaron la morfología del hormigón que contiene materiales plásticos. Por su parte, Fok *et al.*, 2015 reportan la recolección de muestras de desechos plásticos de 25 playas en el estuario del río Pearl. Además, hallaron que los microplásticos predominantes correspondieron a poliestireno expandido (92%).

Los temas de los artículos más citados muestran que la ecuación de búsqueda reportó también documentos, cuyos temas se dirigían a otras formas de tratamiento aplicadas a EPS (secundario) así como temas ambientales. Por lo anterior, el *abstract* fue utilizado para excluir documentos con temas diferentes al tratamiento químico. Con esto, 42 documentos fueron dilucidados en el tema de tratamiento químico de residuos de EPS; de estos, 35 son artículos de investigación, 2 son revisiones, 2 son capítulos de libro y 3 son conferencias. La distribución de los documentos finales por año de publicación se presenta en la Figura 2. La tendencia mostrada en esta figura, al igual que en la Figura 1, es de tipo creciente. Los títulos de los documentos finales (42) son presentados en la Tabla 2 del Apéndice C.

Figura 2

Distribución por años de los 42 documentos seleccionados para el análisis



Nota: sobresalen los años 2014 y 2021 con el mayor número de documentos.

Por su parte, en la *Figura 2* del Apéndice A se presenta un gráfico de palabras claves para los documentos finales (elaborado en *VOSviewer*). Según esta figura, las agrupaciones de palabras clave definen a la pirólisis y la sulfonación, como líneas o temas de desarrollo en el tema de tratamiento químico de los residuos de EPS. De otro lado, en el Apéndice D se presentan figuras complementarias relacionadas con autores e instituciones, según estas figuras, es posible mencionar que las colaboraciones en el tema son de tipo incipiente, ya que se presentan colaboraciones entre máximo 4 autores y máximo 3 instituciones.

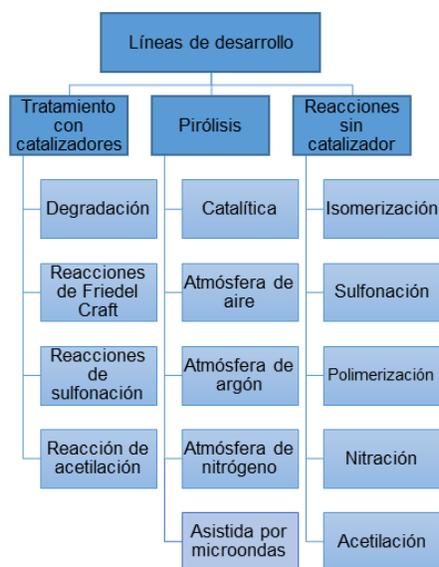
3.2. Definición de temas o líneas de desarrollo

Las líneas de desarrollo referentes al tratamiento químico de residuos de EPS fueron definidas, por medio de la lectura de los respectivos *abstract*. Las líneas identificadas de esta manera fueron: tratamiento con catalizadores, pirólisis y reacciones químicas sin catalizadores. La Figura 3 ilustra las líneas o temas de desarrollo con sus principales divisiones. Por su parte, la Tabla 1 del Apéndice A expone la bibliometría de estas líneas o temas de desarrollo (documentos

por categoría, instituciones, países, autores, área temática y número de citas). Según la Tabla 1 del Apéndice A, la línea de desarrollo con mayor información corresponde a la pirólisis (15 documentos), cuya área temática definida por *Web of Science* y Scopus corresponde a Química; esta línea presenta un número de citas de hasta 60 y en ella sobresale la Universidad de Florencia (mencionada en 3 de los 15 documentos), una de las universidades de investigación pública más grande y antigua de Italia. (Universidad de Florencia: Rankings, Tarifas y Detalles). Ver detalles en el Apéndice E.

Figura 3

Categorías de las líneas de desarrollo identificadas



3.3. Línea de desarrollo 1: Tratamiento con catalizadores

3.3.1. Degradación catalítica

En esta línea, los residuos de EPS fueron pretratados^{††} para conseguir muestras en polvo. Después, este polvo es mezclado con los catalizadores y dicha mezcla se carga en un reactor¹. Los catalizadores utilizados son presentados en la Tabla 3. Según esta tabla, entre los

^{††} Ver especificaciones en el Apéndice F

catalizadores con mayor aplicación en la degradación de residuos de EPS se tiene alúmina (Al_2O_3), magnesio, su óxido y carbonato y metales soportados en AC (Carbón activado); asimismo, es importante mencionar que el trabajo de Duarte *et al.*, 2018, de la Universidad Industrial de Santander, aplicó rutenio en el tratamiento catalítico de residuos de EPS. Las relaciones de polímero a catalizador se encuentran en el rango de 1:0,02 hasta 1:0,3 (unidades másicas); asimismo, las temperaturas de reacción se encuentran entre 150-500°C, mientras que los tiempos de reacción están entre 30-90 min (Adnan *et al.*, 2014, Shah *et al.*, 2014, Shah *et al.*, 2015, Selpiana *et al.*, 2019, ver Apéndice G). En este sentido, Adnan *et al.*, 2014, cargaron la mezcla de PS y catalizador respectivo a un reactor discontinuo Pyrex (diámetro interno de 7 cm y altura de 22 cm). Los autores utilizaron 5g de EPS con cantidades de catalizador hasta 1:0,3 (unidades másicas), desarrollando las pruebas a 450 ° C en un tiempo de 30 a 60 minutos. Entretanto, Shah *et al.*, 2014 emplearon 100 g de EPS para las mismas relaciones de polímero a catalizador; Shah *et al.*, 2015 definieron la relación de polímero a catalizador de 1:0,1 como la óptima. Estos autores desarrollaron las pruebas entre 400 y 450 °C durante 30 y 120 minutos. En contraste, Duarte *et al.*, 2018, con el catalizador $\text{RuCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (relación másica 1:0,1) realizaron las pruebas a temperatura ambiente y agitación durante 24 horas, seguido de la adición de hidróxido de bario. Selpiana *et al.*, 2019, cargaron la mezcla de EPS y catalizador respectivo (AlCl_3) a un reactor de lecho fijo. Los autores utilizaron 50g de EPS con cantidades de catalizador hasta 1:0,02 (unidades másicas), desarrollando las pruebas a 150°C, 200°C, 250 °C por 90 minutos. El volumen más alto de combustible líquido obtenido fue de 113 ml a 250°C y con la adición de 1 g de catalizador. Duarte *et al.*, 2018, reportaron la obtención de ácido benzoico y sales aromáticas de bario.

Los productos obtenidos de la degradación catalítica se encuentran en estado líquido y gaseoso. La fracción de líquidos reporta rendimientos de hasta 93,93%p (a 450°C, 30 min y en relación 1:0,3) (Adnan *et al.*, 2014). Respecto a la composición de los productos obtenidos, el estireno es el mayor constituyente en un rango entre 39,31 – 60,48%p, seguido de etilbenceno con un máximo de 12,92%p y tolueno con un máximo de 10,98%p (Adnan *et al.*, 2014, Shah *et al.*, 2015). Adicionalmente el líquido obtenido de la degradación catalítica, se separó sobre la base del punto de ebullición de los hidrocarburos mediante destilación fraccionada Shah *et al.*, 2014, obteniendo un incremento de los productos etilbenceno y tolueno. Ver Apéndice G.

Tabla 2

Catalizadores empleados

Autores	Catalizadores
Adnan <i>et al.</i> (2014)	Cu, Al ₂ O ₃ , Mmn (arcilla montmorillonita), AC (carbón activado), Cu-Al ₂ O ₃ , Cu-Mmn, Cu-AC
Shah <i>et al.</i> (2014)	Mg, MgO, MgCO ₃
Shah <i>et al.</i> (2015)	AC, Mg/AC, Zn/AC, Al/AC, Cu/AC, Fe/AC
Selpiana <i>et al.</i> (2019)	Cu-Al ₂ O ₃
Duarte <i>et al.</i> (2018)	RuCl ₃ .3H ₂ O (Tetracloruro de rutenio hidratado)

3.3.2. Reacciones de Friedel Crafts

La reacción consiste en la adición de AlCl₃ o FeCl₃ como catalizador, para la síntesis un hidrocarburo o una cetona. (Merriam-Webster, n.d.) La Figura 1 del Apéndice B ilustra la reacción de Friedel-Crafts. Con esta reacción, los documentos refieren la valorización de los residuos de EPS, por medio de la generación de adsorbentes (polímeros hiper reticulados y orgánicos porosos) para iones, gases, antibióticos, cloro fenoles, tintes y energía. Al respecto, Fu

et al. (2017) sintetizaron adsorbentes para la captura y almacenamiento de CO₂. Para ello, disolvieron residuos de PS (3 g) en DCE (80 ml) con una posterior adición de AlCl₃ anhidro, asistido de agitación por 12 h. El producto se extrajo con acetona, fue secado al vacío por 12 horas y denominado HCP-12A (polímero hiper reticulado). Adicionalmente, Fu *et al.* (2017) manifestaron que otros materiales como HCP-xA, HCP-12B y HCP-12C, pueden sintetizarse variando las cantidades de residuos de poliestireno (A: 3.0 g, B:1.0 g, C:0.33 g), así como el tiempo de reacción (x: 3, 6, 12 y 24 horas). Dichos polímeros hiper reticulados fueron caracterizados mediante FESEM, mostrando que los tamaños de partícula de HCP-xA eran mayores que los de HCP-12B y HCP-12C. Además, el rendimiento de adsorción de CO₂ en los HCP fue evaluado a 1,13 bar y 273 K, mostrando valores entre 0,932 mmol/g para HCP-3A y 1,987 mmol/g para HCP-12A. Dichos valores, de acuerdo a los autores, resultaron comparables con el polímero nanoporoso de ftalocianina (0,71 mmol de CO₂/g) y los polímeros nanoporosos funcionalizados con ácidos carboxílicos (0,76 – 1,29 mmol de CO₂/g).

Por su parte, Hu *et al.* (2019) prepararon los polímeros orgánicos porosos EPS-FDA (poliestireno expandido - formaldehído dimetil acetal) y EPS-CC (poliestireno expandido - cloruro cianúrico), para la eliminación de antibióticos (TC) y clorofenoles (2,4-DCP) de aguas residuales. Los autores disolvieron entre 0,5 – 1,0 g de EPS en: DCE-FDA o HAc-FDA, FeCl₃ anhidro y DCM-CC, AlCl₃. Luego, la mezcla correspondiente fue sometida a calentamiento y el producto sólido fue lavado con HCl, agua y otros. La purificación adicional se realizó mediante extracción con metanol y secado en estufa al vacío (80 - 100°C, 12 o 24 h). Los materiales sintetizados pasaron a estudio de adsorción de contaminantes, mediante su inserción en un matraz cónico, al cual se añadieron soluciones con concentraciones de antibióticos (TC) y

clorofenoles (2,4-DCP) en el rango de 40 – 50 mg/L (180 rpm, 12 h y 298 K). Los autores reportaron que el polímero EPS-FDA-2 (usando HAc en reemplazo de DCE) adsorbió 621,12 mg/g de TC, y el polímero EPS-CC-3 (relación másica de CC/EPS= 8,4) adsorbió 680,27 mg/g de 2,4-DCP. Tales cantidades resultan competitivas frente a carbonos activados comerciales como GAC1240, el cual adsorbe 214 mg/g y 446 mg/g de TC y 2,4-DCP, respectivamente.

De otra parte, Jia *et al.* (2019) sintetizaron los adsorbentes SHCP para el tratamiento de aguas residuales con contenidos de cadmio, Cd. Los residuos de EPS (5 g) fueron disueltos en DCE y mezclados con AlCl_3 (1,5 g). El producto fue caracterizado como PS hiper reticulado (HCP), el cual fue sometido a sulfonación (5 g de HCP, 70°C, 1h) usando DCE, Ag_2SO_4 y HCl. El producto SHCP fue enfriado, lavado y secado durante 12 h a 50°C. El SHCP fue aplicado en pruebas de purificación con agua con concentraciones de Cd entre 4 – 12 mM. Según los autores, el SHCP mostró una capacidad máxima de remoción de 0,7 mmol de Cd/g, comparable con materiales como el carbón activado (0,51 mmol/g) y bentonita Cr-pillared (0,42 g).

De otro lado, Liu *et al.* (2020) utilizaron PS como elemento de soporte para estabilizar parafina (PCM), un material compuesto destinado al almacenamiento de la energía térmica. Para ello, calentaron 10 g de parafina a 80°C y una vez fundida, agregaron DCE (25 ml) y poliestireno residual (1,5 g). Tras disolverse el poliestireno, se agregó FDA y FeCl_3 anhidro; se evaporó el DCE y se añadió etanol y amoníaco, dejando la mezcla bajo agitación durante 24 h. Posteriormente, se evaporó el etanol y el producto obtenido fue lavado y secado (12 h, 80°C) consiguiendo un polvo marrón oscuro, correspondiente al PCM encapsulado con PS residual. Durante dicho proceso, se midió la tasa de fuga de la parafina bajo variaciones en la cantidad de FDA utilizado, reportando una fina encapsulación de parafina en el esqueleto del PS hiper

reticulado; la tasa de fuga fue del 1,6% al emplear 2,5 equivalentes de FDA y del 10% utilizando 0,75 equivalentes de FDA.

Li *et al.* (2021) utilizaron residuos de PS y anhídrido 1,2,4-bencentricarboxílico (BTA) en la generación de una adsorbente sólido para la remoción de tintes en agua contaminada. Para ello, los residuos de EPS (0,94g), BTA (1,73g) y AlCl_3 (3,60 g) fueron disueltos en 60 ml de solución de cloruro de metilo (10 h a 60 °C). Luego, los sólidos negros se precipitaron y se vertieron en una solución clorhídrica (1 M). La precipitación sólida se recogió, se filtró y se lavó con agua desionizada hasta que el pH del filtrado se volvió neutro. Después de esto, el residuo amarillo se lavó tres veces con etanol anhidro. Finalmente, el polímero amarillo obtenido se trituró en polvo después de secar al vacío (12 h a 40 °C). El WEPS-BTA obtenido se caracterizó por FT-IR, TGA, BET y SEM. La prueba de adsorción realizada consistió en añadir 10 mg de adsorbente WEPS-BTA a las soluciones de azul de metileno (MEB), safranina T (SFT) y verde de malaquita (MG). Luego agitar en un oscilador termostático de baño de agua (1 h a 25°C) para así separar el adsorbente mediante una centrifuga. Li *et al.* desarrollaron experimentos de adsorción dinámica de colorantes en aguas residuales, llenando 50 mg de WEPS-BTA en una columna de vidrio para formar un lecho filtrante con una longitud de 0,6 cm y un diámetro de 0,5 cm. La solución de MEB natural con una concentración inicial de 100 mg / L fluyó a través de la columna y se recogió el efluente de la columna. Según los resultados, Li *et al.* reportaron una capacidad máxima de adsorción de MEB, SFT y MG de 859,9, 1036,7 y 1197,3 mg/g, respectivamente. Además, los autores afirmaron que el WEPS-BTA conservó su eficacia de remoción hasta después de 5 ciclos. Además, realizaron la comparación con otros adsorbentes (quitosano sulfonado, goma xantana, compuesto de óxido de hierro, bio carbón activado, compuesto de semilla de manzana Ackee y bentonita) constatando que la capacidad de adsorción

(q_m) de WEPS-BTA es buena ya que tiene un q_m alto (1197,3 mg/g) comparado con los demás adsorbentes que se encuentran en un rango de (102,1 a 1470,3 mg/g).

3.3.3. Reacciones de sulfonación

La reacción de sulfonación consiste en la unión del grupo $-\text{SO}_3\text{H}$ a una molécula orgánica mediante la formación de un enlace C – S covalente o N – S (Pica, 2015). La Figura 2 del Apéndice B ilustra un ejemplo de sulfonación para el caso del benceno. Las aplicaciones con la reacción de sulfonación y los residuos de EPS se enfocan en la producción de catalizadores para degradar colorantes orgánicos y la actividad de intercambio iónico (Antony *et al.*, 2014; Suresh *et al.*, 2017).

Antony *et al.* (2014) sintetizaron un compuesto nano híbrido PSS-CdS, para la degradación de colorantes orgánicos. Sintetizaron PSS, usando H_2SO_4 (puro o con 1%p de Ag_2SO_4) y DCE (50-60°C). Luego, precipitaron, purificaron y sumergieron las películas de PSS en una solución acuosa 1M de acetato de cadmio di hidrato, obteniendo finalmente los nano híbridos. Éstos, en presencia de la luz solar, actuaron como fotocatalizador para disminuir la absorbancia de una solución de MB desde 663 nm hasta 291 nm en 120 min. La degradación de la solución de azul de metileno fue del 54% en 180 minutos en presencia de luz solar. Dichos resultados son comparables, de acuerdo a los autores, con el uso de un fotocatalizador de vidrio/CdS en presencia de luz visible (degradación de MB del 80%, 100 min).

Por otra parte, Suresh *et al.* (2017) sintetizaron una resina de intercambio iónico (PSS) para la reducción de la acidez de aceite de cocina usado WCO y aceite de semilla de caucho (RSO). Para ello, prepararon poliestireno parcialmente sulfonado (PSS), usando H_2SO_4 (puro o con 1%p de Ag_2SO_4) y DCE (50-60°C). Luego, precipitaron y purificaron el hidrogel de PSS.

Después, utilizando el PSS como catalizador, se evaluó la esterificación de ácidos grasos libres (FFA) utilizando un baño de aceite con agitación magnética (300 rpm), seguido de la extracción de 1 g de muestra de dicha mezcla de reacción para ser analizada por titulación. Los autores presentaron la conversión de FFA en un valor de 80,8% cuando se usaron triglicéridos y un 53% usando ácido oleico puro en presencia de un 2% p/p de PSS. Dichos resultados son comparables, de acuerdo a los autores, con el uso de una resina de intercambio iónico macro reticular ácida A-15 (60°C, 2%p catalizador), con la cual se logra una conversión de FFA del 45, 7%.

3.3.4. Reacción de acetilación

La reacción de acetilación consiste en la introducción del grupo acetilo $-\text{COCH}_3$ a un compuesto específico, utilizando como agentes de acetilación al anhídrido acético o al cloruro de acetilo. La Figura 3 del Apéndice B presenta un ejemplo de acetilación. Esta reacción ha sido aplicada a los residuos de EPS en la síntesis de adsorbentes. Siyal *et al.* (2013) sintetizaron una superficie de PS-hidrazona (PSH) para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con fenol. Para ello, disolvieron EPS (3g) en CCl_4 (100 ml); la solución fue filtrada y mezclada con AlCl_3 anhidro (3,35 g) y CH_3COCl (1,98 ml) a 60°C y 50 min. Después, la solución fue filtrada; el acetil PS obtenido, fue sometido a calentamiento en presencia de agua destilada acidificada y fenilhidrazina (50°C, 60 min). Como resultado se obtuvo PSH, el cual fue lavado con agua desionizada y secado al aire. Los autores desarrollaron pruebas de adsorción de fenol usando un agitador termostatzado (25°C, 10-180 min, 100 rpm) y matraces cónicos con 10 ml de solución de fenol (5-55 mg/L). Según los autores, el PSH mostró una capacidad de adsorción de 1,962 mmol/g de fenol, comparable con resinas de PS – DVB, las cuales presentan capacidades de 1,013 a 1,153 mmol/g para la remoción de fenol.

3.4. Línea de desarrollo 2: Pirólisis

3.4.1. Pirólisis en atmósfera de nitrógeno

Esta pirólisis está dirigida a la descomposición térmica de desechos plásticos. Ren *et al.*, 2021, utilizaron muestras de PS prístino y residuos de PS. Los desechos fueron pulverizados y sometidos a degradación térmica (4-5 mg, 30 ml/min de N₂, 298 - 800K, 5-20 K/min). Las curvas del analizador termogravimétrico exhibieron un solo valle para cada tasa de calentamiento con temperaturas entre 650 – 680 K, por lo cual se asume que todas las muestras analizadas se rigen bajo un solo mecanismo de reacción que describe los procesos de pirólisis. Asimismo, los autores afirmaron que el EPS resultó menos estable térmicamente (Ea:128.3 kJ/mol) que el YPS (Ea: 182.0 kJ/ mol). Así, las muestras de YPS requieren más energía para dissociar los enlaces de los reactivos (ΔH : 176,2 kJ/mol) en comparación con PS (ΔH : 133,9 kJ/mol) y EPS (122,8 kJ/mol); formando como posibles productos, estireno, etilbenceno, cumeno y tolueno.

3.4.2. Pirólisis en atmósfera de argón

El ambiente de Ar, aplicado en la generación de un adsorbente de carbón magnético activado, para la remoción de contaminantes en medio acuoso. Machado *et al.* (2021) sintetizaron un adsorbente a partir de residuos de EPS, por medio de la pirólisis en Ar, para la remoción de fenol, azul de metileno e índigo carmín. Los autores utilizan 15 g de EPS en mezcla con acetato de etilo y acetyl acetato de hierro III (impregnación de muestras de EPS con Fe³⁺ en solución); posteriormente aplicaron pirólisis en Ar (10°C/min Ar, 530°C, 13 bar y 5 h). El producto de la pirólisis fue activado con KOH anhidro. El PS-Fe carbonizado resultante (MAC), fue ensayado en la remoción de los contaminantes (tiempo de contacto: 24 h, MAC: 15 mg, 0,05 mmol / L de adsorbato). Según los autores, el PS-Fe presentó una capacidad de remoción de

623,2 mg/g, 115,7 mg/g y 281,0 mg/g para índigo carmín, fenol y MB respectivamente. Tales valores son comparables con el uso de bio – nanopartículas de Fe_3O_4 (393,7 mg IC / g); compuesto magnético de carbono con Fe – residuos de PET (124 mg fenol / g); carbón activado magnético modificado con hierro/cerio (255,76 mg MB / g). Además, el PS-Fe reportó regeneración térmica positiva, manteniendo el 60% de su capacidad de adsorción de contaminantes.

3.4.3. Pirólisis en atmósfera de aire

Esta pirólisis se aplica en la obtención de fracciones líquidas como estireno, etilbenceno y p-xileno. Al respecto, Torres *et al.* (2018) aplicaron la pirólisis en aire a muestras de EPS de diámetro 2,54 cm y espesor 0,4 cm, a una temperatura de 120°C por 7 horas. Los autores aplicaron análisis químicos e imágenes ópticas a muestras recolectadas cada hora. Según los autores, la pirólisis aplicada condujo a la fragmentación de las cadenas poliméricas, con un aumento de la carbonización hasta 6,6% y disminución de la hidrogenación y oxidación en 6,2% y 2,5%, respectivamente. De acuerdo con los autores, la evolución de los estados químicos en las muestras de EPS (tiempos de erosión entre 0 y 90 s), exhibieron la formación de dobles enlaces consecutivos; indicando la formación de fragmentos de polímero.

Selpiana, *et al.* (2019) utilizaron el proceso de pirólisis en un reactor de lecho fijo para tratar poliestireno de alto impacto (HIPS), poliestireno expandido (EPS) y poliestireno biorientado (OPS). El tamaño de HIPS y OPS fue 1cm^2 y el diámetro del EPS de 3-5mm. La masa de la muestra de cada proporción fue de 100 g. La pirólisis en aire fue aplicada a 350 °C por 7 h. Según los autores, la conversión a productos líquidos más alta fue de 76%p, con una relación 0:0:1 de HIPS: EPS: OPS, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Los

compuestos mayoritarios en la fracción líquida fueron etilbenceno, *p* - xileno, estireno, 2 - fenil-1propeno, 1,3-difenilpropano y metilestireno. Los autores concluyeron que cuanto mayor sea la relación OPS, mayor será la formación de etilbenceno; asimismo, a mayor proporción de EPS, mayor rendimiento de estireno. También, los autores afirmaron que a mayor proporción de HIPS, mayor la formación de grupos metilo y etilo.

3.4.4. Pirólisis asistida por microondas

Al respecto, Undri *et al.* (2014) utilizaron pirólisis asistida por microondas (MAP) para lograr la polimerización inversa de residuos de PS. Los autores utilizaron un horno en megavatios asociado con el microondas (MW) con 2,45 GHz y 3 kW de potencia, equipado con un termómetro infrarrojo y conectado a una columna de fraccionamiento. Undri *et al.* emplearon 100g de PS y 47,3g de carbón, generando líquidos (86,5% p), gases (3,7% p) y sólidos (0,9 %p). Según los análisis realizados por los autores la fracción líquida estaba compuesta por aromáticos de un solo anillo (estireno, tolueno, etilbenceno y metil-estireno) en su mayoría estireno (66%p). Además, los autores afirmaron que el tiempo de residencia (modificado con el uso de un sistema de fraccionamiento) modificó la viscosidad y la densidad del líquido, con un aumento en el rendimiento de carbón, hasta el 10%. Undri *et al.*, 2014 caracterizaron al líquido mediante pruebas físicas (densidad, viscosidad, alto poder calorífico) y químicas (análisis elemental, GC-MS y FT-IR).

Frediani *et al.* (2014) aplicaron pirólisis asistida por microondas (MAP) a residuos de PS. Los autores utilizaron un horno doméstico con un recipiente de arcilla cocida (por lo tanto, un reactor discontinuo) lleno de PS, junto con carbón o un metal (hierro, aluminio) como absorbedor de MW. MAP de PS ha sido investigado en presencia de un absorbente de

microondas como carbono, malla de hierro o aluminio, como bobina o malla. Según los autores, el MAP aplicado a residuos de PS condujo a la generación de un líquido (hasta 92%p), con composición aromática, especialmente estireno. Asimismo, según los autores, la aplicación prolongada del MAP disminuyó la generación de estireno, debido a reacciones secundarias.

Bartoli *et al.* (2015) también aplicaron la pirólisis MAP en presencia de carbón como absorbente, para la despolimerización de residuos de PS. Los autores utilizaron tres montajes y en todos ellos colocaron muestras (en un rango de 100 a 125 g) en un matraz Erlenmeyer de borosilicato dentro del horno MW con 2,45 GHz conectado con dos sistemas de condensación enfriados a 298 K y 263 K, respectivamente. En la configuración A, se insertó una bomba de vacío, en la B se añadió una columna de fraccionamiento con esferas de vidrio, mientras que en la C utilizaron el mismo montaje A, pero con suministro de N₂. Según los autores, la pirólisis en atmósfera de aire condujo a la formación de un líquido claro, mientras que en atmósfera de N₂, la pirólisis condujo a un líquido marrón oscuro; el rendimiento de líquido en aire fue superior al 75%p, mientras que el rendimiento en N₂ fue de 94,3%p. Los autores reportaron la obtención de estireno líquido en atmósfera de aire a un rendimiento del 71,9%p en la configuración B, por medio de la aplicación de un sistema de fraccionamiento a baja presión (21,3 kPa). Sin embargo, de acuerdo con los autores, la pirólisis bajo atmósfera de N₂ facilita la destilación del producto y permite recolectar el mayor porcentaje de la fracción líquida en poco tiempo, sin embargo, el rendimiento de estireno es bajo.

3.4.5. Pirólisis catalítica

Esta pirólisis está orientada principalmente a la producción de componentes como estireno, etilbenceno y tolueno. Los catalizadores más utilizados en esta pirólisis son expuestos

en la Tabla 4. En términos generales, la aplicación de la pirólisis catalítica envuelve la mezcla de EPS pretratados^{‡‡}, con el catalizador correspondiente. Las relaciones de polímero-catalizador utilizadas se encuentran entre 1:0,05 y 1:0,2, mientras que los tiempos de reacción y las temperaturas se encuentran entre 60 - 150 min y 445 - 550 °C. Los productos obtenidos de esta pirólisis son recogidos y condensados (Panda *et al.* (2012), Adnan *et al.* (2014b), Verma *et al.* (2021)) y adicionalmente destilados (Poletto *et al.* (2014), Hazrat *et al.* (2016), Rex y Miranda (2020), Hussain *et al.* (2021)).

Tabla 3

Catalizadores empleados en la categoría pirólisis

Autores	Catalizadores
Panda <i>et al.</i> (2012)	Arcilla de caolín de calidad comercial. Sílice alúmina amorfa (Si-Al)
Adnan <i>et al.</i> (2014b)	Zn, ZnO, ZnCl ₂ (gránulos)
Hazrat <i>et al.</i> (2016)	Zeolita natural (NZ), alúmina
Rex y Miranda (2020)	Sintetizado a partir de cáscara de arroz y ácido oxálico (RH _{0A0,25}).
Verma <i>et al.</i> (2021)	Catalizador de amonio ZSM-5 (SiO ₂ :Al ₂ O ₃ proporciones molares 200-400:1)
Hussain <i>et al.</i> (2021)	Cemento Portland

Los documentos relacionados con la pirólisis catalítica reportaron rendimientos de productos líquidos de hasta 96,7% p, bajo las condiciones de 450°C, 120 min como tiempo de reacción y relación polímero a catalizador Zn de 1:0,2 (Adnan *et al.* (2014b)). Respecto a los productos obtenidos, el estireno es reportado como el producto mayoritario en un rango entre 40,88 - 64,65%p, seguido de etilbenceno con un máximo de 24,73 %p y tolueno con un 12,56%p (Panda *et al.* (2012), Adnan *et al.* (2014b), Verma *et al.* (2021), Hussain *et al.* (2021), Rex y Miranda (2020), Hazrat *et al.* (2016), Poletto *et al.* (2014)). Ver Apéndice I.

^{‡‡} Ver detalles en el Apéndice H

Por otro lado, para esta línea o tema de desarrollo de pirólisis, Caliendo (2018) menciona a la empresa Agilyx, ubicada en Tigard, Oregon, Estados Unidos, la cual cuenta con un reciclaje químico de PS a escala industrial. Esta planta presenta una capacidad para reciclar 10 ton/día de PS. Agilyx recibe el material, lo convierte en estireno líquido mediante pirólisis, lo envía a un refinador de estireno y finalmente a un fabricante de resina.

3.5. Línea de desarrollo 3: Reacciones químicas sin catalizadores

3.5.1. Reacciones de sulfonación

En la Figura 2 del Apéndice B se presenta un ejemplo de reacción de sulfonación, la cual puede llevarse a cabo en ausencia del catalizador (referido en la sección 3.3.3 como Ag_2SO_4). Esta categoría abarca la síntesis de resinas de intercambio iónico, complejos de inclusión, adsorbente y producción de isopulegol. A respecto, Sułkowski *et al.* (2013) sintetizaron resinas de intercambio iónico para la remoción de metales Zn^{2+} y Cu^{2+} de efluentes acuosos. Para ello, la sulfonación fue realizada utilizando ácido sulfúrico de sílice sintetizado a partir de gel de sílice y ácido cloro sulfónico. Luego, los residuos de EPS fueron disueltos (5 g) en 100 ml de 1,2-DCE, desarrollando la reacción en presencia de ácido sulfúrico de sílice por 7 h, a 60°C. Según los autores, durante los ciclos de adsorción y regeneración, la capacidad de la resina para intercambiar cationes disminuyó de aproximadamente 2,5 a 2,3 miliequivalentes gramos (meq/g). Sułkowski *et al.*, 2013 determinaron que la dosis óptima de resina es de 0,2 g; al igual que Pehlivan y Altun que para la misma concentración de iones Zn^{2+} y Cu^{2+} utilizaron 0,1 g de la resina comercial Dowex 50 W para eliminar iones de soluciones de 20 ml (25 ° C, 180 rpm).

Tabekh *et al.* (2015) sintetizaron poliestireno sulfonado para la eliminación de iones metálicos de afluentes acuosos. Los autores calentaron PS con H_2SO_4 en un baño de aceite de

silicona durante 1 - 2 horas. El producto fue lavado con bicarbonato de sodio para la eliminación del H_2SO_4 residual; la sulfonación fue desarrollada con una relación molar 1:1. Según los resultados, los autores afirmaron que los residuos de poliestireno modificado con grado de sulfonación del 47% reportaron la mayor adsorción de iones metálicos tóxicos de aguas contaminadas: Cu^{2+} (1,5mmol/g), Co^{2+} (2,3 mmol/g), Ni^{2+} (1,5 mmol/g) y Cr^{3+} (3,5 mmol/g). Además, los autores realizaron la comparación entre ácido sulfúrico comercial y puro encontrando grados de sulfonación de 18 y 22, respectivamente, por lo que sugieren el uso del comercial debido a su precio.

Ruziwa *et al.* (2015) sintetizaron una resina de intercambio iónico para la remoción de Zn^{2+} y Pb^{2+} del agua. Para ello, la sulfonación fue aplicada mediante la reacción de residuos de EPS con H_2SO_4 (al 95%), seguido de un filtrado, un lavado y un secado en horno a 40°C , por 30 minutos. Se llevaron a cabo experimentos de adsorción utilizando 50 ml de soluciones de Zn^{2+} , Pb^{2+} y 0,25 g de PS sulfonado bajo agitación durante 2 h y a temperatura ambiente. Según los autores, la capacidad máxima de adsorción obtenida con la resina para la remoción de Zn^{2+} fue de 0,38 mg/g y para la remoción de Pb^{2+} fue de 0,68 mg/g. Dichos valores están por debajo de los registrados por Microwaved Olive Stone (23,47 mg Pb^{2+} /g y 15,08 mg Zn^{2+} /g) debido según los autores, a que estos últimos se derivan de biomasa pirolizada, mientras que los sulfonados por Ruziwa *et al.* (2015) se derivan de un material sintético.

Merchan-Arenas *et al.* (2017), sintetizaron poliestireno sulfonado (SPS), a partir de la sulfonación de residuos de EPS y XPS, para la aplicación en la adsorción de petróleo. La síntesis de SPS fue realizada, mediante la desgasificación de los residuos en acetato de etilo, disolución de 5,2 g de PS desgasificado en 25 ml de DCE a 50°C . Esta solución de PS-DCE fue tratada con acetilsulfato y calentamiento durante 1 h. El poliestireno sulfonado (SPS) se utilizó para la

adsorción estática en la recuperación de petróleo alcanzando tasas de 73,002 mg /g y 131,208 mg/g para SEPS y SXPS, respectivamente. Merchan-Arenas *et al.*, basándose en la literatura, compara dos métodos comunes para la sulfonación de PS, ácido sulfúrico líquido y sulfato de acetilo (Kučera y Jancář, 1998). En ese caso, el éxito del protocolo se determinó mediante el grado de sulfonación y el tratamiento de evaluación, mencionados anteriormente. Según los autores, la reducción de la adsorción de alrededor de 2000 ppm se adquiere mejor cuando se utiliza poliacrilato, sin embargo, este reactivo puede resultar más costoso que el PS y el tetraborato de sodio.

De Leon-Condes *et al.* (2019) sintetizaron un adsorbente con nanopartículas (FeO-NPs+SWPS) para la captura del tinte índigo carmín en solución acuosa. Los autores mezclaron 5 g de EPS en 80 ml de H₂SO₄ (95°C, 90 min); las partículas de SWPS fueron filtradas, lavadas con agua y desgasificadas. Adicionalmente se obtuvo un extracto de té verde para agregarlo a la solución ferrosa y sintetizar in situ el compuesto FeO-NPs+SWPS. Una vez finalizada la reacción, se separaron las partículas de los reactivos residuales, lavadas con agua destilada y secadas a temperatura ambiente. La capacidad de intercambio iónico fue determinada mediante titulación usando 0,1 g de polímero seco en una solución de HCl 1M durante 24 h. Los autores reportaron que el adsorbente logró una remoción del 86,7% del tinte índigo carmín en una solución de 100 mg/L (60 min, 6 g/l del compuesto). Dichos resultados fueron comparados con la capacidad de adsorción de un material de zeolita – Fe, el cual exhibió una capacidad de 32, 83 mg IC / g.

Por su parte, Dardeer y Toghan (2021) sintetizaron ácido poliestireno sulfónico y por primera vez pseudopolioxitaxano (en presencia de gamma ciclodextrina) para la formación de un complejo de inclusión (PSSA / γ -CD), útil en sistemas de transferencia de energía y

administración de fármacos. Sintetizaron el PSSA (20 g de EPS, 30 ml de cloroformo, 5 ml de H_2SO_4) y el pseudopolirotaxano, (2 g de γ -ciclodextrina, 20 ml de DMSO, 0,5 g de PSSA agitación durante 18 h). Según los autores, los valores de banda prohibida de energía para PSSA y pseudopolirotaxano fueron 2,13 y 3,6 eV, respectivamente lo que indica propiedades ópticas mejoradas.

S. H. Liu *et al.* (2021) sintetizaron adsorbentes ($\text{EPS}_{\text{H}_2\text{SO}_4+\text{persulfato}}$) a partir de la sulfonación de residuos de PS, para el tratamiento de aguas residuales con contenidos de norfloxacin. La norfloxacin es un medicamento utilizado para tratar infecciones de bacilos en humanos y animales; aproximadamente el 70% de ésta, se excreta a través de las heces y se libera al medio ambiente. Los autores utilizaron 0,5 g de WEPS con 50 ml de H_2SO_4 , HNO_3 y H_3PO_4 a 120°C durante 60 min; además de los oxidantes H_2O_2 y persulfato. Los experimentos de adsorción del EPS modificado, emplearon 0,2 g/L de adsorbente en soluciones de norfloxacin de 50 ml y 25 mg/l. Según los autores el $\text{EPS}_{\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{persulfato}}$ (0,4 g/l) reportó una adsorción del 97,2% de la norfloxacin diluida en agua para un tiempo de contacto de 30 min, correspondiente a 140,9 mg/g, superior al reportado por resinas comerciales como los nanotubos de C múltiples (89,0 mg/g). Asimismo, S. H. Liu *et al.* (2021) afirmaron que el adsorbente mantuvo su capacidad de adsorción después de 8 ciclos de regeneración.

Ribeiro *et al.* (2021) sintetizaron (-)- isopulegol, componente de aplicación industrial en la composición de fragancias como intermediario para producir (-)- mentol. La metodología de producción del isopulegol envolvió la reacción de WEPS (1g) con H_2SO_4 (20 ml) durante 3 h, a temperaturas entre $100\text{-}105^\circ\text{C}$. El producto fue lavado con NaOH, agua desionizada, HCl y agua. Después el producto fue secado a (70°C , 24 h) y sujeto a reacción de ciclación de (+)-

citronelal, de donde se obtuvo (-) - isopulegol y (+)-neoisopulegol. Según los autores, el rendimiento de producción del isopulegol fue cercano al 80%.

3.5.2. Reacción de acetilación

En la Figura 3 del Apéndice B se presenta un ejemplo de reacción de acetilación, la cual puede llevarse a cabo en ausencia del catalizador (referido en sección 3.3.4. como AlCl_3 anhidro). Estas reacciones se destinaron a la producción de adsorbentes. Al respecto, Taiwo *et al.* (2021) crearon un adsorbente (AWEP) para la eliminación de naftaleno en solución acuosa. Los autores mezclaron WEPS con ácido acético (100 ml) y calentaron dicha mezcla a 600 Hz durante 90 min; el producto fue neutralizado con NaOH y secado. Para los experimentos de adsorción, se usaron entre 0,5 – 1,5 g de AWEPS mezclado con 100 ml de solución de naftaleno con concentraciones de 5 a 30 mg/l, 100 – 250 rpm y 28 °C. Los WEP acetilados (AWEP) presentaron una capacidad de adsorción de naftaleno de 5,66 mg/g, superior a la expuesta por carbones activados (1,44 mg/g) y arcilla activada (1,60 mg/g) para la eliminación de naftaleno.

3.5.3. Reacciones de nitración

En la Figura 4 del Apéndice B se presenta un ejemplo de reacción de nitración. Esta reacción consiste en la introducción de un grupo nitro ($-\text{NO}_2$) en un hidrocarburo, produciendo un éster. Esta categoría de reacciones utilizadas en los trabajos analizados se enfocó en la síntesis de adsorbentes. Así, Dardouri *et al.* (2016) prepararon resinas destinadas a la extracción de cationes metálicos contenidos en soluciones acuosas. Disolvieron poliestireno (1 g) en cloroformo, seguido de la adición de éter corona (B15C5 o DB18C6) con porcentajes en peso de 5, 10, 15 y 20. Paralelamente, nitraron PS (5 g) en cloroformo y HNO_3 ; redujeron grupos nitro usando SnCl_2 , HCl y etanol (50°C, 2 h); diazotaron usando HCl y NaNO_2 (0 – 4 °C, 24 h). Los

productos (10 g) se incubaron en 20 ml de solución de iones metálicos con concentraciones de 2×10^{-4} mol/l durante 24 h a 25°C . Como resultado, las resinas sintetizadas con injertos de éter corona, lograron extraer el 98, 92, 71, 93 y 88%p de Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Ni^{2+} y Cd^{2+} , respectivamente. Dichos porcentajes, superaron a los removidos por DB18C6 puro, que fueron de 91, 74, 70, 67 y 48%p de Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Ni^{2+} y Cd^{2+} respectivamente.

Merchan-Arenas y Murcia-Patino (2021) crearon un adsorbente (PSNH_2) para la captura de CO_2 ; sintetizaron polinitroestireno usando 1,2-DCE, 1,5 g de poliestireno, una mezcla de HNO_3 - H_2SO_4 e isopropanol (30°C , 20 h). El sólido obtenido se mezcló con HCl, etanol y Sn granular (50°C , 9 h); para las pruebas de adsorción de CO_2 se trabajó a presiones de 6 y 802 mmHg y 0°C . PSNH_2 demostró una capacidad de adsorción de hasta 1.05 mmol/g CO_2 , cercana a la reportada por la poliamina de 2,3 mmol/g.

3.5.4. Reacción de isomerización

En la Figura 5 del Apéndice B se presenta un ejemplo de reacción de isomerización. Heeb *et al.* (2010) informaron los cambios de los patrones de HBCD e iBPBCD al exponer EPS y XPS a temperaturas de $140 - 160^{\circ}\text{C}$. Para ello, las muestras de PS se disolvieron en DCM y se expusieron en un baño de aceite ($140, 150$ y 160°C para 0, 1.2 y 4 h). Después, las muestras se enfriaron para adicionarles acetonitrilo dando como resultado suspensiones de materiales de poliestireno y sobrenadante transparente, el cual fue concentrado y sometido a análisis LC-MS. Los autores reportaron reacciones de transformación en el EPS en a-HBCD; los patrones de XPS sin tratar se parecían a los del EPS tratado térmicamente. El objetivo de los autores fue estudiar el reordenamiento intramolecular de HBCD e iBPBCD, considerada como una sustancia bioacumulativa – tóxica y una nueva clase de compuestos polibromados, respectivamente.

3.5.5. Reacción de polimerización

En la Figura 6 del Apéndice B se presenta un ejemplo de reacción de polimerización. Lou *et al.* (2018) proponen un método de extracción utilizando microesferas de PS-divinilbenceno recubiertas de grafeno (G @ PS-DVB) para la determinación de alérgenos de dispersos tintes en aguas residuales industriales. Mezclaron 20 g de estireno, 0.7 g de AIBN y 3.0 g de PVP, etanol y agua (70 °C, 12 h). Como resultado se obtuvo poliestireno monodisperso (PS), el cual se mezcló con ftalato de dibutilo (DBP), sodio, dodecilsulfato de sodio (SDS) y alcohol polivinílico (70 °C, 48 h). Las partículas resultantes mostraron que el método d-SPE-SFC basado en G @ PS-DVB correspondió a una alternativa para la captación de colorantes dispersos en muestras reales con recuperación entre el 89,1% al 99,7%.

3.6. Comparación de las líneas de desarrollo identificadas

Una vez definidas las líneas de tratamiento, descritos sus procedimientos y presentado los resultados, se identificó el enfoque de los documentos (laboratorio o escalable), como se aprecia en el Apéndice J, prevaleciendo los trabajos a escala laboratorio (30 documentos). Cabe mencionar de nuevo a la empresa Agilyx, ubicada en EE. UU., la cual aplica un proceso de reciclaje químico de ciclo cerrado (pirólisis) a escala industrial para PS, reciclando así hasta 10 Tm/d y produciendo monómeros de estireno de alta calidad (Caliendo, 2018).

Adicionalmente en el Apéndice K se presentan la información de seguridad referente a los principales materiales empleados por cada línea de tratamiento identificada. De este apéndice, puede afirmarse que, en materia ambiental, las tres líneas de tratamiento influyen negativamente ya que se mencionan materiales en la categoría *peligroso para la vida acuática*. También se consideraron los análisis experimentales de mayor referencia, los cuales aparecen en

la Tabla 1 del Apéndice L. Según esta tabla, los análisis de mayor aplicación corresponden a caracterización de materiales (FTIR, SEM), análisis térmico TGA, estudios de actividad de los catalizadores y experimentos de sorción.

En la Tabla 5, se resumen los principales materiales o catalizadores usados, los procedimientos, las ventajas y las aplicaciones, hallados en la presente revisión. Aquí se resalta la síntesis de adsorbentes/resinas y la recuperación de materias primas como estireno, tolueno y etilbenceno. En contraste, las aplicaciones menos frecuentes, es decir, las posibles tendencias de investigación, trataron temas como: la obtención de soportes para el almacenamiento y/transferencia de energía, intermediarios para la industria de la química fina (isopulegol) y estudios enfocados en la adquisición de parámetros cinéticos y termodinámicos.

Tabla 4
Comparación entre categorías de tratamiento químico para residuos de EPS

Categoría	Materiales	Procedimiento	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Degradación catalítica	Cu, Fe, Al, Al ₂ O ₃ , Mn, AC, Mg, MgO, MgCO ₃ , Cu-Al ₂ O ₃ , RuCl ₃ ·3H ₂ O	Degradación catalítica Destilación fraccionada	Rendimiento de productos líquidos elevado (84-93%p) Productos aromáticos de bajo peso molecular Preferencia por catalizadores soportados (centros activos) No se requieren solventes	Implican temperaturas de hasta 500°C. Predominio de trabajos a escala laboratorio Información de seguridad desfavorable para los materiales empleados	Producción de estireno, tolueno, etilbenceno, benceno
Pirólisis	Arcilla de caolín Alúmina de sílice Zn ZnO ZnCl ₂ Cemento Portland Zeolita natural (NZ) Alúmina Amonio ZSM-5 RH _O A0.25	Degradación térmica y catalítica Síntesis de carbón activado magnético (MAC)	Los documentos que pertenecen a esta línea de desarrollo, presentan el cálculo de parámetros cinéticos y termodinámicos Algunos catalizadores pueden recolectarse y regenerarse magnéticamente después de la operación Generación mínima de gases (3,7%p) y sólidos (0,9%p)	Implican temperaturas de hasta 550°C. Uso del disolvente acetato de etilo (atmósfera de argón) Predominio de trabajos a escala laboratorio Información de seguridad desfavorable para los materiales	Estudio la estabilidad térmica de desechos plásticos Adsorbente de contaminantes orgánicos en medio acuoso Obtención de materias primas para la industria del refino

			Generación de productos valiosos como el estireno, así como gas y sólido que se pueden usar como combustible y energía.	empleados	
Reacciones de Friedel Crafts	AlCl ₃ anhidro FeCl ₃ anhidro Ag ₂ SO ₄ H ₂ SO ₄ BTA anhídrido	Preparación de polímeros hiper-reticulados (HCP) Síntesis de polímeros orgánicos porosos (POPs)	No se usan catalizadores de metales preciosos Los POPs exhiben capacidades de adsorción mayores que las comerciales (621,12 mg/g – 680,27 mg/g)	Implica el uso de solventes como BCE, HAc, DCM y BTA. Información de seguridad desfavorable para los materiales empleados	Captura y almacenamiento de CO ₂ Eliminación de antibióticos (TC) y clorofenoles (2,4-DCP) de aguas residuales
Reacción de sulfonación	Ag ₂ SO ₄ H ₂ SO ₄ Na ₂ S ₂ O ₈ Sulfato de acetilo Ácido sulfúrico de sílice	Síntesis de resinas sulfonadas Síntesis de pseudo-politaxano que contiene γ -ciclodextrina Síntesis de adsorbentes (EPS _{H2SO4+persulfato}) Producción de (-)- isopulegol	EPS _{H2SO4+persulfato} mantiene la capacidad de adsorción tras 8 ciclos.	Uso del disolvente DCE. Predominio de trabajos a escala laboratorio Información de seguridad desfavorable para los materiales empleados	Degradación de colorantes orgánicos Remoción de iones de metales pesados del agua Sistemas de transferencia de energía (química supramolecular) Tratamiento de aguas residuales que contienen norfloxacin Industria de la química fina

					(fragancias, intermediario para producir (-) – mentol)
					Generación de materia prima para biodiesel
Reacción de acetilación	AlCl ₃ anhidro CH ₃ COOH	Síntesis de adsorbentes (PSH, AWEP)	Se menciona el uso de un diseño factorial para optimizar la sorción multivariante	Predominio de trabajos a escala laboratorio	Tratamiento de aguas residuales contaminadas con fenol
					Adsorción de naftaleno en solución acuosa
Reacciones de nitración	N, N-dimetilciclohexilamina B15-C5 DB18-C6	Síntesis de adsorbentes (PSNH ₂) y resinas	Uso de disolventes intercambiables Los materiales usados, difieren a los referidos comúnmente visibilizando nuevos enfoques de aprovechamiento para los WEPS)	Implican tiempo de reacción de hasta 20 h. La preparación de las resinas implica múltiples etapas, por ejemplo, nitración del poliestireno, reducción de grupos nitro y diazotación Predominio de trabajos a escala laboratorio Información de seguridad desfavorable para los materiales empleados	Captura de CO ₂ Extracción de cationes metálicos contenidos en solución acuosa

Reacción de isomerización	HBCD iBPBCD	Disolución de DCM Exposición baño de aceite Adición acetonitrilo Formación a-HBCD	HBCD e iBPBCD son más polares y solubles en agua	Uso de DCM como disolvente Predominio de trabajos a escala laboratorio Información de seguridad desfavorable para los materiales empleados	Determinar los cambios estructurales del EPS
Reacción de polimerización	Microesferas de PS-divinilbenceno Grafeno (G @ PS-DVB)	Preparación de microesferas G@ PS-DVB Síntesis de polímeros PS-DVB Preparación de óxido de grafeno prístino	Los sorbentes sintetizados poseen una excelente estabilidad térmica. Excelente rendimiento de G @ PS-DVB para extraer alérgenos	Uso de DBP como disolvente Implican tiempo de reacción de hasta 48 h Predominio de trabajos a escala laboratorio Información de seguridad desfavorable para los materiales empleados	Determinación de alérgenos de dispersos tintes en aguas residuales industriales

Oportunidades de mejora

Detallar los gastos energéticos implicados

Presentar los costos de los reactivos utilizados

Implementar el uso de simuladores a los procesos experimentales descritos

Ampliar la investigación sobre alternativas de solventes y materiales con información de seguridad más favorable

Adicionalmente en la Tabla 2 del Apéndice L se presenta la clasificación por años resultante de las líneas de tratamiento identificadas. En ésta, se aprecia que las actuales

aplicaciones de los métodos químicos a residuos de EPS corresponden a pirólisis y reacciones químicas sin catalizadores.

3.7. Comentarios finales

Dentro de los 42 documentos analizados se encontró una revisión de Uttaravalli *et al.*, 2020 referente a las alternativas de aprovechamiento de EPS. Los autores presentaron las líneas: degradación catalítica, desarrollo de materiales carbonosos, (pirólisis, Friedel Crafts), fabricación de materiales compuestos para la modificación de propiedades del concreto y preparación de adhesivos por disolución; esta última línea perteneciente a procesos físicos. De esta manera, el presente documento amplía las líneas de desarrollo, incluyendo las reacciones sin catalizador (sulfonación, acetilación y otras), así como los trabajos en pirólisis con microondas y la descomposición termo-catalítica de los residuos de EPS. Además, se clasifica la pirólisis en atmósferas de Ar, N₂, aire, asistida por microondas o con catalizadores.

Finalmente, el desarrollo del presente documentó permitió visualizar que las posibilidades de escalado de los trabajos analizados, están enfocadas principalmente a las reacciones de Friedel – Crafts. Por otra parte, los documentos no detallan gastos energéticos, costos de los materiales empleados o uso de simuladores, por lo que serían oportunidades de mejora. Además, en materia ambiental, el reciclaje terciario reduce la demanda de materia prima; evita la disposición de aditivos tóxicos (procedentes de la síntesis de PS) en aguas subterráneas y rellenos sanitarios. No obstante, se recomienda ampliar la investigación en solventes o materiales con información de seguridad más favorable, que incluso lleve a la disminución de tiempos y temperaturas de reacción.

4. Conclusiones

Durante la presente revisión del estado del arte, el análisis bibliométrico aplicado permitió identificar que los autores con mayor número de citas fueron Undri (60) y Heeb (56) quienes se encuentran asociados a la Universidad de Florencia y la Universidad de Zúrich. Además, el área temática tratada corresponde principalmente a química.

Los métodos químicos de mayor desarrollo aplicados a residuos de EPS fueron tratamiento con catalizadores, pirólisis y reacciones químicas sin catalizadores. Su validación experimental incluyó la caracterización de los materiales sintetizados, estudios de actividad y experimentos de adsorción. Además, los materiales empleados en las diferentes líneas de desarrollo presentaron información de seguridad relacionada con la categoría irritante, corrosiva, tóxica, inflamable, peligrosa para el medio ambiente, cancerígena y mutagénica.

El impacto de los métodos químicos aplicados a residuos de EPS derivó en: la recuperación de monómeros como el estireno, tolueno y etilbenceno; producción de polímeros destinados a la captura de CO₂, eliminación de antibióticos, naftaleno, iones de Cd, Zn, Pb, Cr, Ni y Fe, fenol, azul de metileno e índigo carmín en soluciones acuosas; soporte para compuestos destinados al almacenamiento de energía térmica; síntesis de intermediarios para formulación de fragancias; y el estudio de la descomposición térmica del EPS.

La línea de tratamiento con catalizadores es favorable para sintetizar adsorbentes destinados al tratamiento de soluciones acuosas que contengan fenol, así como iones de cadmio puesto que sus capacidades de remoción (1,962 mmol de fenol/g y 0,7 mmol de Cd/g) superan

las reportadas por la literatura utilizando materiales como resina PS-DVB (1,153mmol fenol/g) y carbón activado (0,51mmol Cd/g).

La línea de pirólisis se destaca por la síntesis de adsorbentes para índigo carmín (623,2 mg/g) y azul de metileno (281 mg/g) cuyos valores superan los reportados en la literatura (nanopartículas de Fe_3O_4 y carbón activado, 393,7 mg de índigo carmín y 255,76 mg de azul de metileno/g, respectivamente); además el rendimiento de productos como estireno (64,65%p), etilbenceno (24,73%p) y tolueno (12,56%p) fueron mayores a los reportados mediante degradación catalítica.

La línea de reacciones químicas sin catalizador se destaca por la síntesis de adsorbentes destinados a la remoción de norfloxacin (140,9 mg/g) y naftaleno (5,66 mg/g). Dichos valores de remoción superan los reportados por materiales como los nanotubos de carbono (89 mg norfloxacin/ g) y carbón activado (1,44 mg naftaleno/g).

El análisis de las categorías de tratamiento químico identificadas, permitió establecer que, las temperaturas trabajadas estuvieron en el rango de 25 a 550°C; uso de solventes como DCE y DCM e incluso el desarrollo de múltiples etapas de síntesis, por ejemplo, nitración, reducción de grupos nitro y diazotación.

5. Recomendaciones

Adelantar estudios técnico-económicos tendientes a la viabilidad de la aplicación de la reacción de Friedel-Crafts en el tratamiento de residuos de poliestireno.

Dar continuidad al seguimiento bibliométrico de los tratamientos químicos aplicados a EPS para identificar análisis de mayor profundidad y escala.

Desarrollar investigaciones que profundicen en las reacciones de sulfonación y acetilación con el uso o no de catalizadores ya que la literatura es difusa en ese aspecto.

Referencias Bibliográficas

- Adnan, Shah, J., & Jan, M. R. (2014a). Polystyrene degradation studies using Cu supported catalysts. *JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS*, 109, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.06.013>
- Adnan, Shah, J., & Jan, M. R. (2014b). Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in the presence of zinc bulk catalysts. *JOURNAL OF THE TAIWAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS*, 45(5), 2494–2500. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.05.011>
- Antony, J. v, Kurian, P., Vadakkedathu, N. P. N., & Kochimoolayil, G. E. (2014). In Situ Synthesis of CdS Quantum Dot-Partially Sulfonated Polystyrene Composite: Characterization and Optical Properties. *INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH*, 53(6), 2261–2269. <https://doi.org/10.1021/ie402911w>
- Bartoli, M., Rosi, L., Frediani, M., Undri, A., & Frediani, P. (2015). Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through a microwave assisted pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.01.026>
- Caliendo, H. (2018). Plastics-to-oil recycler finds new niche in polystyrene. *Plastics Technology*, 64(5), 54–56. <https://www.ptonline.com/articles/plastics-to-oil-recycler-finds-new-niche-in-polystyrene>

Con ley buscarán prohibir el uso del icopor en Colombia. (2019). Retrieved October 3, 2021,

from: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/radicaran-ley-para-prohibir-elhttps://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/radicaran-ley-para-prohibir-el-icopor-en-colombia/45043/icopor-en-colombia/45043/>

Dardeer, H. M., & Toghan, A. (2021). A novel route for the synthesis of pseudopolyrotaxane containing gamma-Cyclodextrin based on environmental waste recycling. *JOURNAL OF MOLECULAR STRUCTURE*, 1227. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129707>

Dardouri, M., Amor, A. B. H., & Meganem, F. (2016). Diazabenzocrowns grafted on the polystyrene and application of extraction of metal cations. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 57(14), 6477–6486. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1007485>

de Leon-Condes, C. A., Roa-Morales, G., Martinez-Barrera, G., Balderas-Hernandez, P., Menchaca-Campos, C., & Urena-Nunez, F. (2019). A novel sulfonated waste polystyrene /iron oxide nanoparticles composite: Green synthesis, characterization and applications. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102841>

Duarte E., Gil L. (2018) Análisis del proceso de destrucción de aromáticos por medio de oxidación catalítica: aplicación en el tratamiento del poliestireno. [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].

http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=184656|%20|1|1

Friedel-crafts Reacción / Definición de Friedel-crafts Reaction por Merriam-Webster. (n.d.).

Retrieved October 7, 2021, from <https://www.merriam-webster.com/dictionary/Friedelhttps://www.merriam-webster.com/dictionary/Friedel-Crafts%20reaction>

Frediani, P., Undri, A., Rosi, L., & Frediani, M. (2014). Waste/contaminated polystyrene recycling through reverse polymerization. In *Polystyrene: Synthesis, Characteristics and Applications* (pp. 1–30). Nova Science Publishers, Inc.

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84955101252&partnerID=40&md5=2aaf9c52de14e30c4be088929ed38b36>

Fu, Z. Y., Jia, J. Z., Li, J., & Liu, C. K. (2017). Transforming waste expanded polystyrene foam into hyper-crosslinked polymers for carbon dioxide capture and separation. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 323, 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.090>

Hazrat, M. A., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2016). Study of combustion and emission characteristics of fuel derived from waste plastics by various waste to energy (W-t-E) conversion processes. *AIP Conference Proceedings*, 1754(1), 050038. <https://doi.org/10.1063/1.4958429>

Heeb, N. v, Graf, H., Bernd Schweizer, W., & Lienemann, P. (2010). Thermally-induced transformation of hexabromocyclo dodecanes and isobutoxypenta bromocyclododecanes in flame-proofed polystyrene materials. *Chemosphere*, 80(7), 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.034>

Hu, A. B., Zhang, W. J., You, Q. L., Men, B., Liao, G. Y., & Wang, D. S. (2019). A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived from waste-expanded polystyrene for highly efficient removal of organic contaminants. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 370, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.207>

Hussain, Z., Imtiaz, M., Naz, M. Y., Khan, K. M., AbdEl-Salam, N. M., & Ibrahim, K. A. (2021). Thermal and clinker-catalyzed pyrolyses of polystyrene waste using the Portland cement solid-base catalyst. *ASIA-PACIFIC JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING*, 16(1). <https://doi.org/10.1002/apj.2556>

Isomerización. (n.d.). Retrieved October 8, 2021, from <http://gustato.com/petroleo/isomerizacion.html>

Jia, J. Z., Fu, Z. Y., Wang, L., Huang, Z. A., & Liu, C. K. (2019). Conversion of waste polystyrene foam into sulfonated hyper-crosslinked polymeric adsorbents for cadmium removal in a fixed-bed column. *CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN*, 142, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.12.025>

Las 7 islas de plástico más grandes del mundo | *GQ España*. (2019). Retrieved October 3, 2021,

from <https://www.revistagq.com/noticias/articulo/7-islas-de-plastico-mas-grandeshttps://www.revistagq.com/noticias/articulo/7-islas-de-plastico-mas-grandes-del-mundodel-mundo>

Liu, C. H., Ma, X. T., Du, P. X., & Rao, Z. H. (2020). Fabrication of highly efficient thermal energy storage composite from waste polystyrenes. *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115477>

Liu, S. H., Lu, C. C., Lin, C. W., & Chang, S. H. (2021). Rapid modification of waste expanded polystyrene with H₂SO₄/trace persulfate in one pot for effective adsorption of fluoroquinolone antibiotic and its regeneration. *CHEMOSPHERE*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129529>

Li, W., Xie, Z., Xue, S., Ye, H., Liu, M., Shi, W., & Liu, Y. (2021). Studies on the adsorption of dyes, Methylene blue, Safranin T, and Malachite green onto Polystyrene foam. *Separation and Purification Technology*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119435>

Lou, C., Wu, C., Zhang, K., Guo, D., Jiang, L., Lu, Y., & Zhu, Y. (2018). Graphene-coated polystyrene-divinylbenzene dispersive solid-phase extraction coupled with supercritical fluid chromatography for the rapid determination of 10 allergenic disperse dyes in industrial wastewater samples. *Journal of Chromatography A*, 1550, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.03.040>

Machado, N. C. F., de Jesus, L. A. M., Pinto, P. S., de Paula, F. G. F., Alves, M. O., Mendes, K. H. A., Mambrini, R. v, Barrreda, D., Rocha, V., Santamaria, R., Trigueiro, J. P. C., Lavall, R. L., & Ortega, P. F. R. (2021). Waste-polystyrene foams-derived magnetic carbon material for adsorption and redox supercapacitor applications. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127903>

Merchan-Arenas, D. R., & Murcia-Patino, A. F. (2021). Synthesis of polyamino styrene from post-consumption expanded polystyrene and analysis of its CO₂ scavenger capacity. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 18(9), 2519–2532. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03009-z>

Merchan-Arenas, D. R., Murcia-Patiño, A. F., Cortés-Castillo, L. E., & Kouznetsov, V. v. (2017). Sulfonation of expanded polystyrene post consumption, structural analysis and its application in chemical enhanced oil recovery. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 631–636. <https://doi.org/10.3303/CET1757106>

Okan, M., Aydin, H. M., & Barsbay, M. (2019). Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review. *JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*, 94(1), 8–21. <https://doi.org/10.1002/jctb.5778>

Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2012). Thermo-catalytic Degradation of Thermocol Waste to Value Added Liquid Products. *ASIAN JOURNAL OF CHEMISTRY*, 24(12), 5539–5542.

Poliestireno expandido / *Textos Científicos*. (2005). Retrieved October 3, 2021, from

<https://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno-expandido>

Polímeros / *Química general*. (n.d.). Retrieved October 8,

2021, from <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>

Por qué en Colombia solo se recicla el 1% del icopor que se produce. (2019). Retrieved October

3, 2021, from [https://www.noticiasrcn.com/nacional/por-que-en-colombia-solo-se-recicla-el-1-del-](https://www.noticiasrcn.com/nacional/por-que-en-colombia-solo-se-recicla-el-1-del-icopor-que-se-produce-345671)

[icopor-que-se-produce-345671](https://www.noticiasrcn.com/nacional/por-que-en-colombia-solo-se-recicla-el-1-del-icopor-que-se-produce-345671)

[se-recicla-el-1-del-icopor-que-se-produce-345671](https://www.noticiasrcn.com/nacional/por-que-en-colombia-solo-se-recicla-el-1-del-icopor-que-se-produce-345671)

Publicaciones: PlasticsEurope. (2018). Retrieved October 3, 2021, from

[https://www.plasticseurope.org/es/resources/publications/1240-plasticos-situacion-](https://www.plasticseurope.org/es/resources/publications/1240-plasticos-situacion-en-2018)

[enhttps://www.plasticseurope.org/es/resources/publications/1240-plasticos-situacion-en-](https://www.plasticseurope.org/es/resources/publications/1240-plasticos-situacion-en-2018)

[20182018](https://www.plasticseurope.org/es/resources/publications/1240-plasticos-situacion-en-2018)

Reacción de alquilación de Friedel-Crafts. (n.d.). Retrieved October 7, 2021, from

[https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionA](https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/alkylation-reactions/friedel-crafts-alkylation.html)

[nalysis/alkylation-reactions/friedel-crafts-alkylation.html](https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/alkylation-reactions/friedel-crafts-alkylation.html)

Regulación de plásticos de un solo uso en la Unión Europea: foco no está en materialidad de los productos, sino en su impacto en la naturaleza y su capacidad de reemplazo - País

Circular. (2020). Retrieved October 3, 2021, from <https://www.paiscircular.cl/consumo-y-produccion/regulacion-de-plasticos-de-un-solo-uso-el-foco-no-esta-en-la-materialidad-de-los-productos-sino-en-su-impacto-en-la-naturaleza-y-la-posibilidad-de-reemplazarlos/>

Ren, X., Huang, Z., Wang, X. J., & Guo, G. M. (2021). Isoconversional analysis of kinetic pyrolysis of virgin polystyrene and its two real-world packaging wastes. *JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY*. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10411-9>

Rex, P., & Miranda, L. R. (2020). Catalytic activity of acid-treated biomass for the degradation of expanded polystyrene waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 438–455. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07034-5>

Ribeiro, M. S. P., Pinto, R. R. S., Rocha, K. A. D., & Vieira, C. G. (2021). Sulfonated Expanded Polystyrene Waste Promotes the (+)-Citronellal Cyclization Reaction: A Sustainable Alternative Process for Biomass Valorization. *WASTE AND BIOMASS VALORIZATION*, 12(8), 4695–4702. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01319-4>

Ruziwa, D., Chaukura, N., Gwenzi, W., & Pumure, I. (2015). Removal of Zn²⁺ and Pb²⁺ ions from aqueous solution using sulphonated waste polystyrene. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING*, 3(4), 2528–2537. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.08.006>

Selpiana, Aprianti, T., Pramayuda, D., & Ismoro, D. S. (2019). The ratio Influence of the polystyrene mixture and heating rate towards yield and pyrolysis results compound. In J. Sugardjito, L. Garniati, Y. Purwanto, Saloma, I. Maryanto, & T. Setyawati (Eds.), *2018 International Conference on Biosphere Reserve: The Role of Stakeholders in Mainstreaming Natural Resources Related to Agenda 2030 - Sustainable Development Goals* (Vol. 298, Issue 1). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755https://doi.org/10.1088/17551315/298/1/0120131315/298/1/012013>

Selpiana, Santoso, B., Suprpto, D. P., Patratama, R., & Pramayuda, D. (2019). The conversion of expanded polystyrene waste to liquid fuel using Cu-Al₂O₃ by the thermal catalytic cracking process. In R. Mohadi (Ed.), *1st Sriwijaya International Conference on Basic and Applied Sciences, SICBAS 2018* (Vol. 1282, Issue 1). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012081>

Shah, J., Jan, M. R., & Adnan. (2014). Conversion of waste polystyrene through catalytic degradation into valuable products. *KOREAN JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING*, 31(8), 1389–1398. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0016-4>

Shah, J., Jan, M. R., Adnan, & Zada, M. (2015). Effect of carbon supported metals on the tertiary recycling of waste expanded polystyrene. *PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*, 96, 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.05.004>

Siyal, A. N., Memon, S. Q., Parveen, S., Soomro, A., Khaskheli, M. I., & Khuhawar, M. Y. (2013). Chemical Recycling of Expanded Polystyrene Waste: Synthesis of Novel Functional Polystyrene-Hydrazone Surface for Phenol Removal. *JOURNAL OF CHEMISTRY*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/842435>

Sulfonación del Benceno. (n.d.). Retrieved October 7, 2021, from <https://www.quimicaorganica.org/benceno/278-sulfonacion-del-benceno.html>

Sułkowski, W. W., Nowak, K., Sułkowska, A., Mikuła, B., & Wierzba, P. (2013). The conditions of cationic exchange with the use of recycling polystyrene derivative, the product of sulfonation by silica sulfuric acid. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(5), 2611–2617. <https://doi.org/10.1002/app.38429>

Suresh, R., Antony, J. v, Vengalil, R., Kochimoolayil, G. E., & Joseph, R. (2017). Esterification of free fatty acids in non-edible oils using partially sulfonated polystyrene for biodiesel feedstock. *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*, 95, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.060>

Tabekh, H., al Kurdi, M. H., & Aji, Z. (2015). Sulphonation of expanded polystyrene waste with commercial sulphuric acid for potential use in removal of heavy metals from contaminated waters. *Polimeri*, 36(1), 11–14. [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-)
[s2.0https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-)

[84978372392&partnerID=40&md5=9cdf4c18300867fa28861357bd4c73e484978372392&partnerID=40&md5=9cdf4c18300867fa28861357bd4c73e4](https://doi.org/10.15255/KUI.2020.084)

Taiwo, O. C., Afolabi, T. J., Osuolale, F. N., Ajani, A. O., Aworanti, O. A., Ogunleye, O. R., & Alade, A. O. (2021). Recycling of Waste Expanded Polystyrene as an Effective Adsorbent of Naphthalene from Aqueous Solution. *KEMIJA U INDUSTRIJI-JOURNAL OF CHEMISTS AND CHEMICAL ENGINEERS*, 70(9–10), 519-+.

<https://doi.org/10.15255/KUI.2020.084>

Tipos de plástico según su facilidad de reciclaje. (2018). Retrieved October 3, 2021, from

<https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje> <https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje> 12714/1

Torres, I. S. M., Colin-Orozco, E., Olayo, M. G., Martinez, I. G., Pozos, M. S., Salgado, F. G., & Cruz, G. J. (2018). Carbonization, hydrogenation and oxidation in the thermal degradation of expanded polystyrene. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 53(3), 2268–2276.

<https://doi.org/10.1007/s10853-017-1649-6>

Undri, A., Frediani, M., Rosi, L., & Frediani, P. (2014). Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.001>

Universidad de Peshawar / Ranking Mundial universitario / EL. (2021). Retrieved October 3, 2021, from <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/universityhttps://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/university-peshawarpeshawar>

Universidad de Florencia: Rankings, tarifas y detalles de los cursos / Las mejores universidades. (n.d.). Retrieved October 7, 2021, from <https://www.topuniversities.com/universities/university-florence>

Uttaravalli, A. N., Dinda, S., & Gidla, B. R. (2020). Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review. *PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*, *137*, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.023>

Verma, A., Sharma, S., & Pramanik, H. (2021). Pyrolysis of waste expanded polystyrene and reduction of styrene via in-situ multiphase pyrolysis of product oil for the production of fuel range hydrocarbons. *Waste Management*, *120*, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.035>

VOSviewer - Descargar. (n.d.). Retrieved October 3, 2021, from <https://www.vosviewer.com/download>

Apéndices

Apéndice A. Etapas metodológicas y selección de documentos

Tabla 1

Datos bibliométricos

N°	Título	Autores	Año	Citaciones	Tipo de documento
1	(Micro)plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change	Shen <i>et al.</i>	2020	41	Revisión de artículos
2	2013 2nd International Symposium on Materials Science and Engineering Technology, ISMSET 2013	[No author name available]	2013	0	Conferencia
3	27th CIRP Life Cycle Engineering Conference, LCE 2020	[No author name available]	2020	0	Conferencia
4	A close relationship between microplastic contamination and coastal area use pattern	Jang <i>et al.</i>	2020	32	Artículo
5	A closed-loop process design for recycling expanded polystyrene waste by dissolution and polymerization	Mumbach <i>et al.</i>	2020	5	Artículo
6	A comprehensive assessment of microbiome diversity in <i>Tenebrio molitor</i> fed with polystyrene waste	Urbanek <i>et al.</i>	2020	12	Artículo
7	A Global Perspective on Microplastics	Hale <i>et al.</i>	2020	70	Revisión de artículos
8	A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived from waste-expanded polystyrene for highly efficient removal of organic contaminants	Hu <i>et al.</i>	2019	16	Artículo
9	A novel route for the synthesis of pseudopolyrotaxane containing gamma-Cyclodextrin based on environmental waste recycling	Dardeer <i>et al.</i>	2021	2	Artículo
10	A novel sulfonated waste polystyrene / iron oxide nanoparticles composite: Green synthesis, characterization and applications	De León-Condés <i>et al.</i>	2019	12	Artículo
11	A proxy-based approach to predict spatially resolved emissions of macro- and microplastic to the environment	Kawecki <i>et al.</i>	2020	3	Artículo
12	A rapid method for the determination of brominated flame retardant concentrations in plastics and textiles entering the waste stream	Abdallah <i>et al.</i>	2017	16	Artículo

N°	Título	Autores	Año	Citaciones	Tipo de documento
13	Abundance and distribution of large microplastics (1–5 mm) within beach sediments at the Po River Delta, northeast Italy	Piehl <i>et al.</i>	2019	21	Artículo
14	Abundance, composition, and distribution of microplastics larger than 20 Mm in sand beaches of South Korea	Eo <i>et al.</i>	2018	82	Artículo
15	Acyclic monoterpenes in tree essential oils as a shrinking agent for waste-expanded polystyrene	Shimotori <i>et al.</i>	2011	0	Artículo
16	Addition of polymeric wastes as pore formers in ceramic lightweight bricks	Quaranta <i>et al.</i>	2010	10	Artículo
17	American Filtration and Separations Society Spring Conference 2013 - 26th Annual National Conference and Exposition	[No author name available]	2013	0	Conferencia
18	An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples	Han <i>et al.</i>	2019	37	Artículo
19	An overview of hexabromocyclododecane (HBCDs) in environmental media with focus on their potential risk and management in China	Cao <i>et al.</i>	2018	33	Revista
20	Applicability of the expanded polystyrene as a soil improvement tool	Silveira <i>et al.</i>	2018	13	Artículo
21	Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review	Sulong <i>et al.</i>	2019	24	Revisión de artículos
22	Application of expanded polystyrene filter for tertiary treatment of domestic waste effluent in the UK	Fylypchuk <i>et al.</i>	2017	7	Artículo
23	Application of polymers in construction technology (part IV): Effects of EPS size on Engineering Properties of Concrete	Haghi <i>et al.</i>	2013	0	Capítulo de libro
24	Application of refrigeration and packing can extend Buti acute accent a fruit shelf life	Rockett <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
25	Assessment of Edible Fungi and Films Bio-Based Material Simulating Expanded Polystyrene	López <i>et al.</i>	2016	26	Artículo
26	Assessment of expanded polystyrene as a separator in microbial fuel cell	Mathuriya <i>et al.</i>	2019	15	Artículo
27	Assessment of the physical characteristics and stormwater effluent quality of permeable pavement systems containing recycled materials	Monrose <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
28	Behavior in simulated soil of recycled expanded polystyrene/waste cotton	Borsoi <i>et al.</i>	2014	8	Artículo

	composites				
29	Biodegradable composites of waste expanded polystyrene with modified neem oil for packaging applications	Salini <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
30	Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of <i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence	Yang <i>et al.</i>	2021	19	Artículo
31	Biodegradation of Polystyrene by Dark (<i>Tenebrio obscurus</i>) and Yellow (<i>Tenebrio molitor</i>) Mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae)	Peng <i>et al.</i>	2019	60	Artículo
32	Biohydrogen production in anaerobic fluidized bed reactors: Effect of support material and hydraulic retention time	Barros <i>et al.</i>	2010	70	Artículo
33	Biomimetic electrospun nanocomposite fibers from recycled polystyrene foams exhibiting superhydrophobicity	Uddin <i>et al.</i>	2020	10	Artículo
34	Boring crustaceans damage polystyrene floats under docks polluting marine waters with microplastic	Davidson <i>et al.</i>	2012	46	Artículo
35	Brominated flame retardants in Irish waste polymers: Concentrations, legislative compliance, and treatment options	Drage <i>et al.</i>	2018	19	Artículo
36	Carbonization, hydrogenation and oxidation in the thermal degradation of expanded polystyrene	Mejia <i>et al.</i>	2018	4	Artículo
37	Catalytic activity of acid-treated biomass for the degradation of expanded polystyrene waste	Rex <i>et al.</i>	2020	3	Artículo
38	Characterisation of “flushable” and “non-flushable” commercial wet wipes using microRaman, FTIR spectroscopy and fluorescence microscopy: to flush or not to flush	Pantoja <i>et al.</i>	2018	18	Artículo
39	Characteristics of microplastics on two beaches affected by different land uses in Salamina Island in Saronikos Gulf, east Mediterranean	Tziourrou <i>et al.</i>	2019	4	Artículo
40	Characterization of a lightweight concrete with corn cob aggregates	Helepciuc <i>et al.</i>	2017	1	Conferencia
41	Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour	Poletto <i>et al.</i>	2011	69	Artículo
42	Characterization of corn cob as a possible raw building material	Pinto <i>et al.</i>	2012	73	Artículo

N°	Título	Autores	Año	Citaciones	Tipo de documento
43	Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations	Maaroufi <i>et al.</i>	2018	10	Artículo
44	Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes	Masri <i>et al.</i>	2018	31	Artículo
45	Characterization of PBDD/F emissions from simulated polystyrene insulation foam via lab-scale programmed thermal treatment testing	Wang <i>et al.</i>	2018	4	Artículo
46	Chemical recycling of expanded polystyrene waste: Synthesis of novel functional polystyrene-hydrazone surface for phenol removal	Siyal <i>et al.</i>	2013	8	Artículo
47	Chemical recycling of polystyrene wastes: An inherently green fire-retardant poly(vinyl benzoxazine) from expanded polystyrene waste	Wang <i>et al.</i>	2018	0	Resumen de reunión
48	Chemotaxis-selective colonization of mangrove rhizosphere microbes on nine different microplastics	Xie <i>et al.</i>	2021	5	Artículo
49	Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters	Karlsson <i>et al.</i>	2020	23	Artículo
50	Comparisons of microplastic pollution between mudflats and sandy beaches in Hong Kong	Lo <i>et al.</i>	2018	69	Artículo
51	Composition on the basis of fluorineanhydrite and expanded polystyrene for the thermal protection	Aleksandr <i>et al.</i>	2014	0	Conferencia
52	Conversion of expanded polystyrene waste to nanoparticles via nanoprecipitation	Rajeev <i>et al.</i>	2016	9	Artículo
53	Conversion of waste polystyrene foam into sulfonated hyper-crosslinked polymeric adsorbents for cadmium removal in a fixed-bed column	Jia <i>et al.</i>	2019	6	Artículo
54	Conversion of waste polystyrene through catalytic degradation into valuable products	Shah <i>et al.</i>	2014	21	Artículo
55	Crystal structure of δ -isobutoxypentabromocyclododecanes, kinetics and selectivity of their isomerization during thermal treatment of flame-proofed polystyrenes	Heeb <i>et al.</i>	2011	6	Artículo
56	Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review	Okan <i>et al.</i>	2019	48	Revisión de artículos

N°	Título	Autores	Año	Citaciones	Tipo de documento
57	Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through a microwave assisted pyrolysis	Bartoli <i>et al.</i>	2015	39	Artículo
58	Determination of microplastic content in seafood: An integrated approach combined with the determination of elemental contaminants	Bitencourt <i>et al.</i>	2020	0	Artículo
59	Development of waste expanded polystyrene flexible coating material in concrete waterproofing	Hsu <i>et al.</i>	2019	1	Conferencia
60	Diazabenzocrowns grafted on the polystyrene and application of extraction of metal cations	Dardouri <i>et al.</i>	2016	3	Artículo
61	Dissolution of polystyrene into cyclic monoterpenes present in tree essential oils	Shikata <i>et al.</i>	2011	8	Artículo
62	Distribution center and retail conditions affect the sensory and compositional quality of bulk and packaged slicing cucumbers	Nunes <i>et al.</i>	2011	4	Artículo
63	Durability of a lightweight construction material made with dune sand and expanded polystyrene	Laoubi <i>et al.</i>	2019	3	Artículo
64	Durability of Hydrophobic/Icephobic Coatings in Protection of Lightweight Concrete with Waste Aggregate	Barnat-Hunek <i>et al.</i>	2021	6	Artículo
65	Ecological solar absorber coating: A proposal for the use of residual biomass and recycled materials for energy conversion	Lopez-Sosa <i>et al.</i>	2020	5	Revisión de artículos
66	Effect of carbon supported metals on the tertiary recycling of waste expanded polystyrene	Shah <i>et al.</i>	2015	1	Artículo
67	Effect of expanded polystyrene waste in the creation of waterproofing paint	Bellon <i>et al.</i>	2019	1	Conferencia
68	Effects of Particle Properties on the Settling and Rise Velocities of Microplastics in Freshwater under Laboratory Conditions	Waldschläger <i>et al.</i>	2019	65	Artículo
69	Effects of silylated starch structure on hydrophobization and mechanical properties of thermoplastic starch foams made from potato starch	Bergel <i>et al.</i>	2020	7	Artículo
70	Efficiency of millicomposts obtained from different vegetable residues and production systems in the development of lettuce seedlings	de Sousa Antunes <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
71	Electrochemical and mechanical properties	Maldonado <i>et al.</i>	2015	3	Artículo

	of lightweight concrete blocks with expanded polystyrene foam				
72	Emerging investigator series: inhibition and recovery of anaerobic granular sludge performance in response to short-term polystyrene nanoparticle exposure	Feng, Yue <i>et al.</i>	2018	11	Artículo
73	Energy planning for aquaponics production considering intraday markets	Garcia-Guarin <i>et al.</i>	2020	1	Artículo
74	Enrichment of hexabromocyclododecanes in coastal sediments near aquaculture areas and a wastewater treatment plant in a semi-enclosed bay in South Korea	Al-Odaini <i>et al.</i>	2015	47	Artículo
75	Environmental fate, ecotoxicity biomarkers, and potential health effects of micro- and nano-scale plastic contamination	Rai <i>et al.</i>	2021	14	Artículo
76	Environmental profile of a bio-based and biodegradable foamed packaging prototype in comparison with the current benchmark	Razza <i>et al.</i>	2015	43	Artículo
77	Esterification of free fatty acids in non-edible oils using partially sulfonated polystyrene for biodiesel feedstock	Suresh <i>et al.</i>	2017	19	Artículo
78	Evaluation of millicomposts from different vegetable residues and production systems in the lettuce seedling development	de Sousa Antunes <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
79	Evaluation of Shear Strength Properties of Modified Expanded Polystyrene Aggregate	Canakci <i>et al.</i>	2016	6	Conferencia
80	Expanded Polystyrene (EPS) and Waste Cooking Oil (WCO): From Urban Wastes to Potential Material of Construction	Sarmiento <i>et al.</i>	2016	11	Artículo
81	Expanded Polystyrene Life Cycle Analysis Literature Review: An Analysis for Different Disposal Scenarios	Marten <i>et al.</i>	2018	3	Revista
82	Expanded polystyrene waste application for improving biodiesel environmental performance parameters from life cycle assessment point of view	Rajaeifar <i>et al.</i>	2017	24	Revisión de artículos
83	Expanded polystyrene: Thermo-mechanical recycling, characterization and application	Poletto <i>et al.</i>	2014	1	Capítulo de libro
84	Experimental Investigation on Lightweight Concrete Using EPS Beads and Metakaolin	Gopika <i>et al.</i>	2020	0	Capítulo de libro
85	Fabrication of highly efficient thermal energy storage composite from waste polystyrenes	Liu <i>et al.</i>	2020	6	Artículo
86	Feasibility of using straw in a strong, thin, pulp moulded packaging material	Curling <i>et al.</i>	2017	17	Artículo
87	Field efficacy of expanded polystyrene and shredded waste polystyrene beads for	Soltani <i>et al.</i>	2012	13	Artículo

	mosquito control in artificial pools and field trials, islamic republic of Iran [Efficacité sur le terrain des billes de polystyrène expansé et de copeaux de polystyrène recyclé pour la lutte contre les moustiques dans des bassins artificiels et des essais sur le terrain en république islamique D'Iran]				
88	Foamed Polystyrene in the Marine Environment: Sources, Additives, Transport, Behavior, and Impacts	Turner <i>et al.</i>	2020	4	Revisión de artículos
89	Formation of microplastics by polychaetes (<i>Marphysa sanguinea</i>) inhabiting expanded polystyrene marine debris	Jang <i>et al.</i>	2018	27	Artículo
90	Free vibration characteristics of flax fiber/expanded polystyrene waste composite	Mohammed <i>et al.</i>	2021	0	Conferencia
91	Fungal Future: A review of mycelium biocomposites as an ecological alternative insulation material	Robertson <i>et al.</i>	2020	1	Conferencia
92	Geotechnical utilization of sand with waste expanded polystyrene	Yasufuku <i>et al.</i>	2018	0	Conferencia
93	Graphene-coated polystyrene-divinylbenzene dispersive solid-phase extraction coupled with supercritical fluid chromatography for the rapid determination of 10 allergenic disperse dyes in industrial wastewater samples	Lou <i>et al.</i>	2018	20	Artículo
94	Green Recycling Approach To Obtain Nano- and Microparticles from Expanded Polystyrene Waste	Mangalara <i>et al.</i>	2016	20	Artículo
95	Heterogeneous composition of anthropogenic litter recorded in nests of Yellow-legged gull (<i>Larus michahellis</i>) from a small Mediterranean island	Battisti <i>et al.</i>	2020	9	Artículo
96	Hexabromocyclododecanes (HBCDDs) in surface soils from coastal cities in North China: Correlation between diastereoisomer profiles and industrial activities	Zhang <i>et al.</i>	2016	20	Artículo
97	Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution	Fok <i>et al.</i>	2015	180	Artículo
98	Iced block method: An efficient method for preparation of micro-sized expanded polystyrene foams	Kwak <i>et al.</i>	2020	0	Artículo
99	Immobilization of sulfate waste simulate in polymer-cement composite based on recycled expanded polystyrene foam waste: Evaluation of the final waste form under freeze-thaw treatment	Bayoumi <i>et al.</i>	2017	6	Artículo

N°	Título	Autores	Año	Citaciones	Tipo de documento
100	Immobilized Enzyme on Modified Polystyrene Foam Waste: a Biocatalyst for Wastewater Decolorization	Yassin <i>et al.</i>	2020	2	Artículo
101	Improve effectivity of microbead biofilter by media motion	Che <i>et al.</i>	2013	1	Artículo
102	In Situ Synthesis of CdS Quantum Dot-Partially Sulfonated Polystyrene Composite: Characterization and Optical Properties	Antony <i>et al.</i>	2014	10	Artículo
103	Influence of chemical polymer additive on the physical and mechanical properties of expanded polystyrene concrete	Wasiu <i>et al.</i>	2020	0	Artículo
104	INFLUENCE OF DIFFERENT LOADS ON THE PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE	Kligys <i>et al.</i>	2012	0	Artículo
105	Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures	Bar-Tal <i>et al.</i>	2019	10	Capítulo de libro
106	Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as concrete aggregate	Bicer <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
107	Isoconversional analysis of kinetic pyrolysis of virgin polystyrene and its two real-world packaging wastes	Ren <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
108	Isolation and identification of polystyrene biodegrading bacteria from soil	Atiq <i>et al.</i>	2010	28	Artículo
109	LCA application in the assessment of new technologies of industrial effluents treatment	Bajdur <i>et al.</i>	2016	8	Artículo
110	Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste	Castillo <i>et al.</i>	2020	6	Artículo
111	Massive plastic pollution in a mega-river of a developing country: Sediment deposition and ingestion by fish (<i>Prochilodus lineatus</i>)	Blettler <i>et al.</i>	2019	39	Artículo
112	Mastication of polyolefins alters the microbial composition in <i>Galleria mellonella</i>	Peydaei <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
113	Micro-layers of polystyrene film preventing metal oxidation: implications in cultural heritage conservation	Giambi <i>et al.</i>	2014	1	Artículo
114	Microplastic pollution on the Persian Gulf shoreline: A case study of Bandar Abbas city, Hormozgan Province, Iran	Nabizadeh <i>et al.</i>	2019	20	Artículo
115	Microplastics in composting of rural domestic waste: abundance, characteristics, and release from the surface of macroplastics	Gui <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
116	Microstructural examination and potential application of rendering mortars made of tire rubber and expanded polystyrene wastes	Lanzón <i>et al.</i>	2015	22	Artículo

N°	Título	Autores	Año	Citaciones	Tipo de documento
117	Millicomposting: Composting based on the use of diplopods aiming at the production of organic substrates [Gongocompostagem: A compostagem baseada na utilização de diplópodes visando a produção de substratos orgânicos]	de Sousa Antunes <i>et al.</i>	2020	0	Artículo
118	Mobilisation kinetics of hazardous elements in marine plastics subject to an avian physiologically-based extraction test	Turner <i>et al.</i>	2018	22	Artículo
119	MODIFICATION OF LOW-MOLECULAR COPOLYMER FROM BY-PRODUCTS OF BUTADIENE RUBBER BY SECONDARY EXPANDED POLYSTYRENE	Nikulina <i>et al.</i>	2019	1	Artículo
120	Municipal wastewater treatment by biofiltration: Comparisons of various treatment layouts. Part 1: Assessment of carbon and nitrogen removal	Rocher <i>et al.</i>	2012	27	Artículo
121	Mussel shells: A canning industry by-product converted into a bio-based insulation material	Martinez-Garcia <i>et al.</i>	2020	1	Artículo
122	Novel coupling agent between expanded polystyrene waste and natural fabrics	Tawfic <i>et al.</i>	2014	1	Artículo
123	Performance Assessment of a Composite Material Based on Kraft Paper and a Resin Formulated with Expanded Polystyrene Waste: A Case Study from Mexico	Jimenez <i>et al.</i>	2018	5	Artículo
124	Performance of cement-slag-titanate nanofibers composite immobilized radioactive waste solution through frost and flooding events	Saleh <i>et al.</i>	2019	13	Artículo
125	Photosynthesis enhancement in four marine microalgal species exposed to expanded polystyrene leachate	Chae <i>et al.</i>	2020	9	Artículo
126	Physical, chemical and mechanical characterization of a prototype insulating material based on eucalyptus bark fiber	Rojas Herrera <i>et al.</i>	2018	1	Artículo
127	Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review	Girometta <i>et al.</i>	2019	27	Revisión de artículos
128	Plastic in surface waters of the Inside Passage and beaches of the Salish Sea in Washington State	Davis <i>et al.</i>	2015	32	Artículo
129	Plastic pollution in freshwater ecosystems: macro-, meso-, and microplastic debris in a floodplain lake	Blettler <i>et al.</i>	2017	85	Artículo

130	Plastics-to-oil recycler finds new niche in polystyrene	Caliendo <i>et al.</i>	2018	0	Artículo
131	Polymer-Specific Modeling of the Environmental Emissions of Seven Commodity Plastics As Macro- and Microplastics	Kawecki <i>et al.</i>	2019	41	Artículo
132	Polystyrene degradation studies using Cu supported catalysts	Adnan <i>et al.</i>	2014	39	Artículo
133	Polystyrene foam as a source and sink of chemicals in the marine environment: An XRF study	Turner <i>et al.</i>	2021	3	Artículo
134	Properties and characterization of wood plastic composites made from agro-waste materials and post-used expanded polyester foam	Pao <i>et al.</i>	2019	5	Artículo
135	Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin	Kaya <i>et al.</i>	2016	70	Artículo
136	Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant	Chindaprasirt <i>et al.</i>	2015	33	Artículo
137	Pyrolysis of waste expanded polystyrene and reduction of styrene via in-situ multiphase pyrolysis of product oil for the production of fuel range hydrocarbons	Verma <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
138	Quality values of a blend of expanded polystyrene dissolved in biodiesel for potential use as an alternative fuel	Vera <i>et al.</i>	2017	2	Artículo
139	Rapid identification of polystyrene foam wastes containing hexabromocyclododecane or its alternative polymeric brominated flame retardant by X-ray fluorescence spectroscopy	Schlummer <i>et al.</i>	2015	14	Artículo
140	Rapid modification of waste expanded polystyrene with H ₂ SO ₄ /trace persulfate in one pot for effective adsorption of fluoroquinolone antibiotic and its regeneration	Liu <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
141	Recovery and Incorporation of expanded polystyrene Solid Waste in Lightweight Concrete	Espinoza-Merchán <i>et al.</i>	2020	0	Artículo
142	Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents	da Silva <i>et al.</i>	2021	5	Artículo
143	Recycling of Waste Expanded Polystyrene as an Effective Adsorbent of Naphthalene from Aqueous Solution	Taiwo <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
144	Relationship between scouring efficiency	Wang <i>et al.</i>	2018	7	Artículo

	and overall concentration of fluidized granular activated carbon (GAC) in microfiltration				
145	Relative importance of aqueous leachate versus particle ingestion as uptake routes for microplastic additives (hexabromocyclododecane) to mussels	Jang <i>et al.</i>	2021	5	Artículo
146	Releasing of hexabromocyclododecanes from expanded polystyrenes in seawater - field and laboratory experiments	Rani <i>et al.</i>	2017	22	Artículo
147	Removal of suspended matter and salts on ultrafiltration cellulose acetate/ expanded polystyrene waste grafted peg composite membrane	Fathy <i>et al.</i>	2020	1	Artículo
148	Removal of Zn ²⁺ and Pb ²⁺ ions from aqueous solution using sulphonated waste polystyrene	Ruziwa <i>et al.</i>	2015	26	Artículo
149	Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis	Undri <i>et al.</i>	2014	60	Artículo
150	Review on the Research Progress of EPS Concrete	Zhang <i>et al.</i>	2019	1	Revista
151	Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review	Uttaravalli <i>et al.</i>	2020	8	Revisión de artículos
152	Simple preparation method for Styrofoam-TiO ₂ composites and their photocatalytic application for dye oxidation and Cr(vi) reduction in industrial wastewater	Lee <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
153	Some technological properties of wood-styrofoam composite panels	Demirkir <i>et al.</i>	2013	13	Artículo
154	Spatial distribution of microplastic in the surface waters along the coast of Korea	Kwon <i>et al.</i>	2020	12	Artículo
155	Structural packaging foams prepared by unidirectional freezing of paper sludge cellulose nanofibres and poly (vinyl alcohol)	Adu <i>et al.</i>	2019	1	Artículo
156	Studies on development of adhesive material from post-consumer (waste) expanded polystyrene: a two-edged sword approach	Uttaravalli <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
157	Studies on the adsorption of dyes, Methylene blue, Safranin T, and Malachite green onto Polystyrene foam	Li <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
158	Study of combustion and emission characteristics of fuel derived from waste plastics by various waste to energy (W-t-E) conversion processes	Hazrat <i>et al.</i>	2016	1	Conferencia
159	Study of the Mechanical and Physical	Vidales-Barriguete <i>et</i>	2021	1	Artículo

	Behavior of Gypsum Boards with Plastic Cable Waste Aggregates and Their Application to Construction Panels	<i>al.</i>			
160	Study on impact absorbency of soil mixed with crushed EPS waste - Relation to the deformation characteristics of soil	Kimata <i>et al.</i>	2012	1	Conferencia
161	Styrofoam Debris as a Source of Hazardous Additives for Marine Organisms	Jang <i>et al.</i>	2016	93	Artículo
162	Sulfonated Expanded Polystyrene Waste Promotes the (+)-Citronellal Cyclization Reaction: A Sustainable Alternative Process for Biomass Valorization	Ribeiro <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
163	Sulfonation of expanded polystyrene post consumption, structural analysis and its application in chemical enhanced oil recovery	Merchan-Arenas <i>et al.</i>	2017	4	Artículo
164	Sulphonation of expanded polystyrene waste with commercial sulphuric acid for potential use in removal of heavy metals from contaminated waters	Tabekh <i>et al.</i>	2015	3	Artículo
165	Sustainable approach to recycle waste polystyrene to high-value submicron fibers using solution blow spinning and application towards oil-water separation	Sow <i>et al.</i>	2020	13	Artículo
166	Sustainable Concrete with Substitute Materials: A Review	Pahil <i>et al.</i>	2021	0	Conferencia
167	Synthesis of polyamino styrene from post-consumption expanded polystyrene and analysis of its CO ₂ scavenger capacity	Merchan-Arenas <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
168	The conditions of cationic exchange with the use of recycling polystyrene derivative, the product of sulfonation by silica sulfuric acid	Sułkowski <i>et al.</i>	2013	2	Artículo
169	The conversion of expanded polystyrene waste to liquid fuel using Cu-Al ₂ O ₃ by the thermal catalytic cracking process	Selpiana <i>et al.</i>	2019	1	Conferencia
170	The impact of expanded polystyrene waste of different fineness on the properties of lightweight composite	Leonavičius <i>et al.</i>	2019	0	Conferencia
171	The influence of recycled expanded polystyrene (EPS) on concrete properties: Influence on flexural strength, water absorption and shrinkage	Elsalah <i>et al.</i>	2013	3	Conferencia
172	The ratio Influence of the polystyrene mixture and heating rate towards yield and pyrolysis results compound	Selpiana <i>et al.</i>	2019	1	Conferencia
173	The synergetic interaction of chemical admixtures on the properties of eco-friendly	Pundiene <i>et al.</i>	2020	2	Artículo

	lightweight concrete from industrial technogenic waste				
174	Thermal and clinker-catalyzed pyrolyses of polystyrene waste using the Portland cement solid-base catalyst	Hussain <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
175	Thermally-induced transformation of hexabromocyclo dodecanes and isobutoxypenta bromocyclododecanes in flame-proofed polystyrene materials	Heeb <i>et al.</i>	2010	56	Artículo
176	Thermo-catalytic Degradation of Thermocol Waste to Value Added Liquid Products	Panda <i>et al.</i>	2012	11	Artículo
177	Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in the presence of zinc bulk catalysts	Adnan <i>et al.</i>	2014	27	Artículo
178	Towards the Use of Waste Expanded Polystyrene as Potential Modifier for Flexible Road Pavements	Nciri <i>et al.</i>	2020	0	Conferencia
179	Transforming waste expanded polystyrene foam into hyper-crosslinked polymers for carbon dioxide capture and separation	Fu <i>et al.</i>	2017	37	Artículo
180	Two simple washing procedures allow the extraction of positively buoyant microplastics (>500 µm) from beach wrack	Dittmann <i>et al.</i>	2020	0	Artículo
181	Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy	de Oliveira <i>et al.</i>	2019	20	Artículo
182	Use of alternative materials in the production of tomato seedlings under foliar fertilisation [Aproveitamento de materiais alternativos na produção de mudas de tomateiro sob adubação foliar]	da Silva Júnior <i>et al.</i>	2014	10	Artículo
183	Use of expanded polystyrene waste for production of bitumen-polymer sealing compositions	Gurdzinska <i>et al.</i>	2016	1	Artículo
184	Use of expanded polystyrene wastes for production of lightweight mortar mixes	Fahmy <i>et al.</i>	2011	0	Conferencia
185	Use of expanded polystyrene wastes in developing hollow block masonry units	Ali <i>et al.</i>	2020	3	Artículo
186	Use of recycled plastics in concrete: A critical review	Gu <i>et al.</i>	2016	188	Revisión de artículos
187	UTILIZATION OF EXPANDED POLYSTYRENE WASTE IN THE COMPOSITIONS WITH SECONDARY PETROLEUM BITUMENS	Gurdzinska <i>et al.</i>	2010	2	Artículo
188	Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica-filled natural rubber	Sekharan <i>et al.</i>	2012	16	Artículo
189	Waste management of deconstructed External Thermal Insulation Composite	Heller <i>et al.</i>	2020	1	Artículo

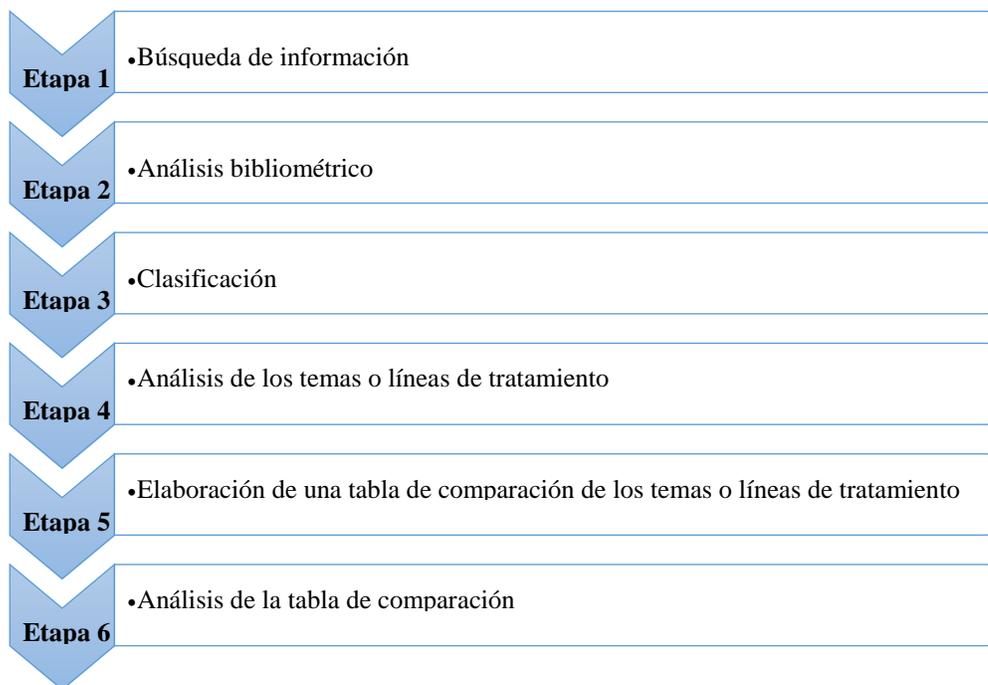
	Systems with expanded polystyrene in the future				
190	Waste/contaminated polystyrene recycling through reverse polymerization	Frediani <i>et al.</i>	2014	4	Capítulo de libro
191	Waste-polystyrene foams-derived magnetic carbon material for adsorption and redox supercapacitor applications	Machado <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
192	Water vapour permeability of innovative building materials from different waste	Buratti <i>et al.</i>	2020	4	Artículo
193	Widespread detection of a brominated flame retardant, hexabromocyclododecane, in expanded polystyrene marine debris and microplastics from South Korea and the Asia-Pacific coastal region	Jang <i>et al.</i>	2017	68	Artículo

Tabla 2
Datos bibliométricos

Tipo de documento	Scopus	Web of science	Documentos compartidos
Artículos	61	30	63
Conferencias	20		
Capítulos de libro	5		
Revistas	3		
Revisiones de artículos		6	
Resumen de reunión		1	
Total	89	37	67

Figura 1

Etapas metodológicas seguidas

**Figura 2**

Palabras claves correspondientes a los 42 documentos seleccionados

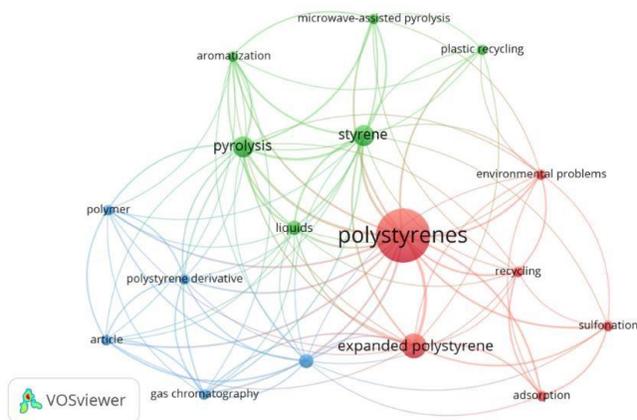
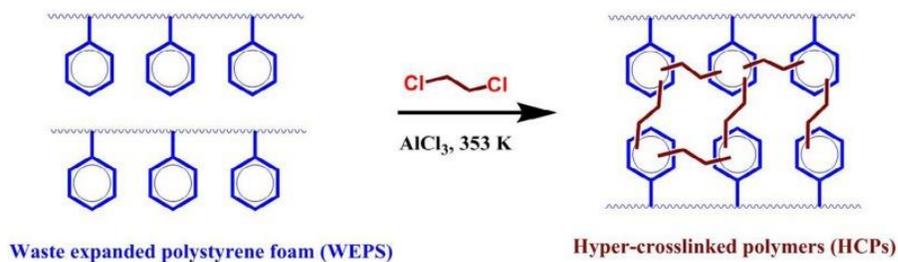


Tabla 3.
Temas o líneas de desarrollo con indicadores bibliométricos.

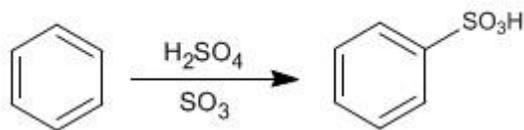
Indicador	Tratamiento con catalizadores	Pirólisis	Reacciones químicas sin catalizadores	Revisiones
Documentos analizados por categoría	12	15	13	2
Autores con más citas	Adnan; Shah, Jasmin; Jan, Muhammad Rasul (39)	Andrea Undri, Marco Frediani, Luca Rosi, Piero Frediani (60)	Heeb N.V., Graf H., Bernd Schweizer W., Lienemann P. (56)	Okan, Meltem; Aydin, Halil Murat; Barsbay, Murat (48)
Áreas temáticas	Química analítica Química Física Combustibles energéticos Ingeniería química	Química Energía	Química Ciencia medioambiental	Biotecnología aplicada Química multidisciplinar Ingeniería química Ingeniería ambiental
Instituciones	Universidad técnica de Estambul Universidad de Peshawar	Universidad de Florencia	Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich Winterthur Empa - Laboratorios Federales Suizos de Ciencia y Tecnología de Materiales Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH)	Universidad Hacettepe
Países	Pakistán	Italia	Suecia Suiza	Turquía

Apéndice B. Ilustraciones de las reacciones químicas analizadas**Figura 2**

Reacción de Friedel – Crafts



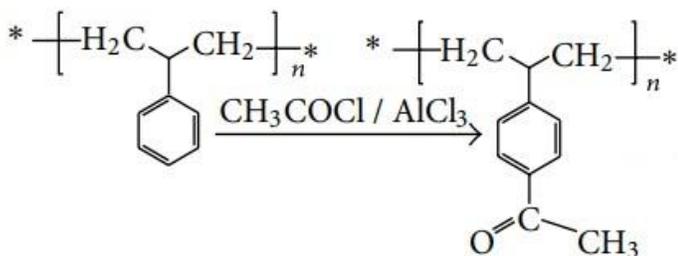
Nota: esquema representativo de la reacción de hiper reticulación del WEPS. Tomado de Fu *et al.*, 2017

Figura 3*Sulfonación del benceno*

Nota: esquema representativo de la reacción de sulfonación del benceno. Tomado de Sulfonación Del Benceno, n.d.)

Figura 4.

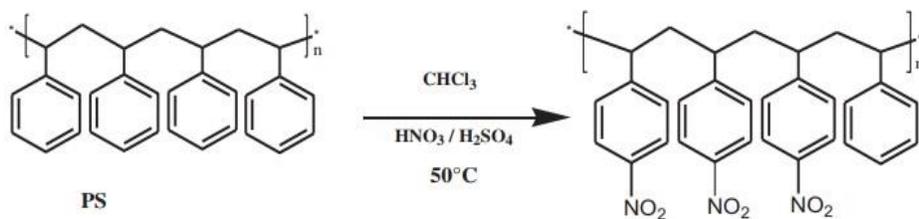
Reacción de acetilación de poliestireno



Nota: esquema representativo de la reacción de acetilación del poliestireno. Adaptado de Siyal *et al.* (2013)

Figura 5

Nitración del poliestireno



Nota: esquema representativo de la reacción de nitración del poliestireno. Adaptado de Dardouri *et al.* (2016)

Figura 6

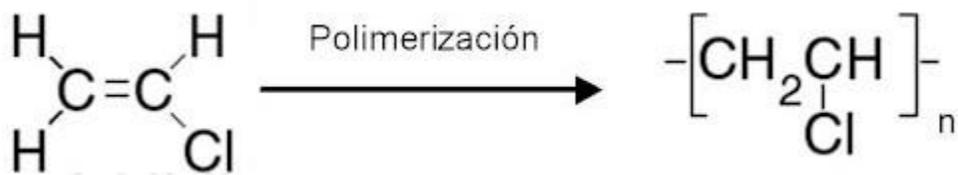
Isomerización pentano



Nota: esquema representativo de la reacción de isomerización del pentano. Tomado de (Isomerización,n.d.)

Figura 7

Polimerización cloruro de vinilo



Nota: esquema representativo de la reacción de polimerización del cloruro de vinilo. Tomado de Polímeros| Química General, n.d.)

Apéndice C. Artículos más citados en Scopus y Web of Science**Tabla 1***Artículos más citados*

N°	Título	Autores	N° de citaciones
1	Use of recycled plastics in concrete: A critical review	Gu, Lei; Ozbakkaloglu, Togay	188
2	Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution	Fok L., Cheung P.K.	180
3	Styrofoam Debris as a Source of Hazardous Additives for Marine Organisms	Jang M., Shim W.J., Han G.M., Rani M., Song Y.K., Hong S.H.	93
4	Plastic pollution in freshwater ecosystems: macro-, meso-, and microplastic debris in a floodplain lake	Blettler M.C.M., Ulla M.A., Rabuffetti A.P., Garelo N.	85
5	Abundance, composition, and distribution of microplastics larger than 20 Mm in sand beaches of South Korea	Eo S., Hong S.H., Song Y.K., Lee J., Lee J., Shim W.J.	82
6	Characterization of corn cob as a possible raw building material	Pinto, Jorge; Cruz, Daniel; Paiva, Anabela; Pereira, Sandra; Tavares, Pedro; Fernandes, Lisete; Varum, Humberto	73
7	A Global Perspective on Microplastics	Hale, Robert C.; Seeley, Meredith E.; La Guardia,	70

		Mark J.; Mai, Lei; Zeng, Eddy Y.	
8	Biohydrogen production in anaerobic fluidized bed reactors: Effect of support material and hydraulic retention time	Barros, Aruana Rocha; Cavalcante de Amorim, Eduardo Lucena; Reis, Cristiane Marques; Shida, Gessia Momoe; Silva, Edson Luiz	70
9	Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin	Kaya A., Kar F.	70
10	Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour	Poletto M., Dettenborn J., Zeni M., Zattera A.J.	69

Tabla 1

Artículos finales analizados

Nº	Título	Autores	Año de publicación	Total, citas	Tipo de archivo
1	Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis	Undri <i>et al.</i>	2014	60	Artículo
2	Thermally-induced transformation of hexabromocyclo dodecanes and isobutoxypenta bromocyclododecanes in flame-proofed polystyrene materials	Heeb <i>et al.</i>	2010	56	Artículo

N°	Título	Autores	Año de publicación	Total, citas	Tipo de archivo
3	Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review	Okan <i>et al.</i>	2019	48	Revisión
4	Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through a microwave assisted pyrolysis	Bartoli <i>et al.</i>	2015	39	Artículo
5	Polystyrene degradation studies using Cu supported catalysts	Adnan <i>et al.</i>	2014	39	Artículo
6	Transforming waste expanded polystyrene foam into hypercrosslinked polymers for carbon dioxide capture and separation	Fu <i>et al.</i>	2017	33	Artículo
7	Removal of Zn ²⁺ and Pb ²⁺ ions from aqueous solution using sulphonated waste polystyrene	Ruziwa <i>et al.</i>	2015	24	Artículo
8	Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in the presence of zinc bulk catalysts	Adnan <i>et al.</i>	2014	23	Artículo
9	Conversion of waste polystyrene through catalytic degradation into valuable products	Shah <i>et al.</i>	2014	21	Artículo
10	Graphene-coated polystyrene-divinylbenzene dispersive solid-phase extraction coupled with supercritical fluid chromatography for the rapid determination of 10 allergenic dyes in industrial wastewater samples	Lou <i>et al.</i>	2018	20	Artículo
11	Esterification of free fatty acids in non-edible oils using partially sulfonated polystyrene for biodiesel feedstock	Suresh <i>et al.</i>	2017	19	Artículo
12	A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived	Hu <i>et al.</i>	2019	16	Artículo

	from waste-expanded polystyrene for highly efficient removal of organic contaminants				
13	A novel sulfonated waste polystyrene / iron oxide nanoparticles composite: Green synthesis, characterization and applications	De Leon Condes <i>et al.</i>	2019	11	Artículo
14	Thermo-catalytic Degradation of Thermocol Waste to Value Added Liquid Products	Panda <i>et al.</i>	2012	11	Artículo
15	In Situ Synthesis of CdS Quantum Dot-Partially Sulfonated Polystyrene Composite: Characterization and Optical Properties	Antony <i>et al.</i>	2014	10	Artículo
16	Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review	Uttaravalli <i>et al.</i>	2020	8	Revisión
17	Fabrication of highly efficient thermal energy storage composite from waste polystyrenes	Liu <i>et al.</i>	2020	6	Artículo
18	Conversion of waste polystyrene foam into sulfonated hyper-crosslinked polymeric adsorbents for cadmium removal in a fixed-bed column	Jia <i>et al.</i>	2019	6	Artículo
19	Carbonization, hydrogenation and oxidation in the thermal degradation of expanded polystyrene	Torres <i>et al.</i>	2018	4	Artículo
20	Sulfonation of expanded polystyrene post consumption, structural analysis and its application in chemical enhanced oil recovery	Merchán Arenas <i>et al.</i>	2017	4	Artículo
21	Waste/contaminated polystyrene recycling through reverse	Frediani <i>et al.</i>	2014	4	Capítulo de libro

	polymerization				
22	Chemical Recycling of Expanded Polystyrene Waste: Synthesis of Novel Functional Polystyrene-Hydrazone Surface for Phenol Removal	Siyal <i>et al.</i>	2013	4	Artículo
23	Catalytic activity of acid-treated biomass for the degradation of expanded polystyrene waste	Rex <i>et al.</i>	2020	3	Artículo
24	Diazabenzocrowns grafted on the polystyrene and application of extraction of metal cations	Dardouri <i>et al.</i>	2016	3	Artículo
25	Sulphonation of expanded polystyrene waste with commercial sulphuric acid for potential use in removal of heavy metals from contaminated waters	Tabekh <i>et al.</i>	2015	3	Artículo
26	A novel route for the synthesis of pseudopolyrotaxane containing gamma-Cyclodextrin based on environmental waste recycling	Dardeer <i>et al.</i>	2021	2	Artículo
27	The conditions of cationic exchange with the use of recycling polystyrene derivative, the product of sulfonation by silica sulfuric acid	Sułkowski <i>et al.</i>	2013	2	Artículo
28	Thermal and clinker-catalyzed pyrolyses of polystyrene waste using the Portland cement solid-base catalyst	Hussain <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
29	Pyrolysis of waste expanded polystyrene and reduction of styrene via in-situ multiphase pyrolysis of product oil for the production of fuel range hydrocarbons	Verma <i>et al.</i>	2021	1	Artículo
30	Sulfonated Expanded Polystyrene Waste Promotes the (+) Citronellal Cyclization Reaction:	Palhares <i>et al.</i>	2021	1	Artículo

A Sustainable Alternative Process
for Biomass Valorization

31	The ratio Influence of the polystyrene mixture and heating rate towards yield and pyrolysis results compound	Selpiana <i>et al.</i>	2019	1	Documento conferencia
32	The conversion of expanded polystyrene waste to liquid fuel using Cu-Al ₂ O ₃ by the thermal catalytic cracking process	Selpiana, S <i>et al.</i>	2019	1	Documento conferencia
33	Study of combustion and emission characteristics of fuel derived from waste plastics by various waste to energy (W-tE) conversion processes	Hazrat <i>et al.</i>	2016	1	Documento conferencia
34	Effect of carbon supported metals on the tertiary recycling of waste expanded polystyrene	Shah <i>et al.</i>	2015	1	Artículo
35	Expanded polystyrene: Thermo-mechanical recycling, characterization and application	Poletto <i>et al.</i>	2014	1	Capítulo de libro
36	Studies on the adsorption of dyes, Methylene blue, Safranin T, and Malachite green onto Polystyrene foam	Li <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
37	Isoconversional analysis of kinetic pyrolysis of virgin polystyrene and its two real-world packaging wastes	Ren <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
38	Waste-polystyrene foams-derived magnetic carbon material for adsorption and redox supercapacitor applications	Machado <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
39	Rapid modification of waste expanded polystyrene with H ₂ SO ₄ /trace persulfate in one pot for effective adsorption of fluoroquinolone antibiotic and its regeneration	Liu <i>et al.</i>	2021	0	Artículo

40	Recycling of Waste Expanded Polystyrene as an Effective Adsorbent of Naphthalene from Aqueous Solution	Taiwo <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
41	Synthesis of polyamino styrene from post-consumption expanded polystyrene and analysis of its CO ₂ scavenger capacity	Merchán Arenas <i>et al.</i>	2021	0	Artículo
42	Plastics-to-oil recycler finds new niche in polystyrene	Caliendo H.	2018	0	Artículo

Apéndice D. Gráficas relacionadas con la bibliometría de los documentos seleccionados

Figura 1

Autores representativos para los 42 documentos seleccionados

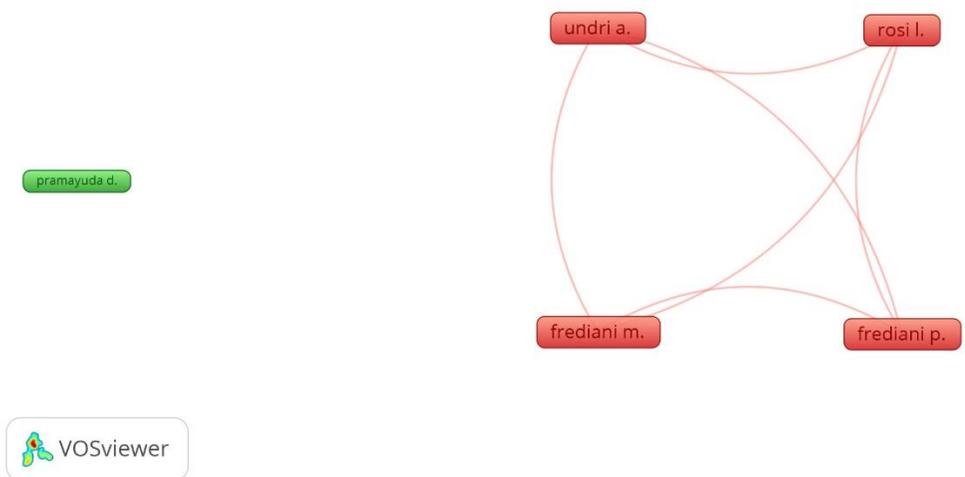


Figura 2

Línea de tiempo de los autores representativos para los 42 documentos seleccionados

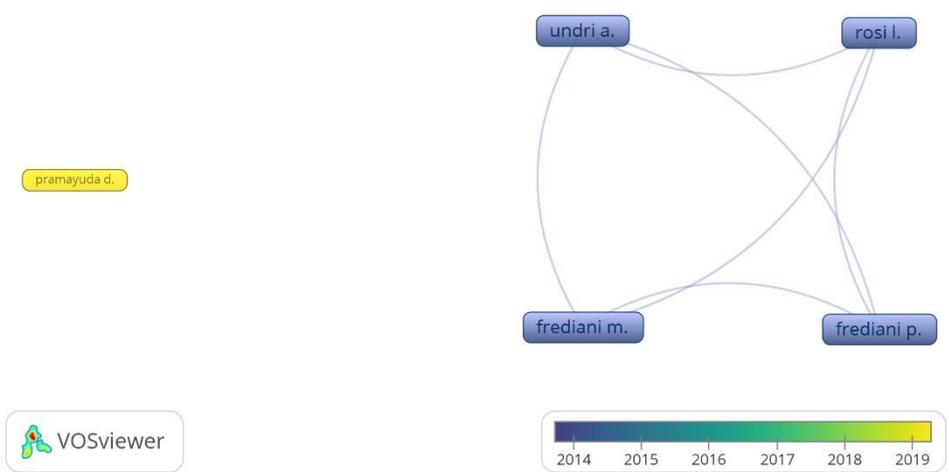


Figura 3

Instituciones representativas para los 42 documentos seleccionados

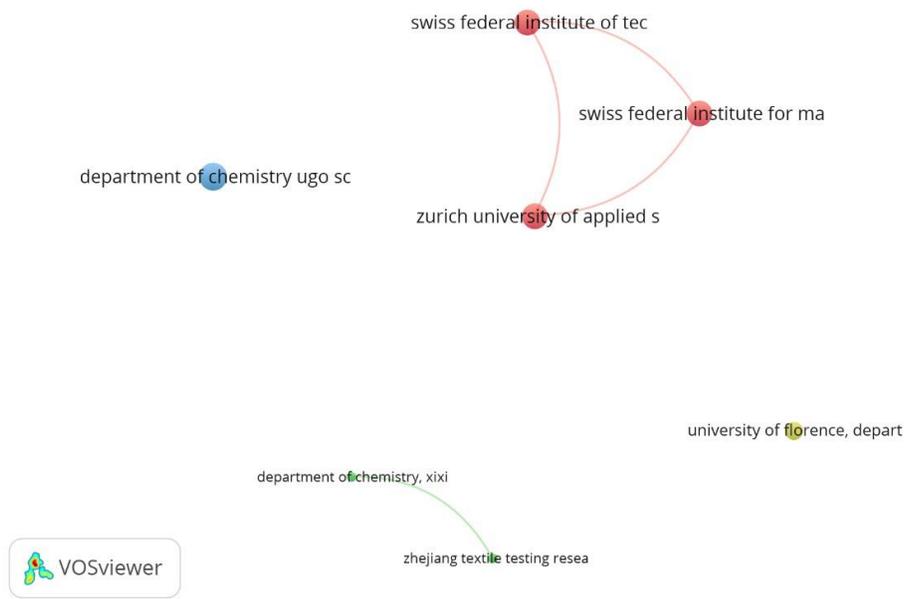
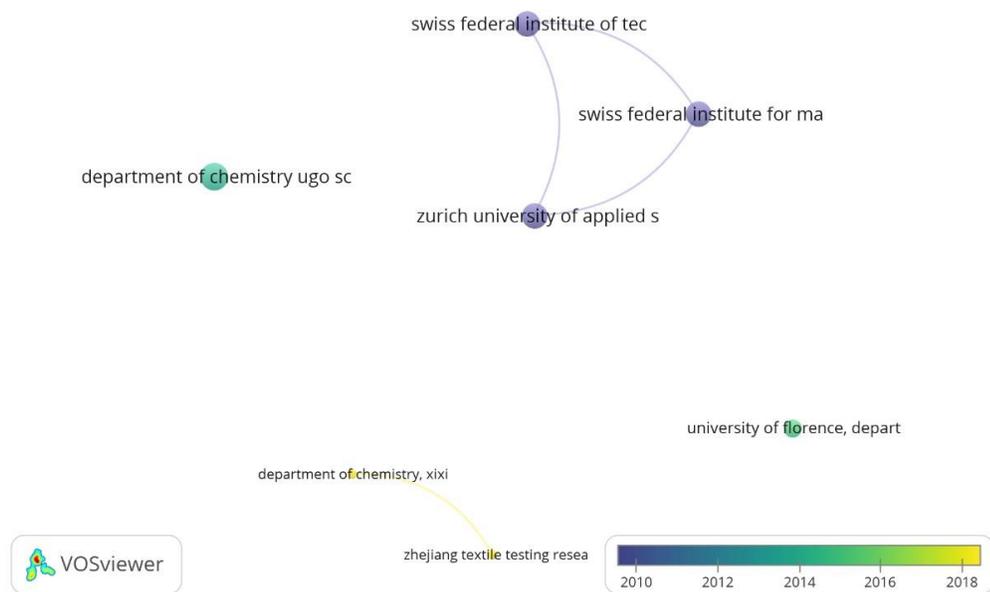


Figura 4

Línea de tiempo de las instituciones representativas para los 42 documentos seleccionados



Apéndice E. Bibliometría

Tabla 2

Bibliometría

N°	Título/Línea de tratamiento	Autores	Países	Citaciones	Área temática
Revisión de artículos					
1	Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review	Okan <i>et al.</i> , 2019	Turquía	48	Chemistry, Engineering
2	Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review	Uttaravalli <i>et al.</i> , 2020	India	8	Engineering
Tratamiento con catalizadores (degradación catalítica)					
1	Polystyrene degradation studies using Cu supported catalysts	Adnan <i>et al.</i> , 2014	Pakistán	39	Engineering
2	Conversion of waste polystyrene through catalytic degradation into valuable products	Shah <i>et al.</i> , 2014	Pakistán	21	Chemistry, Engineering
3	Effect of carbon supported metals on the tertiary recycling of waste expanded polystyrene	Shah <i>et al.</i> , 2015	Pakistán	1	Engineering
4	The ratio Influence of the polystyrene mixture and heating rate towards yield and pyrolysis results compound	Selpiana <i>et al.</i> , 2019	Indonesia	1	Earth and Planetary Sciences - Environmental Science
Tratamiento con catalizadores (reacciones de Friedel Crafts)					
1	Transforming waste expanded polystyrene foam into hyper-crosslinked polymers for carbon dioxide capture and separation	Fu <i>et al.</i> , 2017	China	33	Engineering
2	A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived from waste-expanded polystyrene	Hu <i>et al.</i> , 2019	China	16	Engineering

	for highly efficient removal of organic contaminants				
3	Fabrication of highly efficient thermal energy storage composite from waste polystyrenes	Liu <i>et al.</i> , 2020	China	6	Engineering
4	Conversion of waste polystyrene foam into sulfonated hyper-crosslinked polymeric adsorbents for cadmium removal in a fixed-bed column	Jia <i>et al.</i> , 2019	China	6	Engineering
5	Studies on the adsorption of dyes, Methylene blue, Safranin T, and Malachite green onto Polystyrene foam	Li <i>et al.</i> , 2021	China	0	Chemical Engineering-Chemistry
Tratamiento con catalizadores (reacciones de sulfonación)					
1	In Situ Synthesis of CdS Quantum Dot-Partially Sulfonated Polystyrene Composite: Characterization and Optical Properties	Antony <i>et al.</i> , 2014	India	10	Engineering
2	Esterification of free fatty acids in non-edible oils using partially sulfonated polystyrene for biodiesel feedstock	Suresh <i>et al.</i> , 2017	India	19	Agriculture
Tratamiento con catalizadores (reacción de acetilación)					
1	Chemical Recycling of Expanded Polystyrene Waste: Synthesis of Novel Functional Polystyrene-Hydrazone Surface for Phenol Removal	Siyal <i>et al.</i> , 2013	Pakistán	4	Chemistry
Pirólisis					
1	Plastics-to-oil recycler finds new niche in polystyrene	Caliendo (2018)	Indefinido	0	Engineering - Materials Science

N°	Título	Autores	Países	Citaciones	Área temática
Pirólisis (atmósfera de aire)					
1	Carbonization, hydrogenation and oxidation in the thermal degradation of expanded polystyrene	Torres <i>et al.</i> , 2018	México	4	Material Science
2	The conversion of expanded polystyrene waste to liquid fuel using Cu-Al ₂ O ₃ by the thermal catalytic cracking process	Selpiana, S. <i>et al.</i> , 2019	Indonesia	1	Physics and Astronomy
Pirólisis (asistida por microondas)					
1	Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis	Undri <i>et al.</i> , 2014	Italia	60	Chemistry-Energy
2	Waste/contaminated polystyrene recycling through reverse polymerization	Frediani <i>et al.</i> , 2014	Italia	4	Chemistry
3	Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through a microwave assisted pyrolysis	Bartoli <i>et al.</i> , 2015	Italia	39	Chemistry-Energy
Pirólisis (atmósfera de N ₂)					
1	Isoconversional analysis of kinetic pyrolysis of virgin polystyrene and its two real-world packaging wastes	Ren <i>et al.</i> , 2021	China	0	Chemistry, Thermodynamics
Pirólisis (atmósfera de Ar)					
1	Waste-polystyrene foams-derived magnetic carbon material for adsorption and redox supercapacitor applications	Machado <i>et al.</i> , 2021	Brasil España	0	Engineering, Environmental Sciences Ecology
Pirólisis (catalítica)					
1	Thermo-catalytic Degradation of Thermocol Waste to Value Added Liquid Products	Panda <i>et al.</i> , 2012	India	11	Chemistry
2	Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in the presence of zinc bulk catalysts	Adnan <i>et al.</i> , 2014b	Pakistán	23	Engineering

N°	Título	Autores	Países	Citaciones	Área temática
3	Thermal and clinker-catalyzed pyrolyses of polystyrene waste using the Portland cement solid-base catalyst	Hussain <i>et al.</i> , 2021	Pakistán Arabia saudita	1	Engineering
4	Pyrolysis of waste expanded polystyrene and reduction of styrene via in-situ multiphase pyrolysis of product oil for the production of fuel range hydrocarbons	Verma <i>et al.</i> , 2021	India	1	Environmental Science
5	Catalytic activity of acid-treated biomass for the degradation of expanded polystyrene waste	Rex y Miranda (2020)	India	3	Environmental Science
6	Study of combustion and emission characteristics of fuel derived from waste plastics by various waste to energy (W-t-E) conversion processes	Hazrat <i>et al.</i> , 2016	Australia	1	Physics and Astronomy
7	Expanded polystyrene: Thermo-mechanical recycling, characterization and application	Poletto <i>et al.</i> , 2014	Brasil	1	Chemistry
Reacciones químicas sin el uso de catalizadores (sulfonación)					
1	Removal of Zn ²⁺ and Pb ²⁺ ions from aqueous solution using sulphonated waste polystyrene	Ruziwa <i>et al.</i> , 2015	USA Zimbabue	24	Engineering
2	A novel route for the synthesis of pseudopolyrotaxane containing gamma-Cyclodextrin based on environmental waste recycling	Dardeer y Toghhan (2021)	Egipto Arabia saudita	2	Chemistry
3	Rapid modification of waste expanded polystyrene with H ₂ SO ₄ /trace persulfate in one pot for effective adsorption of fluoroquinolone antibiotic and its	S.H. Liu <i>et al.</i> , 2021	Taiwán	0	Environmental sciences ecology

	regeneration				
4	A novel sulfonated waste polystyrene / iron oxide nanoparticles composite: Green synthesis, characterization and applications	De Leon- Condes <i>et al.</i> , 2019	México	11	Engineering
5	Sulfonated Expanded Polystyrene Waste Promotes the (+)-Citronellal Cyclization Reaction: A Sustainable Alternative Process for Biomass Valorization	Ribeiro <i>et al.</i> , 2021	Brasil	1	Environmental sciences ecology
6	Sulfonation of expanded polystyrene post consumption, structural analysis and its application in chemical enhanced oil recovery	Merchan- Arenas <i>et al.</i> , 2017	Colombia	4	Chemical engineering
7	Sulphonation of expanded polystyrene waste with commercial sulphuric acid for potential use in removal of heavy metals from contaminated waters	Tabekh <i>et al.</i> , 2015	Siria	3	Chemical Engineering - Materials Science
8	The conditions of cationic exchange with the use of recycling polystyrene derivative, the product of sulfonation by silica sulfuric acid	Sulkowski <i>et al.</i> , 2013	Polonia	2	Chemistry Materials science
Reacciones químicas sin el uso de catalizadores (acetilación)					
1	Recycling of Waste Expanded Polystyrene as an Effective Adsorbent of Naphthalene from Aqueous Solution	Taiwo <i>et al.</i> , 2021	Nigeria	0	Chemistry
Reacciones químicas sin el uso de catalizadores (nitración)					
1	Synthesis of polyamino styrene from post-consumption expanded polystyrene and analysis of its CO ₂ scavenger capacity	Merchan- Arenas y Murcia- Patiño (2021)	Colombia	0	Environmental sciences ecology

N°	Título	Autores	Países	Citaciones	Área temática
2	Diazabenzocrown grafted on the polystyrene and application of extraction of metal cations	Dardouri <i>et al.</i> , 2016	Túnez	3	Engineering, Water resources
Reacciones químicas sin el uso de catalizadores (isomerización)					
1	Thermally-induced transformation of hexabromocyclo dodecanes and isobutoxypenta bromocyclododecanes in flame-proofed polystyrene materials	Heeb <i>et al.</i> , 2010	Suecia Suiza	56	Chemistry Environmental science
Reacciones químicas sin el uso de catalizadores (polimerización)					
1	Graphene-coated polystyrene-divinylbenzene dispersive solid-phase extraction coupled with supercritical fluid chromatography for the rapid determination of 10 allergenic disperse dyes in industrial wastewater samples	Lou <i>et al.</i> , 2018	China	20	Biochemistry, Genetics and Molecular Biology - Chemistry

Tabla 2.

Categorías de tratamiento químico identificadas

Línea	Autores	Título
Tratamiento con catalizadores	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación catalítica 	
	Adnan <i>et al.</i> (2014)	Polystyrene degradation studies using Cu supported catalysts
	Shah <i>et al.</i> (2014)	Conversion of waste polystyrene through catalytic degradation into valuable products
	Shah <i>et al.</i> (2015)	Effect of carbon supported metals on the tertiary recycling of waste expanded polystyrene
	Selpiana <i>et al.</i> (2019)	The ratio Influence of the polystyrene mixture and heating rate towards yield and pyrolysis results compound
	Duarte <i>et al.</i> (2018)	Análisis del proceso de destrucción de aromáticos por medio de oxidación catalítica: aplicación en el tratamiento del poliestireno

	<ul style="list-style-type: none"> • Reacciones de Friedel Crafts 	
Tratamiento	Fu <i>et al.</i> (2017)	Transforming waste expanded polystyrene foam into hyper-crosslinked polymers for carbon dioxide capture and separation
con	Hu <i>et al.</i> (2019)	A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived from waste expanded polystyrene for highly efficient removal of organic contaminants
catalizadores	Jia <i>et al.</i> (2019)	Conversion of waste polystyrene foam into sulfonated hyper-crosslinked polymeric adsorbents for cadmium removal in a fixed-bed column
	Liu <i>et al.</i> (2020)	Fabrication of highly efficient thermal energy storage composite from waste polystyrenes
	Li <i>et al.</i> (2021)	Studies on the adsorption of dyes, Methylene blue, Safranin T, and Malachite green onto Polystyrene foam
	<ul style="list-style-type: none"> • Reacciones de sulfonación 	
	Antony <i>et al.</i> (2014)	In Situ Synthesis of CdS Quantum Dot-Partially Sulfonated Polystyrene Composite: Characterization and Optical Properties
	Suresh <i>et al.</i> (2017)	Esterification of free fatty acids in non-edible oils using partially sulfonated polystyrene for biodiesel feedstock
	<ul style="list-style-type: none"> • Reacciones de acetilación 	
	Siyal <i>et al.</i> (2013)	Chemical Recycling of Expanded Polystyrene Waste: Synthesis of Novel Functional Polystyrene-Hydrazone Surface for Phenol Removal
	Caliendo (2018)	Plastics-to-oil recycler finds new niche in polystyrene
	<ul style="list-style-type: none"> • Atmósfera de aire 	
	Torres <i>et al.</i> (2018)	Carbonization, hydrogenation and oxidation in the thermal degradation of expanded polystyrene
Pirólisis	Selpiana, S. <i>et al.</i> (2019)	The conversion of expanded polystyrene waste to liquid fuel using Cu-Al ₂ O ₃ by the thermal catalytic cracking process
	<ul style="list-style-type: none"> • Asistida por microondas 	
	Undri <i>et al.</i> (2014)	Reverse polymerization of waste polystyrene through microwave assisted pyrolysis
	Frediani <i>et al.</i> (2014)	Waste/contaminated polystyrene recycling through reverse polymerization

	Bartoli <i>et al.</i> (2015)	Depolymerization of polystyrene at reduced pressure through a microwave assisted pyrolysis
	<ul style="list-style-type: none"> • Atmósfera de nitrógeno 	
	Ren <i>et al.</i> (2021)	Isoconversional analysis of kinetic pyrolysis of virgin polystyrene and its two real-world packaging wastes
	<ul style="list-style-type: none"> • Atmósfera de argón 	
	Machado <i>et al.</i> (2021)	Waste-polystyrene foams-derived magnetic carbon material for adsorption and redox supercapacitor applications
	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de catalizadores 	
	Panda <i>et al.</i> (2012)	Thermo-catalytic Degradation of Thermocol Waste to Value Added Liquid Products
	Adnan <i>et al.</i> (2014b)	Thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene in the presence of zinc bulk catalysts
Pirólisis	Hussain <i>et al.</i> (2021)	Thermal and clinker-catalyzed pyrolyses of polystyrene waste using the Portland cement solid-base catalyst
	Verma <i>et al.</i> (2021)	Pyrolysis of waste expanded polystyrene and reduction of styrene via in-situ multiphase pyrolysis of product oil for the production of fuel range hydrocarbons
	Rex y Miranda (2020)	Catalytic activity of acid-treated biomass for the degradation of expanded polystyrene waste
	Hazrat <i>et al.</i> (2016)	Study of combustion and emission characteristics of fuel derived from waste plastics by various waste to energy (W-t-E) conversion processes
	Poletto <i>et al.</i> (2014)	Expanded polystyrene: Thermo-mechanical recycling, characterization and application
	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfonación 	
Reacciones químicas sin el uso de catalizadores	Ruziwa <i>et al.</i> (2015)	Removal of Zn ²⁺ and Pb ²⁺ ions from aqueous solution using sulphonated waste polystyrene
	De Leon-Condes <i>et al.</i> (2019)	A novel sulfonated waste polystyrene / iron oxide nanoparticles composite: Green synthesis, characterization and applications
	Dardeer y Toghan (2021)	A novel route for the synthesis of pseudopolyrotaxane containing gamma-Cyclodextrin based on environmental waste recycling
	S.H. Liu <i>et al.</i> (2021)	Rapid modification of waste expanded polystyrene with H ₂ SO ₄ /trace persulfate in one pot for effective adsorption of fluoroquinolone antibiotic and its regeneration

Reacciones químicas sin el uso de catalizadores	Ribeiro <i>et al.</i> (2021)	Sulfonated Expanded Polystyrene Waste Promotes the (+)-Citronellal Cyclization Reaction: A Sustainable Alternative Process for Biomass Valorization
	Merchan-Arenas <i>et al.</i> (2017)	Sulfonation of expanded polystyrene post consumption, structural analysis and its application in chemical enhanced oil recovery
	Tabekh <i>et al.</i> (2015)	Sulphonation of expanded polystyrene waste with commercial sulphuric acid for potential use in removal of heavy metals from contaminated waters
	Sulkowski <i>et al.</i> (2013)	The conditions of cationic exchange with the use of recycling polystyrene derivative, the product of sulfonation by silica sulfuric acid
		<ul style="list-style-type: none"> • Acetilación
	Taiwo <i>et al.</i> (2021)	Recycling of Waste Expanded Polystyrene as an Effective Adsorbent of Naphthalene from Aqueous Solution
		<ul style="list-style-type: none"> • Nitración
	Merchan-Arenas y Murcia-Patiño (2021)	Synthesis of polyamino styrene from post-consumption expanded polystyrene and analysis of its CO ₂ scavenger capacity
	Dardouri <i>et al.</i> (2016)	Diazabenzocrowns grafted on the polystyrene and application of extraction of metal cations
		<ul style="list-style-type: none"> • Isomerización
	<ul style="list-style-type: none"> • Polimerización 	
	Lou. C <i>et al.</i> (2018)	Graphene-coated polystyrene-divinylbenzene dispersive solid-phase extraction coupled with supercritical fluid chromatography for the rapid determination of 10 allergenic disperse dyes in industrial wastewater samples

Apéndice. Condiciones para el pretratamiento de EPS**Tabla 1***Condiciones de pretratamiento para las muestras de EPS*

Autores	Pretratamiento	Tipo de reactor	Cantidad de EPS cargada
Adnan <i>et al.</i> (2014)	Dos trituraciones, antes y después de un secado a 150°C	Reactor discontinuo Pyrex (diámetro interno de 7 cm y altura de 22cm)	5 g
Shah <i>et al.</i> (2014)	Trituración y secado a 150°C durante 15-25 min		100 g
Shah <i>et al.</i> (2015)	---		---
Selpiana <i>et al.</i> (2019)	Lavado y secado al sol Trituración hasta un diámetro de 1-3 mm	Reactor de lecho fijo (no especifica las dimensiones*)	50 g

Nota: las condiciones presentadas para el pretratamiento de EPS corresponden a la categoría degradación catalítica

Apéndice G. Condiciones de operación para la degradación catalítica

Tabla 1

Condiciones de operación y rendimientos obtenidos durante la degradación catalítica

Autores / Tipo de degradación	Condiciones de reacción			Contenido de productos		
	Temperatura [°C]	Tiempo de reacción [min]	Relación polímero a catalizador	Líquidos	Gases	Residuo
Adnan et al. (2014)						
Térmica	500	150	-	78,07	20,40	1,53
Cu	450	30	1:0,3	93,93	6,07	0,00
Al ₂ O ₃	450	60	1:0,2	87,00	13,00	0,00
20% Cu – Al ₂ O ₃	450	30	1:0,3	86,87	13,13	0,00
Mmn	450	60	1:0,2	92,40	7,60	0,00
15% Cu – Mmn	450	30	1:0,3	89,20	9,07	1,73
AC	500	30	1:0,1	84,47	15,53	0,00
20% Cu – AC	450	30	1:0,3	83,47	16,53	0,00
Shah et al. (2014)						
Térmica	500	150	-	78,07	20,40	1,53
Mg	450	30	1:0,3	82,20	17,20	0,60
MgO	400	120	1:0,3	91,60	7,00	1,40
MgCO ₃	400	120	1:0,3	81,80	13,07	5,13
Shah et al. (2015)						
Térmica	500	150	-	78,07	20,40	1,53
AC	500	30	1:0,1	84,47	15,53	0,00
20% Mg/AC	450	30	1:0,1	87,47	12,50	0,00
20% Zn/AC	450	120	1:0,1	84,13	15,80	0,00
20% Al/AC	500	60	1:0,1	88,87	10,70	0,00
20% Cu/AC	450	30	1:0,1	83,47	16,50	0,00
20% Fe/AC	450	30	1:0,1	84,47	15,30	0,00
Selpiana et al. (2019)						
Cu-Al ₂ O ₃	Volumen (rendimiento)					
	150	90	1:0,02	113 ml	Menciona octano, pero no especifica la cantidad*	
	200					
250						

Tabla 2*Composición de los productos líquidos formados durante la degradación catalítica*

Autores / tipo de degradación	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Estireno
Adnan et al. (2014)				
Cu	0,00	0,00	0,49	55,14
20 % Cu-Al ₂ O ₃	0,00	10,98	8,92	60,48
15% Cu-Mmn	0,82	9,76	6,61	48,46
20%Cu-AC	0,82	6,55	12,92	39,39
Térmica	0,04	2,06	0,85	39,31
Al ₂ O ₃	0,00	2,58	1,40	45,65
Mmn	0,04	1,59	0,49	45,42
AC	0,32	6,96	6,55	43,61
Shah et al. (2014)				
Térmica	0,06	2,64 (51) ^{§§}	1,09	50,36 (35)
Mg	0,06	2,73	0,88	66,56 (43)
MgO	0,08	4,05 (11,5)	2,23 (35)	54,53 (23,8)
MgCO ₃	-	6,28 (15,81)	7,59	55,23 (51,9)
Shah et al. (2015)				
Térmica	0,04	2,06	0,85	39,31
AC	0,32	6,96	6,55	42,61
20% Mg/AC	0,66	6,38	7,00	44,41
20% Zn/AC	0,52	7,49	10,71	41,09
20% Al/AC	1,42	8,49	8,90	47,29
20% Cu/AC	0,82	6,55	12,92	39,39
20% Fe/AC	0,64	6,34	7,93	46,31

Nota: los valores presentados corresponden a porcentaje en peso

^{§§} Los valores en azul corresponden a los reportados tras la destilación fraccionada

Apéndice H. Condiciones de trabajo para la pirólisis

Tabla 1

Condiciones de trabajo durante la pirólisis

Autores	Pretratamiento	Tipo de reactor	Cantidad de EPS cargada
Panda <i>et al.</i> (2012)	PS calentado (80°C ,1 h) molienda	acero inoxidable	20 g
Adnan <i>et al.</i> (2014b)	PS calentado a 150°C durante 20 min	reactor discontinuo Pyrex provisto de un horno de calentamiento eléctrico externo	5 g
Hussain <i>et al.</i> (2021)	PS calentado a 120°C PS convertido en polvo con tamaño de partícula 500 µm	reactor discontinuo de vidrio	---
Verma <i>et al.</i> (2021)	El poliestireno expandido de desecho (WEPS) se recogió de un depósito de desechos En primer lugar, las hojas grandes de termocol se cortaron manualmente en trozos pequeños de 80x80 mm con un cortador. A partir de entonces, el volumen se redujo colocando las piezas cortadas de WEPS en un horno a una temperatura de 85°C durante 1 hora, lo que resultó en una masa quebradiza de tamaño promedio 40x40mm	Tipo A -> Reactor de lecho de pico cónico Tipo B -> Reactor catalítico de 4 capas Tipo AB -> Multifásico - Semidiscontinuo	50g

Autores	Pretratamiento	Tipo de reactor	Cantidad de EPS cargada
Rex y Miranda (2020)	<p>150 g de cáscara de arroz con un tamaño de partícula de ($\approx 0,75 - 1$ cm) se lavó minuciosamente con agua destilada para eliminar la tierra y el polvo. La HR se secó en un horno para eliminar toda la humedad. La HR seca se remojó por separado en ácido oxálico, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico durante 1 h. Luego se filtró la HR y se colocó en un horno de aire caliente a una temperatura de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora y luego se dejó enfriar. La HR enfriada se calcinó a una temperatura de $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 6 h para obtener sílice.</p>	Reactor discontinuo de lecho fluidizado	50 g
Hazrat <i>et al.</i> (2016)	No especifica*	Reactor de autoclave de vidrio	No especifica*

Apéndice I. Condiciones y composición de los productos de pirólisis

Tabla 1

Condiciones de operación y rendimientos obtenidos durante la pirólisis catalítica

Autores / tipo de pirólisis	Temperatura de degradación óptima [°C]	Tiempo de reacción [min]	Relación polímero a catalizador	Rendimiento máximo de producto líquido (%p)
Adnan <i>et al.</i> (2014b)				
Térmica	500	150	-	78,07
Zn	450	120	1:0,2	96,73
ZnO	450	60	1:0,2	84,73
ZnCl ₂	500	60	1:0,1	79,60
Panda <i>et al.</i> (2012)				
Térmica	500	no reporta	-	93,00
Arcilla caolina	500	no reporta	1:0,1	94,50
Alúmina de sílice	500		1:0,1	93,00
Hussain <i>et al.</i> (2021)				
Térmica	600	60	-	94,98
	400	30	1:0,05	89,10
	400	30	1:0,10	90,00
Cemento Portland	400	30	1:0,15	94,70
	400	30	1:0,20	91,50
	400	30	1:0,25	89,75
Hazrat <i>et al.</i> (2016)				
Térmica	550	210	-	61,00
Zeolita natural (NZ)	550	150	1: 0,05	66,00
Alúmina	550	150	1:0,05	71,00
Verma <i>et al.</i> (2021)				
Térmica	650	no reporta	-	94,37
Amonio ZSM-5				
Fase líquida	600		1:0,05	88,05
Fase vapor	550	no reporta	1:0,05	78,85
Fase liq-vap	550		1:0,05	75,11
Rex y Miranda (2020)				
RH _{OA 0,25}	445	91	1:0,1	96,53

Tabla 2*Composición de productos obtenidos durante la pirólisis (% p)*

Autores / tipo de pirólisis	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Estireno
Adnan <i>et al.</i> (2014b)				
Térmica	-	2,06	0,85	39,31
Zn	-	2,47	1,16	47,96
ZnO	-	1,80	0,60	41,45
ZnCl ₂	-	2,11	1,93	40,88
Panda <i>et al.</i> (2012)				
Térmica	1,48	2,90	5,1	77,58
Arcilla caolina	3,64	8,10	11,71	64,65
Sílice alúmina	7,06	7,21	24,73	48,85
Hussain <i>et al.</i> (2021)				
Térmica	-	9,87	11,91	42,14
15% Portland	-	12,56	8,58	63,17
Verma <i>et al.</i> (2021)				
Térmica	0,62	10,21	0,55	84,74
Amonio ZSM-5				
Fase líquida	5,56	12,10	1,32	55,78
Fase vapor	10,13	10,14	4,00	46,42
Fase liq-vap	11,68	12,18	4,26	46,30

Apéndice J. Escala de las líneas de tratamiento

Tabla 1

Enfoques identificados en los trabajos analizados

	Línea de tratamiento	Autores	Escala		
			Laboratorio	Escalable	
Tratamiento con catalizadores	Degradación	Adnan <i>et al.</i> (2014)	•		
		Shah <i>et al.</i> (2014)	•		
		Shah <i>et al.</i> (2015)	•		
		Selpiana <i>et al.</i> (2019)	•		
	Reacciones		Fu <i>et al.</i> (2017)		•
		Friedel-Crafts	Hu <i>et al.</i> (2019)		•
			Liu <i>et al.</i> (2020)		•
			Jia <i>et al.</i> (2019)		•
			Li <i>et al.</i> (2021)		•
	Sulfonación	Antony <i>et al.</i> (2014)	•		
		Suresh <i>et al.</i> (2017)	•		
	Acetilación	Siyal <i>et al.</i> (2013)		•	
		Caliendo (2018)		En funcionamiento	
Pirólisis	Catalítica	Panda <i>et al.</i> (2012)		•	
		Adnan <i>et al.</i> (2014b)	•		
		Hussain <i>et al.</i> (2021)	•		
		Verma <i>et al.</i> (2021)	•		
		Rex y Miranda (2020)	•		
		Hazart <i>et al.</i> (2016)	•		
		Poletto <i>et al.</i> (2014)	•		
	Atmósferas	N ₂	Ren <i>et al.</i> (2021)	•	
		Ar	Machado <i>et al.</i> (2021)	•	
		Aire	Torres <i>et al.</i> (2018)	•	
	Asistida por microondas		Selpiana, S <i>et al.</i> (2019)	•	
			Undri <i>et al.</i> (2014)	•	
			Frediani <i>et al.</i> (2014)	•	
		Bartoli <i>et al.</i> (2015)	•		

Línea de tratamiento	Autores	Escala	
		Laboratorio	Escalable
Reacciones químicas sin catalizadores	Sulfonación		
	Ruziwa <i>et al.</i> (2015)		•
	Dardeer y Toghan (2021)	•	
	S.H. Liu <i>et al.</i> (2021)		•
	De Leon- Condes <i>et al.</i> (2019)	•	
	Ribeiro <i>et al.</i> (2021)	•	
	Merchán-Arenas <i>et al.</i> (2017)	•	
	Tabekh <i>et al.</i> (2015)	•	
	Sułkowski <i>et al.</i> (2013)	•	
	Acetilación		
Taiwo <i>et al.</i> (2021)	•		
Nitración			
Merchán-Arenas y Murcia-Patiño (2021)	•		
Dardouri <i>et al.</i> (2016)	•		
Isomerización			
Heeb <i>et al.</i> (2010)	•		
Polimerización			
Lou <i>et al.</i> (2018)	•		
Revisiones	Okan <i>et al.</i> (2019)		No aplica
	Uttaravalli <i>et al.</i> (2020)		No aplica
Total documentos		30	10

Apéndice K. Información de seguridad**Tabla 1**

Información de seguridad para los principales materiales utilizados durante el tratamiento con catalizadores

Material	Información de seguridad
Alúmina Al ₂ O ₃	-
Arcilla de montmorillonita (Mmn)	-
Carbón activado (AC)	-
CuCl ₂ * 2H ₂ O	nocivo, irritante, peligroso para el medio ambiente
Mg (polvo 0,06-0,3 mm, 98,5%)	inflamable
MgO (98,0-100,5%)	--
MgCO ₃ (99,87%)	ligeramente irritante
AC	--
MgCl ₂ *6H ₂ O	contamina ligeramente el agua
ZnCl ₂	nocivo, corrosivo, peligroso para el medio ambiente
FeCl ₃ *6H ₂ O	corrosivo, irritante, tóxico
AlCl ₃ *6H ₂ O	corrosivo
1,2-dicloroetano (DCE)	inflamable, nocivo, irritante, tóxico
Etanol	inflamable, irritante
HCl	corrosivo, irritante
Carbón activado granular (CAG)	--
Carbón activado en polvo (CAP)	-
Cloruro férrico anhidro (FeCl ₃)	nocivo, irritante, sensibilizante
Cloruro de aluminio anhidro (AlCl ₃)	corrosivo
Cloruro cianúrico (CC)	nocivo, corrosivo, mortal en caso de inhalación
2,4-diclorofenol (2,4-DCP)	tóxico, corrosivo, peligroso para el medio ambiente

Clorhidrato de tetraciclina (TC)	---
Metanol	inflamable, toxico, nocivo
Formaldehído dimetil acetal (FDA)	altamente inflamable
Diclorometano (DCM)	irritante, cancerígeno
Ácido acético glacial (HAc)	inflamable, corrosivo
Parafina (Tfusión: 60 °C)	mutagénico, carcinógeno, tóxico para la reproducción
FeCl ₃ anhidro	corrosivo, tóxico agudo
AlCl ₃ anhidro	corrosivo
Acetona	inflamable, tóxico, irritante
H ₂ SO ₄	corrosivo
HNO ₃	comburente, corrosivo, toxicidad aguda
NaNO ₃	comburente, tóxico
Cd (NO ₃) ₂ *4H ₂ O	tóxico, carcinógeno, mutagénico, peligroso para el medio ambiente
Ag ₂ SO ₄	corrosivo, peligroso para el medio ambiente
Cd (CH ₃ COO) ₂ · 2H ₂ O	tóxico agudo, peligroso para el medio ambiente
Na ₂ S · 9H ₂ O	corrosivo, tóxico, peligroso para el medio ambiente
Tolueno	inflamable, irritante, nocivo para la salud y la vida acuática
DMF (dimetilformamida)	inflamable, nocivo, irritante
Tetrahidrofurano C ₄ H ₈ O (THF)	inflamable, nocivo, irritante, sospechoso de causar cáncer
Agua destilada	---
Acetato de cadmio di hidrato	nocivo, tóxico para la vida acuática, mortal si se inhala
Na ₂ S	corrosivo, tóxico, puede causar quemaduras, muy tóxico para la vida acuática
CH ₃ COCl	inflamable, corrosivo

Tabla 2.*Información de seguridad para los principales materiales utilizados durante la pirólisis*

Material	Información de seguridad
Gránulos de Zn (99,9%)	--
ZnO (99-100.5%)	Peligroso para el medio acuático
ZnCl ₂ (99%)	Corrosivo, tóxico, irritante, peligroso para el medio ambiente
n-hexano	Fácilmente inflamable, irritante, nocivo, tóxico para la reproducción, peligroso para el medio ambiente
Arcilla de caolín	-
Sílice alúmina amorfa	-
Cemento portland	Corrosivo, puede provocar cáncer
Zeolita natural (NZ)	Insoluble
Alúmina	Inodoro, insoluble
Amonio ZSM-5	Insoluble en agua
RH _O A _{0.25}	-

Tabla 3.*Información de seguridad para los principales materiales utilizados durante las reacciones químicas sin el uso de catalizadores*

Material	Información de seguridad
H ₂ SO ₄ al 95%	corrosivo
Agua destilada	--
Pb (NO ₃) ₂ nitrato de plomo II	oxidante, nocivo, puede causar daños en la fertilidad, muy tóxico para la vida acuática
ZnCl ₂	nocivo, corrosivo, tóxico para la vida acuática

Agua regia (HCl + HNO ₃ , relación 3:1)	corrosivo, irritante
HCl (35%)	corrosivo, tóxico, oxidante
HNO ₃ (35%)	inflamable, toxico, nocivo
Metanol	inflamable, tóxico, nocivo
Tolueno	corrosivo, provoca quemaduras graves en la piel
NaOH	puede causar cáncer, daño a la fertilidad
Fenolftaleína	puede causar cáncer, daño a la fertilidad
Solución de NaCl (0,2M)	corrosivo, provoca quemaduras graves en la piel
Dimetilformamida (DMF)	inflamable, nocivo, irritante
γ-ciclodextrina	--
CHCl ₃	nocivo, irritante, cancerígeno, tóxico para la reproducción
Agua destilada	---
Fenolftaleína	puede causar cáncer, daño a la fertilidad
Dimetilsulfóxido (DMSO) C ₂ H ₆ OS	---
Norfloxacin, C ₁₆ H ₁₈ FN ₃ O ₃ , 98% pureza	---
Na ₂ S ₂ O ₈ (99,0%)	oxidante, irritante
H ₃ PO ₄ (85%)	corrosivo, nocivo
Agua desionizada	irritante
H ₂ O ₂	nocivo, provoca lesiones oculares graves
N, N-dimetilciclohexilamina	inflamable, corrosivo, tóxico, peligroso para el medio ambiente
Benzo-15-corona-5 (99%)	irritante
Dibenzo-18-corona-6(98%)	irritante
CH ₃ COOH	inflamable, corrosivo
Grafeno	Irritación ocular - toxicidad
Divinilbenceno	irritante, peligroso para el medio ambiente
Ácido sulfúrico de sílice	lesiones oculares graves, sensibilización respiratoria o cutánea.
Sulfato de acetilo	Toxico, reactivo

Apéndice L. Análisis**Tabla 1***Análisis por categoría de tratamiento químico*

Categoría	Validación experimental (análisis)
Degradación catalítica	GC-MS Estudios de actividad de los catalizadores (optimización de las variables, temperatura de degradación, tiempo de reacción, relación polímero/catalizador)
Reacciones de Friedel-Crafts	Caracterización de materiales (FTIR, SEM) Experimentos de adsorción (mecanismo, isotermas, reutilización, comparación comercial)
Reacciones de sulfonación	Caracterización de materiales, propiedades ópticas, foto degradación de colorantes orgánicos Análisis térmico, GC-MS, capacidad de absorción, esterificación de ácidos grasos libres, reutilización del catalizador
Reacción de acetilación	Caracterización de superficies, experimentos de sorción, optimización de la sorción, estudio de las isotermas
Reacciones de nitración	Caracterización de materiales (Espectros IR, SEM-EDS, rayos X) Análisis térmico TGA, experimentos de adsorción
Pirólisis	TGA, GC-MS, caracterización de materiales (FTIR), cinético, cálculo de parámetros termodinámicos, experimentos adsorción regeneración térmica, actividad de los catalizadores (optimización de las variables, temperatura de degradación, tiempo de reacción, relación polímero/catalizador)

Tabla 2*Clasificación de autores por años y líneas de desarrollo*

Año	Tratamiento con catalizadores	Pirólisis	Reacciones químicas sin catalizadores
2010			Heeb <i>et al.</i>
2012		Panda <i>et al.</i>	
2013	Siyal <i>et al.</i>		Sulkowski <i>et al.</i>
2014	Andan <i>et al.</i> Shah <i>et al.</i> Antony <i>et al.</i>	Undri <i>et al.</i> Frediani <i>et al.</i> Adnan <i>et al. (b)</i> Poletto <i>et al.</i>	
2015	Shah <i>et al.</i>	Bartoli <i>et al.</i>	Ruziwa <i>et al.</i> Tabekh <i>et al.</i>
2016		Hazrat <i>et al.</i>	Dardouri <i>et al.</i>
2017	Fu <i>et al.</i> Suresh <i>et al.</i>		Merchan-Arenas <i>et al.</i>
2018		Torres <i>et al.</i> Calendo	Lou <i>et al.</i>
2019	Selpiana <i>et al.</i> Hu <i>et al.</i> Jia <i>et al.</i>	Selpiana, S <i>et al.</i>	De Leon-Condes <i>et al.</i>
2020	Liu <i>et al.</i>	Rex y Miranda	
2021	Li <i>et al.</i>	Ren <i>et al.</i> Machado <i>et al.</i> Hussain <i>et al.</i> Verma <i>et al.</i>	Dardeer y Toghan S.H. Liu <i>et al.</i> Ribeiro <i>et al.</i> Taiwo <i>et al.</i> Merchán-Arenas y Patiño-Murcia