



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA
PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES
TEMPERATURAS**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

DANNA PAOLA CORREA GARCÍA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEP

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. JOSE AURELIO SOSA OLIVIER

VILLAHERMOSA, TABASCO. NOVIEMBRE 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día **03 de noviembre del 2025**, la que suscribe **DANNA PAOLA CORREA GARCÍA** alumna del Programa de **INGENIERIA AMBIENTAL** con número de matrícula **202G24026** adscrita a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como **autora del trabajo recepcional (TESIS)** presentado para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, titulado **"DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS"** dirigido por el **DR. JOSE RAMÓN LAINES CANEPA**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido del Desarrollo Tecnológico presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 03 de noviembre del 2025.



Danna Paola Correa García

Nombre y Firma del Tesista



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



Villahermosa, Tab., a 04 de Noviembre de 2025

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. DANNA PAOLA CORREA GARCÍA** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

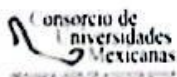
**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y desplumado de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



NOVIEMBRE 04 DE 2025

**C. DANNA PAOLA CORREA GARCÍA
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 111 al 113 del Cap. IV del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS"**, asesorado por el Dr. José Ramón Laines Canepa y Dr. José Aurelio Sosa Olivier, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, Dr. Carlos Mario Morales Bautista, Dr. José Ramón Laines Canepa, QBP. Leonardo García Hernández y MIPA. Sergio Ramos Herrera.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

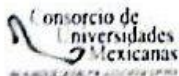
**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



03 de noviembre de 2025

C. DANNA PAOLA CORREA GARCÍA
Egresado de la Lic. en Ingeniería Ambiental

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS.**

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y se estableció el umbral de exclusión de coincidencias pequeñas a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	2 %
	47 páginas y 10177 palabras

Finalmente, se le solicita al **C. DANNA PAOLA CORREA GARCÍA**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C. c. p. Dr. José Ramón Laines Canepa. Director de tesis
C. c. p. Dr. Jose Aurelio Sosa Olivier. Codirector de tesis
C. c. p. Archivo



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

Danna Paola Correa García

DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFEREN...

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:522402227

Fecha de entrega

3 nov 2025, 1:57 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

7 nov 2025, 9:03 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Danna Paola Correa García_TR tesis.pdf

Tamaño del archivo

1.8 MB

47 páginas

10.177 palabras

57.656 caracteres




2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- Abstract
- Trabajos entregados

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad




N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.uaaan.mx	<1%
2	Internet	www.zapopan.gob.mx	<1%
3	Internet	repositorio.uta.edu.ec	<1%
4	Internet	pdffox.com	<1%
5	Internet	repository.libertadores.edu.co	<1%
6	Internet	docslide.us	<1%

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 03 de noviembre del 2025.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTORA en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS" Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



Danna Paola Correa García

Nombre y Firma del egresado



Dr. José Ramón Laines Canepa

Nombre y Firma del director de tesis

TESTIGOS



Jessica Elizabeth Cordova Palma



Mairé Paulina Torres García

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios, por nunca soltarme la mano, por darme fuerzas cuando más débil me sentí, cuando creí que el mundo se me venía encima. Gracias por sostenerme y recordarme que no estoy sola.

A mí, por creer en mi propio brillo incluso en mis días más oscuros, por confiar en lo que soy capaz de lograr y por no rendirme cuando todo parecía imposible.

A mis padres, Candelaria García García y Freddy Correa Méndez, que con amor infinito y sacrificios silenciosos me regalaron el privilegio de estudiar una licenciatura. Gracias por ser mis pilares, por impulsarme siempre y por enseñarme que los sueños sí se alcanzan.

A mis hermanos, Erika Pamela y Saúl Eduardo, por ser mi refugio, mis consejeros y mis motivos para seguir adelante. Gracias por estar, por escucharme y por amarme con tanta pureza.

A mis amigos Paz, Kenia, Mai, Jess y Moi, por ser de lo más bonito que la universidad me regaló. Gracias por cada risa, cada abrazo, cada desahogo y cada momento que hizo este camino más leve. Ustedes alegraron mis días y me sostuvieron cuando quise detenerme.

Y finalmente, a Haggen, Casper y Mocca... ay, mis fieles compañeros, mis amores más sinceros y puros. Gracias por acompañarme en tantas noches de desvelo, no solo en la universidad, sino en cada etapa de mi vida. Gracias por su cariño silencioso que abraza el alma. Los amo con el corazón.

A todos ustedes, quiero que sepan que forman parte de esta etapa tan importante de mi vida. Los llevo conmigo hoy y siempre. Gracias por ser luz en mi camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme hasta aquí, por sostenerme en los momentos más difíciles y darme la fuerza para continuar.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a mi División Académica de Ciencias Biológicas, gracias por ser el espacio donde crecí y por las personas que hicieron este camino más ligero.

A la Red de Investigación Multidisciplinar en Materia Ambiental desde la Perspectiva de la Química Aplicada, gracias por permitirme realizar los análisis que hicieron posible esta investigación y por confiar en mi trabajo.

Mi gratitud más sincera al Dr. José Ramón Laines Canepa por su acompañamiento, sus consejos y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Sus palabras “tienes algo diferente” fueron un impulso que hoy valoro profundamente.

Agradezco también al Dr. José Roberto Hernández Barajas y al Dr. Carlos Mario Morales Bautista por su apoyo, su guía y la confianza depositada en mí.

A quienes compartieron conmigo tardes y noches de pruebas, gracias por su compañía y apoyo; también forman parte de este logro.

En conclusión, gracias a todos. Gracias, Dios, por lo que me diste y por lo que me quitaste, porque en ambos aprendí. Hoy cierro este capítulo con el corazón lleno y orgullosa de lo que fui capaz de lograr.

Lista de contenido

2	Resumen	16
3	Abstract	16
4	Introducción	18
5	Marco teórico	20
5.1	Introducción al problema	20
5.1.1	Contaminación por residuos plásticos	20
5.1.2	Problemática causada por el poliestireno expandido	21
5.1.3	Alternativas de valorización y reciclaje del uniceL	21
5.1.4	Pirólisis como tecnología de valorización	22
5.1.5	Tipos de pirólisis	23
5.2	Aceites pirolíticos obtenidos de residuos plásticos	23
5.2.1	Propiedades fisicoquímicas de los aceites derivados de la pirólisis	24
5.3	Grado API y su importancia en la caracterización de aceites	25
5.3.1	Definición del grado API	25
5.3.2	Clasificación de los hidrocarburos según su grado API y densidad	25
5.4	Normatividad y estándares aplicables	26
5.4.1	Normas para la caracterización de aceites y combustibles	26
5.4.2	Comparación del grado API de aceites pirolíticos con combustibles convencionales	27
6	Justificación	29
7	Pregunta de investigación	30
8	Hipótesis	30
9	Objetivos	30
9.1	Objetivo general	30
9.2	Objetivos específicos	30
10	Metodología	31
10.1	Recolección y acondicionamiento del EPS	31
10.2	Proceso de pirólisis	32
10.2.1	Ubicación y características del sistema experimental	32
10.2.2	Descripción del reactor pirolítico	33

10.2.3	Procedimiento experimental	34
10.2.4	Monitoreo de temperatura y condiciones del proceso	36
10.2.5	Recolección de productos obtenidos	37
10.2.6	Caracterización de productos obtenidos	39
10.2.7	Determinación de la densidad	39
10.2.8	Cálculo de grado API	41
10.2.9	Cálculo de grado API real por réplica	41
10.2.10	Cálculo de grado API por grupo experimental	42
10.2.11	Clasificación de grado API por réplica y por grupo experimental	42
10.3	Análisis aplicados	43
10.3.1	Prueba de normalidad y análisis de varianza (ANOVA)	43
10.3.2	Análisis post hoc	43
11	Resultados	44
11.1	Productos obtenidos de la pirólisis	44
11.2	Caracterización del aceite pirolítico	46
11.2.1	Densidad experimental	46
11.2.2	Cálculo de grados API	48
11.2.3	Clasificación de grados API	48
11.3	Análisis estadístico	50
11.3.1	Prueba de normalidad y análisis de varianza (ANOVA)	50
11.3.2	Análisis post hoc	53
12	Discusión	55
13	Conclusiones	57
14	Recomendaciones	58
	Referencias	59

Índice de figuras

Figura 1. Trituradora de EPS semiautomática con fuente eléctrica de 110V.	31
Figura 2. Planta Piloto N.º 3 de la DACBiol.	32
Figura 3. Reactor pirolítico tipo batch.	33
Figura 4. Diagrama del sistema de pirólisis y sus componentes principales.	34
Figura 5. Pesaje de 60 g de EPS triturado.	35
Figura 6. Carga del reactor con el EPS.	35
Figura 7. Termocámara infrarroja utilizada para el monitoreo de temperatura en los ensayos.	37
Figura 8. Recuperación del aceite pirolítico mediante embudo de separación.	38
Figura 9. Frascos de vidrio esterilizados utilizados para el almacenamiento.	38
Figura 10. Matraz antes y después de ser aforado.	40
Figura 11. Sistema de pirólisis en operación durante la degradación térmica del EPS.	44
Figura 12. Fracción líquida interna (L) obtenida tras la pirólisis del EPS.	45
Figura 13. Fracción líquida (C) formada por condensación de vapores durante la pirólisis del EPS.	45
Figura 14. Aceites pirolíticos del EPS en frascos de vidrio rotulados.	46
Figura 15. Densidades promedio grupos C y L.	47
Figura 16. Distribución del Grado API en los grupos experimentales C20, C30 y C40.	51
Figura 17. Distribución del Grado API en los grupos experimentales L20, L30 y L40.	52
Figura 18. Comparación del Grado API entre fracciones condensadas (C) y remanentes (L) obtenidas a diferentes tiempos de pirólisis.	54

Índice de tablas

Tabla 1. Normas aplicables para la caracterización de aceites y combustibles.	27
Tabla 2. Clasificación de grados API en comparación de los crudos.	42
Tabla 3. Grado API promedio y variabilidad de los aceites obtenidos en los diferentes grupos experimentales.	48
Tabla 4. Valores de Grado API y clasificación de los aceites obtenidos.	49

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

Resumen

El Poliestireno Expandido (EPS) o unicel representa un desafío ambiental significativo debido a su baja tasa de reciclaje y alta acumulación, impulsando la búsqueda de alternativas de valorización. Este proyecto tuvo como objetivo determinar el Grado API de los aceites obtenidos mediante la pirólisis de EPS, evaluando la influencia del tiempo de residencia en el reactor. La metodología empleó un reactor pirolítico tipo *batch*, realizando ensayos a 20, 30 y 40 minutos. Los productos líquidos se separaron en fracciones condensadas (C) e internas (L), y se caracterizó su densidad para el cálculo del Grado API estandarizado. Los resultados refutaron la hipótesis inicial, pues el Análisis de Varianza (ANOVA) demostró que el tiempo de pirólisis no tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre el Grado API en ninguna de las fracciones (C: $p = 0.4991$; L: $p = 0.9292$). Sin embargo, se encontraron diferencias altamente significativas entre las fracciones de origen ($p < 0.001$). La fracción C concentró los aceites más ligeros (18.50–20.25° API), clasificándose como crudos pesados a medianos, mientras que la fracción L retuvo compuestos más pesados (10.99–11.36° API), clasificados como **crudos** pesados a extrapesados. Se concluye que los aceites pirolíticos de EPS son comparables con crudos nacionales como el Maya o el Altamira, con uso potencial como asfalto o combustible pesado. La optimización del proceso debe enfocarse en maximizar la eficiencia de condensación de la fracción ligera (C) y explorar el uso de catalizadores.

Abstract

Expanded Polystyrene (EPS), commonly known as Styrofoam, represents a significant environmental challenge due to its low recycling rate and high accumulation, driving the search for valorization alternatives. This project aimed to determine the API Gravity of oils obtained from the pyrolysis of EPS, and to evaluate the influence of reactor residence time. The methodology employed a batch-type pyrolytic reactor, conducting trials at 20, 30, and 40 minutes. The liquid products were separated into condensed (C) and internal (L) fractions, and their densities were characterized for standardized API Gravity calculation.

The results refuted the initial hypothesis, as the Analysis of Variance (ANOVA) showed that pyrolysis time had no statistically significant effect on the API Gravity of any fraction (C: $p = 0.4991$; L: $p = 0.9292$). However, highly significant differences were found between the original fractions ($p < 0.001$). The C fraction concentrated lighter oils (18.50–20.25° API), classified as heavy to medium crude oils, while the L fraction retained heavier compounds (10.99–11.36° API), classified as heavy to extra-heavy crudes. It is concluded that EPS pyrolytic oils are comparable to national crude oils such as *Maya* or *Altamira*, with potential applications as asphalt or heavy fuel. Process optimization should focus on maximizing the condensation efficiency of the light fraction (C) and exploring the use of catalysts.

Palabras clave: Poliestireno Expandido Pirólisis, Grado API, Aceites Pirolíticos, Valorización.

Introducción

El poliestireno es el polímero base a partir del cual se produce el poliestireno expandido (EPS), un tipo de plástico celular rígido (RCPS). En el ámbito geotécnico se distinguen dos variantes principales: el EPS y el poliestireno extruido (XPS). El primero se fabrica mediante fusión térmica de partículas y suele ser de color blanco, aunque en algunos países se le añade color con fines comerciales. Por su parte, el XPS se obtiene mediante un proceso continuo que genera una estructura celular homogénea y, generalmente, presenta coloración desde su fabricación (García et al., 2023).

El EPS es un material ligero y resistente ampliamente utilizado en la construcción por sus propiedades de aislamiento térmico y acústico (Plastics Technology México, 2024). Se fabrica a partir de pequeñas perlas de poliestireno que se expanden hasta 40 veces su tamaño original mediante la aplicación de vapor, formando una espuma rígida y ligera. Este material está compuesto en un 98 % por aire, lo que le confiere su capacidad de aislamiento y de absorción de impactos (Rojas, 2023).

No obstante, su uso mayoritariamente desechable en embalajes y productos alimenticios ha derivado en su acumulación en ríos, mares y otros ecosistemas, afectando gravemente a la fauna (Mendiola, 2023).

El EPS es un material no biodegradable cuya producción mundial supera los tres millones de toneladas anuales, con una tasa de crecimiento aproximada del 6 %. Este incremento sostenido refleja su alta demanda industrial, pero también evidencia su impacto ambiental negativo (García, 2019). Aunque existen métodos térmicos y químicos para su reciclaje, estos últimos suelen implicar el uso de disolventes peligrosos (Martínez & Laines, 2013).

Esta tesis tiene como objetivo determinar el grado API de los aceites obtenidos mediante pirólisis de EPS, evaluando la influencia de la temperatura del proceso en sus propiedades. Se analizarán las posibles aplicaciones de estos aceites, considerando su potencial uso como combustible o como materia prima en la industria.

El proceso de pirólisis desempeña un papel fundamental en la transición hacia una economía circular, ya que permite transformar residuos plásticos en productos de valor

agregado, cerrando así el ciclo de vida de los materiales y reduciendo la dependencia de recursos fósiles. Además, la generación de energía a partir de residuos contribuye a la descarbonización de la matriz energética, ayudando a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este método promueve modelos de negocio circulares en los cuales los productos obtenidos pueden utilizarse como materias primas en otras industrias.

Actualmente, la pirólisis se considera una de las principales técnicas de reciclaje químico para recuperar compuestos de alto valor añadido, complementando los procesos mecánicos existentes. Es un proceso termoquímico que transforma térmicamente materiales orgánicos —e incluso algunos inorgánicos— en ausencia total o con un suministro limitado de oxígeno (Instituto Tecnológico del Plástico, 2023).

Se caracteriza por operar sin oxígeno externo, limitándose al contenido propio del material tratado. Este proceso funciona a temperaturas que oscilan entre los 300 °C y 800 °C, menores que las de la gasificación (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s. f.). Los productos obtenidos se clasifican en tres fases: sólidos (carbón o *char*), líquidos (alquitranes) y gaseosos (vapores pirolíticos) (Centro Europeo de Postgrado, s. f.).

El aceite pirolítico derivado del EPS constituye una fuente de hidrocarburos con aplicaciones prometedoras como combustible alternativo o insumo para la síntesis de nuevos productos químicos. La pirólisis, además de reducir la acumulación de residuos plásticos, ofrece una alternativa sostenible para la producción de energía y materiales, impulsando la economía circular. Este proceso también promueve una gestión más eficiente de los residuos y reduce el impacto ambiental, aportando beneficios tanto para la industria como para el medio ambiente.

Marco teórico

Introducción al problema

El poliestireno expandido (EPS), conocido comúnmente como unicel, es un material plástico ampliamente utilizado en envases y embalajes, cuya disposición final representa un reto ambiental significativo debido a su escasa degradabilidad y a su acumulación en ecosistemas y vertederos. La pirólisis ha surgido como una alternativa viable para la valorización de este residuo, ya que permite su conversión en productos líquidos con potencial energético, como los aceites pirolíticos. Sin embargo, la calidad de estos aceites depende en gran medida de sus propiedades fisicoquímicas, siendo el grado API un parámetro esencial para determinar su densidad y posible aplicación como combustible.

Contaminación por residuos plásticos

Los plásticos tardan alrededor de 180 años en degradarse y son utilizados en las industrias; en la vida cotidiana, son productos con una capacidad limitada de autodestrucción. En consecuencia, permanecen durante muchos años como residuos (López-Aguirre et al., 2021).

Su fragmentación, provocada por procesos mecánicos como el oleaje y el viento, o por la radiación UV, da lugar a microplásticos que afectan a más de 700 especies, desde el plancton hasta grandes mamíferos como la ballena azul. En ambientes terrestres, los microplásticos en suelos alteran la biología de organismos como las lombrices, disminuyendo su peso y esperanza de vida, lo que afecta la salud del suelo y, por ende, la agricultura. En México, país con alta producción agroalimentaria, esto representa una amenaza para la seguridad alimentaria.

Seis de las siete especies de tortugas marinas del mundo habitan en México y todas se encuentran en alguna categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010. Una de cada tres tortugas muere por ingerir plásticos, y cuando se consumen más de 14 fragmentos, la mortalidad alcanza el 50 %. Esta crisis también afecta a más de 100 000 mamíferos marinos al año, así como al 90 % de las aves marinas, que presentan signos de inanición o toxicidad tras consumir plástico. A nivel global, se estima que para 2050

la producción de plásticos podría representar hasta el 20 % del consumo total de petróleo, lo que agravará la crisis climática (Rivas & Ornela, 2021).

Problemática causada por el poliestireno expandido

El EPS es un material no biodegradable, ya que no ofrece sustrato nutritivo para los microorganismos. En el ambiente natural, se descompone en micropartículas que terminan en cuerpos de agua, donde afecta gravemente a la fauna marina. Su descomposición puede demorar varios siglos y contribuir a la formación de “islas de basura”.

El componente básico del unicel es el estireno, un químico catalogado como cancerígeno, ya que al entrar en contacto con el calor emite una serie de compuestos químicos dañinos para la salud. Lo preocupante es que, para los próximos años, la industria del plástico espera duplicar sus cifras. Lamentablemente, sólo el 9 % de este material se ha reciclado y el 12 % ha sido incinerado, con las complicaciones ambientales que esto conlleva. El 79 % del plástico producido desde 1950 ha terminado en rellenos sanitarios, sin ningún tipo de valorización o recuperación. Esto ha generado la acumulación de más de 12.7 millones de toneladas de plásticos en los océanos, afectando a mamíferos marinos, aves y corales (Ramírez & García, 2022).

Alternativas de valorización y reciclaje del unicel

Actualmente se investigan nuevas técnicas para el reciclaje de plásticos, especialmente del EPS, con el fin de mitigar su impacto ambiental. Las estrategias incluyen reciclaje químico, mecánico y térmico. El reciclaje químico, como la pirólisis, transforma el EPS en materias primas o adhesivos, aunque su aplicación en envases alimentarios está restringida. El reciclaje mecánico es el más común e implica separación, limpieza y molienda de residuos para obtener pellets reutilizables. En cuanto al reciclaje térmico, este consiste en la combustión del material para generar dióxido de carbono, agua y cenizas. Estas técnicas son fundamentales para reducir el volumen de residuos, avanzar hacia una economía circular y mejorar la sostenibilidad en la gestión de plásticos (Ramos et al., 2022).

Pirólisis como tecnología de valorización

La pirólisis es actualmente una de las técnicas más prometedoras para el tratamiento del EPS. Este proceso térmico descompone los residuos en ausencia de oxígeno para producir aceites, gases y monómeros con valor comercial. Para su eficiencia, requiere una selección cuidadosa del tipo de reactor y catalizador, los cuales influirán en la temperatura y en la calidad de los productos generados. Se han estudiado diversos diseños de reactores, como discontinuos, de lecho fijo, de flujo continuo y presión. También se han propuesto mezclas de plásticos, cartuchos y aditivos para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los productos líquidos obtenidos.

El uso de catalizadores ácidos y básicos ha demostrado ser eficaz en la mejora del rendimiento, selectividad y costos de producción. La elección de la tecnología de valorización debe considerar tanto los aspectos económicos y de eficiencia energética como los criterios de sostenibilidad ambiental (Ibrahim, 2021).

La pirólisis es un proceso termoquímico que consiste en la división de materiales orgánicos —e incluso algunos inorgánicos— mediante la aplicación de calor en condiciones de ausencia total o limitada de oxígeno. Este tratamiento se realiza a temperaturas que generalmente superan los 400 °C, y como resultado se obtienen productos en tres estados: gas, líquido y sólido, todos con alto contenido energético (Vilca et al., 2022).

Además de permitir la valorización de residuos, la pirólisis facilita su almacenamiento y transporte eficiente, representando una alternativa rentable frente a otras tecnologías. Por su bajo costo operativo y de mantenimiento, ha sido reconocida como una de las opciones más sostenibles para el aprovechamiento de residuos sólidos (Wildor et al., 2021).

Tipos de pirólisis

Desde el punto de vista operativo, la pirólisis puede clasificarse en tres tipos principales: pirólisis convencional, instantánea y rápida. En todos los casos, los sistemas utilizados comparten similitudes con los empleados en procesos de gasificación, utilizando hornos rotatorios, lechos fijos, móviles o fluidizados. La pirólisis convencional en continuo emplea reactores de lecho móvil o rotatorio, e incluso hornos de parrilla, operando bajo modalidades autotérmicas (autoalimentadas) o alotérmicas (con energía externa).

En la pirólisis instantánea, una de las configuraciones más eficientes es el lecho fluidizado en dos etapas. Aquí, un sólido inerte se calienta mediante combustión en una primera cámara, transfiriendo el calor a una segunda cámara donde ocurre la descomposición del material. Esta modalidad es especialmente efectiva para la producción de carbón activado.

Por otro lado, la pirólisis rápida incluye tecnologías como sistemas de polvo en suspensión y reactores neumáticos, que permiten una conversión veloz y eficiente de los residuos (Castells & Velo, 2012).

Aceites pirolíticos obtenidos de residuos plásticos

El aceite pirolítico se produce mediante la pirólisis, un proceso termoquímico en el que los residuos plásticos, como el poliestireno expandido, se descomponen a altas temperaturas, generalmente entre 400 °C y 800 °C, en condiciones de ausencia o suministro limitado de oxígeno. Durante este proceso, los materiales orgánicos se transforman en energía en forma de aceite líquido y en productos de valor agregados como el carbón. La cantidad y calidad del aceite generado depende de diversos factores, tales como la temperatura, el tiempo de reacción, la velocidad de calentamiento, el tamaño de las partículas, la composición de la materia prima y su contenido de humedad (Miandad et al., 2016).

Propiedades fisicoquímicas de los aceites derivados de la pirólisis

Los aceites pirolíticos obtenidos del EPS poseen características fisicoquímicas que los hacen viables como combustibles alternativos. Uno de los parámetros más relevantes es el poder calorífico, que representa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una unidad de masa del combustible. Estos aceites muestran un poder calorífico elevado, en un rango de 40–45 MJ/kg, comparable con el de la gasolina (42.5 MJ/kg) y el diésel (43 MJ/kg), lo que los hace aptos para su uso en motores de combustión interna y generación eléctrica.

Otra propiedad fundamental es la densidad. En aplicaciones como la inyección de combustible, que se realiza en función del volumen, las variaciones en la densidad afectan directamente el rendimiento del motor, por lo que se prefiere el uso de sistemas gravimétricos para una medición más precisa del consumo. Relacionado con la densidad, los grados API (American Petroleum Institute) son un parámetro ampliamente utilizado para clasificar combustibles líquidos en función de su comportamiento ante diferentes procesos industriales.

Asimismo, la viscosidad cinemática influye directamente en la atomización del combustible durante su inyección. Una viscosidad adecuada permite una mejor pulverización y combustión, siendo esencial tanto para motores como para procesos térmicos. En combustibles como el diésel, también cumple una función lubricante que protege los componentes del sistema.

Otros indicadores importantes son el número de octano y el número de cetano, que reflejan el comportamiento del combustible en motores de gasolina y diésel, respectivamente. Mientras que el octanaje indica la resistencia a la detonación, el cetano mide el tiempo de retardo en la ignición. Ambos parámetros impactan directamente en el rendimiento del motor y en la generación de emisiones.

En cuanto a la temperatura de inflamación, esto representa el punto mínimo de temperatura al que los vapores del aceite se encienden en contacto con una fuente de calor, siendo clave para la seguridad en su almacenamiento y transporte. Finalmente, el punto de nube y el punto de fluidez determinan el comportamiento del combustible en

ambientes fríos. El primero marca la temperatura a la que comienzan a formar cristales de cera, y el segundo, la mínima a la que el aceite mantiene su fluidez (Flores et al., 2022).

Grado API y su importancia en la caracterización de aceites

El grado API es clave para entender la calidad de un aceite y su posible uso. Gracias a esta medida, es más fácil saber cómo manejar, transportar y utilizar el aceite. También permite comparar aceites obtenidos de procesos como la pirólisis con los combustibles comunes, lo que ayuda a encontrar nuevas formas de aprovechar estos materiales y reducir el impacto ambiental.

Definición del grado API

La gravedad API es un parámetro utilizado para expresar la densidad de los hidrocarburos, comparando su masa específica con la del agua bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Esta medida permite clasificar los petróleos crudos y sus derivados en diferentes categorías, desde superligeros hasta extrapesados. En términos generales, un valor alto de grados API corresponde a un hidrocarburo menos denso y menos viscoso, lo cual facilita su transporte y procesamiento. Por el contrario, valores bajos indican productos más pesados que presentan mayor viscosidad y requieren tratamientos previos, dificultando su traslado a través de ductos (Rueda et al., 2023).

Clasificación de los hidrocarburos según su grado API y densidad

Los hidrocarburos se clasifican de acuerdo con su grado API, lo que permite estimar su densidad y facilidad de procesamiento. Esta clasificación se divide en cuatro categorías principales:

- Crudo liviano (API > 31.1): Está compuesto por hidrocarburos de bajo peso molecular, lo que facilita su refinación. Se utiliza principalmente para la obtención de gasolina, queroseno y diésel.
- Crudo mediano (API entre 22.0 y 29.9): Contiene una combinación de hidrocarburos ligeros e intermedios, lo que lo hace útil para la producción de combustibles y como materia prima en la fabricación de polímeros.

- Crudo pesado (API entre 10.0 y 21.9): Presenta una mayor densidad y viscosidad, lo que complica su procesamiento. Su uso se destina principalmente a la elaboración de aceites lubricantes, parafinas y polímeros ciertos.
- Crudo extrapesado (API ≤ 10): Se caracteriza por su alta viscosidad y dificultad para el transporte. Se emplea en la producción de asfaltos, betunes y combustibles con baja volatilidad (Rueda et al., 2023).

Normatividad y estándares aplicables

La caracterización de aceites y combustibles requiere la aplicación de normativas y estándares técnicos reconocidos, que establezcan los métodos para evaluar propiedades fisicoquímicas esenciales como densidad, viscosidad, poder calorífico y punto de inflamación. Estas regulaciones aseguran que los análisis sean precisos, confiables y comparables, además de garantizar la seguridad en el manejo, almacenamiento y uso de estos productos. Cumplir con estas normas es fundamental para asegurar que los combustibles cumplan con los requisitos técnicos y ambientales necesarios para su comercialización y aplicación industrial.

Normas para la caracterización de aceites y combustibles

La caracterización de aceites y combustibles se rige por normas nacionales e internacionales que garantizan la calidad del producto, su seguridad y su compatibilidad ambiental. Estas normas definen metodologías precisas para la evaluación de propiedades fisicoquímicas, lo que permite su correcta aplicación en los sectores energético e industrial.

A continuación, en la Tabla 1 se enumeran las principales normas aplicables:

Tabla 1. Normas aplicables para la caracterización de aceites y combustibles.

Norma	Tipo	Descripción
ASTM D1298	Internacional	Determinación de la densidad, gravedad específica y gravedad API mediante hidrómetro.
NOM-016-CRE-2016	Nacional	Especificaciones de calidad de petrolíferos en México.
ASTM D97	Internacional	Determinación del punto de fluidez de productos petrolíferos.
ASTM D240	Internacional	Determinación del poder calorífico mediante bomba calorimétrica.
ISO 3675:1998	Internacional	Determinación de la densidad con hidrómetro en laboratorio.
ISO 3170:2004	Internacional	Procedimientos para el muestreo manual de líquidos derivados del petróleo.

Comparación del grado API de aceites pirolíticos con combustibles convencionales

La pirólisis de residuos plásticos, como los provenientes de productos electrónicos, genera aceites con grados API superiores a 10, lo que indica que su densidad es menor que la del agua. Estos productos suelen clasificarse como crudos pesados, con grados API que oscilan entre 10 y 15, lo que los posiciona dentro de un rango adecuado para aplicaciones industriales, particularmente en la producción de combustibles pesados.

Por otro lado, los crudos extraídos en México presentan una gama más amplia de clasificaciones según su grado API. Por ejemplo, el crudo Olmeca se considera liviano (38–39 °API), el Istmo es un crudo mediano (32–33 °API), el Maya se clasifica como pesado (21–22 °API) y el Altamira como extrapesado (15–16.5 °API). En este contexto, los aceites obtenidos por pirólisis muestran una mayor similitud con los crudos pesados nacionales, especialmente con el Altamira y el Talam (16 °API), que suelen destinarse a

la elaboración de asfaltos y otros productos de baja volatilidad (NOVAOIL, 2021; Quiroga et al., 2022).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

Justificación

El crecimiento acelerado en el consumo de plásticos, junto con su inadecuada disposición final, ha generado un problema ambiental de gran magnitud. Entre estos residuos, el poliestireno expandido (EPS) se distingue por su baja tasa de reciclaje, atribuida a su estructura de baja densidad y las dificultades que presenta para ser reincorporado en procesos industriales convencionales. Como consecuencia, grandes volúmenes de unícel se acumulan en vertederos o se dispersan en el medio ambiente, contribuyendo a la contaminación de ecosistemas y al deterioro de la biodiversidad.

Frente a este escenario, la pirólisis se plantea como una alternativa tecnológica viable y sustentable para la valorización del EPS, ya que permite su transformación en productos de valor agregado, como aceites pirolíticos con potencial energético. Sin embargo, para evaluar su viabilidad como combustible, es indispensable caracterizar sus propiedades, siendo el grado API un parámetro fundamental para determinar su densidad, calidad y posibles aplicaciones energéticas.

Este estudio adquiere relevancia al analizar la influencia del tiempo de residencia en el reactor durante el proceso de pirólisis en el grado API de los aceites obtenidos, generando información clave para optimizar dicha conversión. Los resultados permitirán fortalecer estrategias de gestión sostenible de residuos plásticos, impulsando la economía circular y fomentando el desarrollo de combustibles alternativos con características adecuadas para su aprovechamiento energético en distintos sectores.

Además, la investigación contribuirá al conocimiento científico en el campo de la ingeniería ambiental, ofreciendo un referente para futuros estudios que busquen mejorar la eficiencia de la pirólisis y sus aplicaciones energéticas. De esta manera, no solo se aborda un problema ambiental urgente, sino que también se promueve la innovación tecnológica y el aprovechamiento responsable de recursos, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y transición hacia energías más limpias.

Pregunta de investigación

¿Cuál es el grado API de los aceites obtenidos por pirólisis de EPS y de qué manera influye la temperatura del proceso en esta propiedad?

Hipótesis

La temperatura de pirólisis influye significativamente en el grado API de los aceites obtenidos del poliestireno expandido (unicel), de manera que un aumento en la temperatura del proceso produce aceites con menor densidad y, por ende, un mayor grado API, lo cual podría mejorar su potencial como combustible.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el efecto de la temperatura de operación en la pirólisis homogénea del poliestireno expandido sobre las propiedades del aceite producido.

Objetivos específicos

- Realizar la pirólisis del unicel a diferentes temperaturas y obtener los aceites resultantes.
- Determinar la densidad de los aceites pirolíticos obtenidos mediante pruebas experimentales.
- Calcular el grado API de los aceites pirolíticos y analizar su variabilidad en función de la temperatura del tiempo de permanencia en el reactor de pirólisis.

Metodología

Recolección y acondicionamiento del EPS

Se recolectaron bloques de poliestireno expandido (EPS) provenientes de embalajes de unidades de aire acondicionado en el Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos (CATRE) de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Se reunió un total de 1 kg de material, el cual fue sometido a inspección visual para verificar que se encontrara limpio y libre de etiquetas, suciedad u otros contaminantes.

Posteriormente, los bloques de EPS fueron triturados en la trituradora disponible en el CATRE, con el fin de reducir su tamaño y facilitar su manipulación en las etapas posteriores. Esta reducción de volumen permitió una distribución más homogénea del material dentro del reactor, además de optimizar su almacenamiento y transporte en el área de trabajo.

En la Figura 1 se muestra el equipo utilizado para la trituración del EPS. Se trata de una máquina semiautomática, alimentada con una fuente de energía eléctrica de 110 V, equipada con cuchillas giratorias que permiten una reducción eficiente del volumen del material y su adecuada preparación para los experimentos.



Figura 1. Trituradora de EPS semiautomática con fuente eléctrica de 110V.

Proceso de pirólisis.

Ubicación y características del sistema experimental.

El proceso de pirólisis se realizó en el Laboratorio Multifuncional de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol), específicamente en la Planta Piloto N.º 3, destinada al tratamiento atmosférico y de residuos sólidos.

En la Figura 2 se presenta la Planta Piloto N.º 3 de la DACBiol, donde se encuentran los equipos utilizados para dicho tratamiento.



Figura 2. Planta Piloto N.º 3 de la DACBiol.

En la planta se encuentra instalado un reactor pirolítico de tipo batch, fabricado en acero inoxidable y diseñado para operar bajo condiciones de atmósfera inerte.

En la Figura 3 se muestra el reactor pirolítico ubicado en la Planta Piloto N.º 3, el cual constituye el elemento central del sistema experimental y permite la conversión térmica del poliestireno expandido (EPS) mediante un proceso de pirólisis controlada.



Figura 3. Reactor pirolítico tipo batch.

Descripción del reactor pirolítico.

El reactor pirolítico utilizado en este estudio está construido en acero inoxidable y cuenta con una tapa superior tipo brida equipada con una válvula para la inyección de gases inertes. En este caso, se empleó nitrógeno con el objetivo de desplazar el oxígeno y garantizar un ambiente libre de combustión. Asimismo, dispone de una tapa roscable destinada a la introducción del material de alimentación.

El calentamiento del reactor se realizó mediante un mechero alimentado con gas LP, encargado de suministrar la energía térmica requerida para el proceso. El sistema se complementó con un condensador por choque térmico conectado a un tren de recolección conformado por dos frascos de vidrio: el primero para la condensación de vapores y el segundo como lavador destinado a retener compuestos residuales. Finalmente, se incorporó una línea de salida con válvula reguladora para la liberación controlada de los gases no condensables hacia la atmósfera.

En la Figura 4 se presenta el diagrama del sistema de pirólisis empleado, en el que se identifican los siguientes componentes: (a) tanque de nitrógeno, utilizado para desplazar el oxígeno y mantener una atmósfera inerte; (b) tanque de gas LP, que suministra el combustible necesario para el calentamiento; (c) hornilla, encargado de proporcionar la energía térmica al reactor; (d) reactor pirolítico, donde se lleva a cabo

la descomposición térmica del material; (e) condensador por choque térmico, que facilita la condensación de los vapores generados; (f) frasco de recolección de vapores condensables; (g) frasco de lavado de vapores, destinado a retener compuestos residuales no condensables; y (h) salida de gases no condensables hacia la atmósfera.

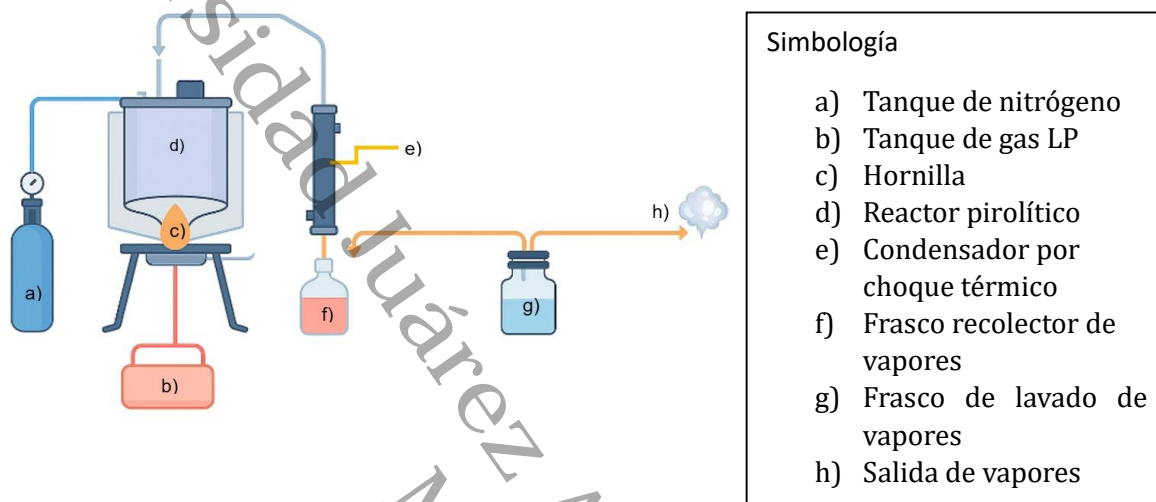


Figura 4. Diagrama del sistema de pirólisis y sus componentes principales.

Procedimiento experimental.

Las muestras de poliestireno expandido (EPS), previamente trituradas para facilitar su manipulación y garantizar una mayor uniformidad, fueron incorporadas manualmente al reactor, procurando una distribución homogénea en su interior. Esta condición resulta esencial para asegurar un calentamiento uniforme durante el proceso y minimizar posibles variaciones en el comportamiento del material. En cada ensayo se emplearon 60 g de EPS molido, cantidad seleccionada con el propósito de mantener la reproducibilidad de los resultados y reducir las variaciones asociadas al tamaño de la muestra.

En la Figura 5 se muestra el pesaje del EPS triturado previo a su incorporación al reactor. Este paso metodológico permitió verificar la exactitud de la masa utilizada en cada ensayo, constituyendo un control fundamental para mantener la consistencia experimental y asegurar la confiabilidad de las pruebas realizadas.



Figura 5. Pesaje de 60 g de EPS triturado.

En la Figura 6 se observa el reactor experimental durante la etapa de carga, con 60 g de EPS previamente triturado en su interior. La imagen muestra la disposición inicial del material antes de iniciar el proceso de pirólisis, asegurando una distribución homogénea dentro del reactor que favorece un calentamiento uniforme.



Figura 6. Carga del reactor con el EPS.

Se establecieron tres grupos experimentales definidos por diferentes tiempos de residencia del EPS en el reactor: 20, 30 y 40 minutos. Cada condición se replicó en cuatro ocasiones, obteniéndose un total de 12 muestras procesadas. Este diseño experimental permitió disponer de una base suficiente para realizar un análisis estadístico confiable de los resultados.

Posteriormente, el sistema se cerró y se purgó con nitrógeno durante 3 minutos, con el propósito de desplazar el oxígeno residual y evitar reacciones de combustión no deseadas. A continuación, se encendió el horno y la hornilla se mantuvo a fuego medio, favoreciendo un incremento gradual de la temperatura. A partir de este punto se inició el conteo del tiempo de residencia.

Monitoreo de temperatura y condiciones del proceso.

Durante cada ensayo, la temperatura fue monitoreada mediante una termocámara infrarroja marca MAKKA. Las mediciones se realizaron a intervalos de cinco minutos, desde el inicio hasta la finalización del proceso, registrando la temperatura inicial, la evolución térmica y la temperatura final de cada prueba. Esta metodología permitió obtener un registro detallado del perfil térmico correspondiente a cada condición experimental.

En la Figura 7 se presenta la termocámara infrarroja utilizada para el monitoreo de la temperatura durante los ensayos. Este equipo permitió registrar la temperatura inicial, su variación a lo largo del proceso y la temperatura final, con mediciones efectuadas a intervalos regulares de cinco minutos.



Figura 7. Termocámara infrarroja utilizada para el monitoreo de temperatura en los ensayos.

Los datos obtenidos se registraron de manera sistemática en una bitácora lo que permitió organizar y visualizar de forma clara la hora de inicio y finalización de cada ensayo, el número de intervalo correspondiente y las temperaturas medidas a lo largo del proceso.

Recolección de productos obtenidos.

Los productos generados durante la pirólisis fueron recuperados y clasificados en sus respectivas fracciones. La fracción líquida condensada se separó mediante decantación en un embudo de separación, mientras que los productos formados en el interior del reactor se recolectaron manualmente con ayuda de un embudo de vidrio.

La Figura 8 muestra la recuperación de la fracción líquida condensada obtenida durante la pirólisis del EPS mediante el uso de un embudo de separación.



Figura 8. Recuperación del aceite pirolítico mediante embudo de separación.

Posteriormente, ambos fueron transferidos a frascos de vidrio esterilizados con capacidad de 235 mL, debidamente rotulados para su posterior caracterización. Este procedimiento garantizó la adecuada conservación de las muestras, evitando contaminaciones y asegurando su integridad durante el manejo y almacenamiento. En cuanto a la fracción gaseosa, constituida por compuestos volátiles no condensables, fue liberada de manera controlada al finalizar el proceso.

En la Figura 9 se presentan los frascos de vidrio esterilizados empleados para la recolección y almacenamiento de los productos generados en el proceso experimental.



Figura 9. Frascos de vidrio esterilizados utilizados para el almacenamiento.

Caracterización de productos obtenidos.

Con el propósito de evaluar las propiedades fisicoquímicas de los aceites obtenidos a partir del proceso de pirólisis del EPS, se realizó su caracterización mediante la determinación de la densidad y el cálculo del grado API. La obtención de estos parámetros resulta esencial para comparar la calidad del aceite pirolítico con la de combustibles convencionales y para establecer su potencial de aplicación como fuente energética. El procedimiento se efectuó siguiendo el método indirecto propuesto por Rueda-Beauregard et al. (2023) para la determinación de la gravedad API en líquidos derivados del petróleo.

Determinación de la densidad.

La determinación de la densidad se efectuó mediante un método indirecto utilizando un matraz aforado de 5 mL, una balanza analítica, una pipeta, una propipeta y un termómetro. En primer lugar, se registró la masa del matraz aforado vacío. Posteriormente, se llenó con el producto líquido obtenido de la pirólisis, empleando la pipeta y la propipeta para garantizar la exactitud en la transferencia. Finalmente, se midió la temperatura del líquido con ayuda del termómetro.

La Figura 10 presenta el matraz volumétrico empleado durante la etapa de caracterización de los productos líquidos. En la imagen se observa el matraz vacío (izquierda) y posteriormente aforado con la fracción líquida obtenida de la pirólisis (derecha), lo que permitió preparar las muestras en condiciones estandarizadas para su análisis posterior.



Figura 10 Matraz antes y después de ser aforado.

Una vez completado el aforo, el matraz fue nuevamente pesado para obtener la masa total. La masa de la muestra se determinó como la diferencia entre la masa del matraz lleno y la del matraz vacío. Con este valor, y considerando el volumen conocido del matraz (5 mL), se calculó la densidad del líquido mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

dónde:

ρ : densidad de la muestra (g/mL)

m: masa de la muestra (g)

V: volumen del matraz (5 mL)

Este procedimiento se aplicó a todas las muestras experimentales y sus respectivas réplicas. Con el propósito de establecer puntos de referencia y generar una curva de tendencia, los aceites obtenidos a partir de la pirólisis fueron sometidos a diferentes tiempos de exposición térmica en baño maría: 0 minutos (temperatura ambiente), 6, 11, 16 y 21 minutos. Esta variación permitió evaluar los cambios en la densidad en función del incremento de la temperatura, cuyos valores fueron posteriormente empleados para la determinación del grado API.

Cálculo de grado API

A partir de los valores de densidad obtenidos para cada muestra y condición térmica, se determinó el grado API empleando la siguiente ecuación:

$$API = \frac{141.5}{\rho} - 131.5$$

El cálculo del grado API se efectuó para todos los grupos experimentales y sus respectivas réplicas: C20, C30 y C40, así como L20, L30 y L40. Para cada réplica se sustituyó en la fórmula correspondiente el valor de densidad previamente determinado. De este modo, se obtuvieron cuatro valores de grado API por réplica, correspondientes a los distintos tiempos de exposición considerados, ya que cada réplica contó con cuatro mediciones de densidad.

El grado API es un parámetro ampliamente utilizado en la industria petrolera para clasificar materiales en función de su densidad. Valores más elevados corresponden a muestras más ligeras, las cuales suelen presentar un mayor interés energético y comercial.

Cálculo de grado API real por réplica.

Con los cuatro valores de grado API obtenidos por réplica se elaboró una tabla individual, generando un total de 24 tablas. En cada una, la primera fila correspondió a la temperatura de medición, seguida de la temperatura corregida, calculada restando 15.6 °C con el fin de ajustar los datos a la condición estándar de 60 °F (15.6 °C). Esta corrección resultó necesaria debido a que el grado API varía en función de la temperatura: al incrementarse esta, la densidad del fluido disminuye y, en consecuencia, el valor de grado API aumenta. De este modo, la estandarización de los registros permitió eliminar las variaciones asociadas a las condiciones de medición y asegurar la comparabilidad de los resultados. Finalmente, en la columna siguiente se consignaron los valores de grado API correspondientes.

A partir de cada tabla se construyó una gráfica que relacionó la temperatura corregida con el valor del grado API. En estas gráficas se determinó la ecuación de la recta de

regresión y el coeficiente de determinación (R^2). El valor de la ordenada al origen de cada recta se consideró como el grado API real de la réplica correspondiente.

Cálculo de grado API por grupo experimental.

Los resultados se organizaron en tablas independientes para cada grupo experimental, en las que se especificó el tipo de grupo (C: condensables; L: líquidos), el número de réplica y el valor de grado API correspondiente. Adicionalmente, se calcularon la media aritmética y la desviación estándar de los valores obtenidos, con el fin de contar con parámetros estadísticos representativos que facilitarían la interpretación y comparación de los datos.

Clasificación de grado API por réplica y por grupo experimental.

Una vez obtenido el valor real del grado API para cada réplica y grupo experimental, se procedió a su clasificación de acuerdo con los rangos establecidos en la literatura para los diferentes tipos de crudo. Esta categorización permitió determinar si los aceites pirolíticos presentan características semejantes a un crudo ligero, mediano, pesado o extrapesado, lo cual resulta esencial para evaluar su potencial energético y sus posibles aplicaciones.

En la Tabla 2 se presentan los rangos correspondientes a cada categoría de crudo según la escala API.

Tabla 2. Clasificación de grados API en comparación de los crudos.

Crudo	Escala API
Ligero	30° - 40°
Mediano	22° - 29.9°
Pesado	10° - 21.9°
Extrapesado	Menos de 10°

Análisis aplicados

Con el propósito de identificar diferencias significativas entre los grupos experimentales y garantizar la validez de los resultados, se aplicaron pruebas estadísticas considerando los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Prueba de normalidad y análisis de varianza (ANOVA)

El cumplimiento del supuesto de normalidad se evaluó inicialmente mediante la prueba de Shapiro-Wilk en el software *Statgraphics*, confirmándose que los datos de los seis grupos experimentales seguían una distribución normal. Posteriormente, se verificó la homocedasticidad y, con base en ello, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos.

Análisis post hoc

Una vez identificadas diferencias significativas en el ANOVA, se realizó un análisis *post hoc* empleando el software *SigmaPlot*. Este procedimiento permitió efectuar comparaciones detalladas entre los grupos experimentales, confirmándose previamente los supuestos de normalidad y homocedasticidad para garantizar la validez de la comparación múltiple.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la pirólisis del poliestireno expandido a diferentes temperaturas. Se incluyen la descripción de los productos generados, la caracterización del aceite pirolítico mediante densidad y grados API, así como los análisis estadísticos que permiten establecer la significancia de las diferencias observadas entre los grupos experimentales.

En la Figura 11 se presenta el sistema de pirólisis en operación, donde se observa el reactor en funcionamiento y la generación de vapores durante la degradación térmica del EPS. La imagen ilustra el desarrollo del procedimiento experimental.



Figura 11. Sistema de pirólisis en operación durante la degradación térmica del EPS.

Productos obtenidos de la pirólisis

La pirólisis del poliestireno expandido generó productos diferenciados en dos fracciones principales: líquida y gaseosa. A la fracción líquida se le denominó **aceite pirolítico**, la cual estuvo conformada por dos tipos: el aceite condensado (C), obtenido a partir de la condensación de los vapores liberados durante el proceso, y el aceite líquido interno (L), formado directamente en el interior del reactor. Por su parte, la fracción gaseosa se constituyó por vapores y compuestos volátiles no condensables.

En la Figura 11 se presentan los aceites pirolíticos recuperados en el interior del reactor tras la degradación térmica del EPS se acumulan predominantemente en la zona inferior del sistema. Este comportamiento se atribuye a la condensación parcial de los

vapores generados durante la pirólisis, la cual ocurre al entrar en contacto con superficies internas del reactor a menor temperatura, así como a los fenómenos de transferencia de calor y masa que rigen el flujo y enfriamiento de los compuestos volátiles (Maafa, 2021)



Figura 12. Fracción líquida interna (L) obtenida tras la pirólisis del EPS.

En la Figura 13 se muestran los aceites pirolíticos obtenidos a partir de la condensación de los vapores liberados durante el proceso de pirólisis. Esta fracción líquida fue recuperada mediante el sistema de condensación acoplado al reactor, el cual permitió la separación eficiente de los compuestos volátiles condensables.



Figura 13. Fracción líquida (C) formada por condensación de vapores durante la pirólisis del EPS.

En la Figura 14 se presentan las fracciones líquidas obtenidas de la pirólisis del EPS, almacenadas en frascos de vidrio. Las muestras se encuentran rotuladas según las

condiciones experimentales correspondientes, lo que evidencia la organización aplicada para su identificación y análisis posterior.



Figura 14. Aceites pirolíticos del EPS en frascos de vidrio rotulados.

Se observó que el aspecto de los aceites pirolíticos obtenidos varió en función de su origen. El aceite condensado (C) presentó una tonalidad ámbar, acompañado de una alta viscosidad y un olor característico similar al de los combustibles. En contraste, el aceite líquido interno (L), formado en el interior del reactor, mostró una coloración marrón oscuro, con menor viscosidad y un olor semejante, aunque de mayor intensidad.

Caracterización del aceite pirolítico

Densidad experimental

En la **Tabla 3** se muestran las densidades promedio de los aceites obtenidos en las primeras cuatro réplicas con 20 minutos de tiempo de pirólisis, diferenciados en aceite condensado (C) y aceite líquido interno (L), bajo las distintas condiciones de temperatura evaluadas.

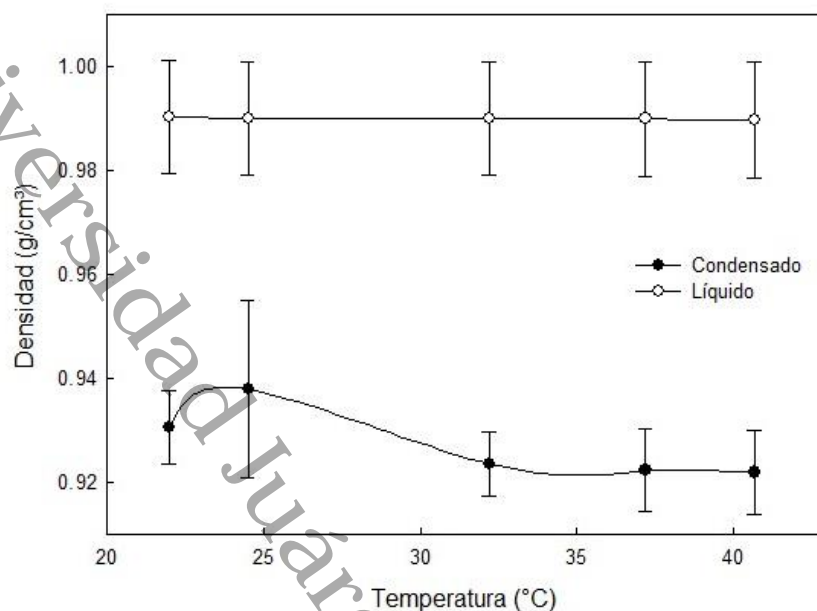


Figura 15. Densidades promedio grupos C y L.

Por lo tanto, se observa que la densidad promedio de los aceites condensados (C) presentó una ligera variación con el incremento de la temperatura de medición. A 22 °C se obtuvo un valor de 0.93053 g/mL, alcanzando un máximo en 24.5 °C (0.93800 g/mL) y posteriormente mostrando una tendencia decreciente hasta 0.92195 g/mL a 40.7 °C. Esta reducción sugiere que, al aumentar la temperatura de medición, los aceites condensados tienden a comportarse como fracciones de menor peso molecular y mayor volatilidad.

En contraste, la fracción líquida interna (L) presentó valores prácticamente constantes en todo el rango evaluado (0.98978–0.99037 g/mL), lo que indica que su composición permaneció estable y no se vio significativamente afectada por las variaciones de temperatura. En conjunto, los resultados reflejan un comportamiento diferencial entre ambas fracciones, ya que mientras los aceites condensados son sensibles a la temperatura de medición y tienden a disminuir su densidad, los líquidos retenidos dentro del reactor mantienen una densidad más constante.

Cálculo de grados API

La Tabla 4 muestra los valores de grado API de los seis grupos experimentales (C20, C30, C40, L20, L30 y L40), con sus respectivas medias y desviaciones estándar

Tabla 3. Grado API promedio y variabilidad de los aceites obtenidos en los diferentes grupos experimentales.

<i>Réplica</i>	<i>C20</i>	<i>C30</i>	<i>C40</i>	<i>L20</i>	<i>L30</i>	<i>L40</i>
<i>1</i>	21.664	22.106	17.364	9.216	11.694	10.682
<i>2</i>	19.285	19.384	21.240	11.848	10.952	13.582
<i>3</i>	19.561	15.852	19.039	10.762	13.044	10.305
<i>4</i>	20.480	16.674	21.703	12.122	9.735	10.513
<i>Media</i>	20.25	18.50	19.84	10.99	11.36	11.27
<i>Desviación estándar</i>	1.07	2.84	2.02	1.32	1.39	1.55

Los valores de grado API obtenidos muestran que los grupos C20, C30 y C40 presentaron promedios en el rango de 18.50 a 20.25, siendo el grupo C20 el que alcanzó el valor promedio más alto (20.25), mientras que C30 presentó el más bajo (18.50) y también la mayor variabilidad (desviación estándar de 2.84).

Por su parte, los grupos L20, L30 y L40 registraron valores promedio menores, en un rango de 10.99 a 11.36, con variabilidad relativamente baja, reflejada en desviaciones estándar entre 1.32 y 1.55.

En conjunto, se observa una diferencia clara entre los grupos C y L, ya que los primeros alcanzaron valores promedio más elevados de grado API, mientras que los segundos mostraron valores notablemente más bajos y con menor dispersión.

Clasificación de grados API

En la Tabla 5 se presentan los valores de **grado API** obtenidos en cada réplica experimental, junto con su clasificación (extrapesado, pesado o mediano). Los resultados se organizan de acuerdo con los grupos experimentales C y L,

correspondientes a las fracciones condensadas y las que permanecieron en el reactor, respectivamente. En cada caso se evaluaron tres condiciones de tiempo de pirólisis (20, 30 y 40 minutos).

Tabla 4. Valores de grado API y clasificación de los aceites obtenidos.

<i>Grupo experimental</i>	<i>Réplica 1</i>	<i>Réplica 2</i>	<i>Réplica 3</i>	<i>Réplica 4</i>
<i>C20</i>	21.664	19.285	19.561	20.480
	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)
<i>C30</i>	22.106	19.384	15.852	16.674
	(Mediano)	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)
<i>C40</i>	17.364	21.240	19.039	21.703
	(Mediano)	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)
<i>L20</i>	9.216	11.848	10.762	12.122
	(Extrapesado)	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)
<i>L30</i>	11.694	10.952	13.044	9.735
	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)	(Extrapesado)
<i>L40</i>	10.682	13.582	10.305	10.513
	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)	(Pesado)

Los valores de **Grado API** obtenidos indican que la mayoría de los aceites generados durante la pirólisis se clasifican como **pesados**, con algunas variaciones hacia las categorías de **extrapesado** y **mediano** según la fracción y el tiempo de reacción. En los grupos **C** (fracciones condensadas) se observa una mayor dispersión de los valores, alcanzando clasificaciones que van de pesado a mediano, lo que sugiere que en esta condición se concentran compuestos con distinta densidad. En contraste, los grupos **L** (fracciones que permanecieron en el reactor) se ubican principalmente en las categorías de **pesado** y **extrapesado**, reflejando la presencia de compuestos de mayor densidad que no se condensan fácilmente.

La comparación entre los tiempos de pirólisis (20, 30 y 40 minutos) muestra que no ocurren cambios drásticos en la clasificación general de los aceites, aunque sí se presentan fluctuaciones en los valores de Grado API entre réplicas. Esto se asocia a la dinámica propia del proceso, en el que los productos volátiles generados no siempre se condensan con la misma rapidez ni en la misma proporción, debido a la cinética de descomposición del poliestireno y a las condiciones de enfriamiento aplicadas.

Análisis estadístico

Para complementar el análisis de los valores de Grado API obtenidos, se realizaron pruebas estadísticas orientadas a verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad y a determinar si existían diferencias significativas entre los grupos experimentales. De esta manera, se aplicó la prueba de normalidad y, posteriormente, un análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados numéricos se presentan en forma de tablas y gráficas. Estos análisis permiten establecer si las variaciones observadas entre las diferentes condiciones de tiempo y fracción corresponden únicamente a la variabilidad experimental o si reflejan diferencias estadísticamente significativas.

Prueba de normalidad y análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) aplicado a los valores de Grado API de los grupos C20, C30 y C40 no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las medias ($F = 0.75$; $p = 0.4991$). Este resultado indica que, aunque los promedios oscilaron entre 18.50 °API y 20.25 °API, dichas variaciones corresponden a la variabilidad experimental y no a un efecto del tiempo de pirólisis.

La prueba de homogeneidad de varianzas de Levene ($p = 0.1073$) confirmó que las dispersiones entre grupos son comparables, validando el uso del ANOVA. De manera complementaria, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($p = 0.6677$) y la prueba de medianas de Mood ($p = 0.368$) respaldaron que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Asimismo, la comparación múltiple de medias agrupó a los tres tiempos de pirólisis dentro de un mismo grupo homogéneo.

En conjunto, estos resultados muestran que, para las fracciones condensadas (grupo C), los tiempos de pirólisis de 20, 30 y 40 minutos no ejercen un efecto estadísticamente

significativo sobre el valor de Grado API, manteniéndose todos dentro del rango característico de aceites pesados.

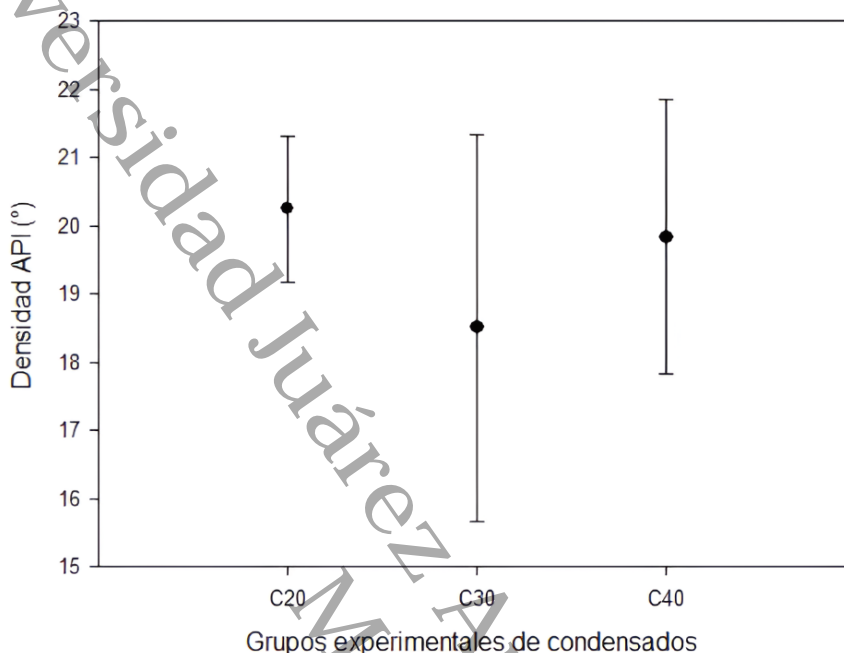


Figura 16. Distribución del Grado API en los grupos experimentales C20, C30 y C40.

Por otra parte, el análisis de varianza aplicado a los valores de Grado API del grupo L (fracciones que permanecieron en el reactor) mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de pirólisis de 20, 30 y 40 minutos ($F = 0.07$; $p = 0.9292$). Las medias obtenidas fueron muy similares, con valores que oscilaron entre 10.99 y 11.36 grados API, lo que evidencia que el tiempo de reacción no influyó de manera significativa en esta fracción.

La prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas ($p = 0.9443$), validando el ANOVA, mientras que las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis ($p = 0.926$) y de la mediana de Mood ($p = 0.368$) coincidieron en que no se presentan diferencias significativas entre los tratamientos. De igual forma, la comparación múltiple de medias agrupó a L20, L30 y L40 en un mismo conjunto homogéneo.

En conjunto, estos resultados indican que para las fracciones no condensadas el valor de Grado API se mantiene prácticamente constante e independiente del tiempo de pirólisis, clasificándose en todos los casos como aceites pesados o extrapesados.

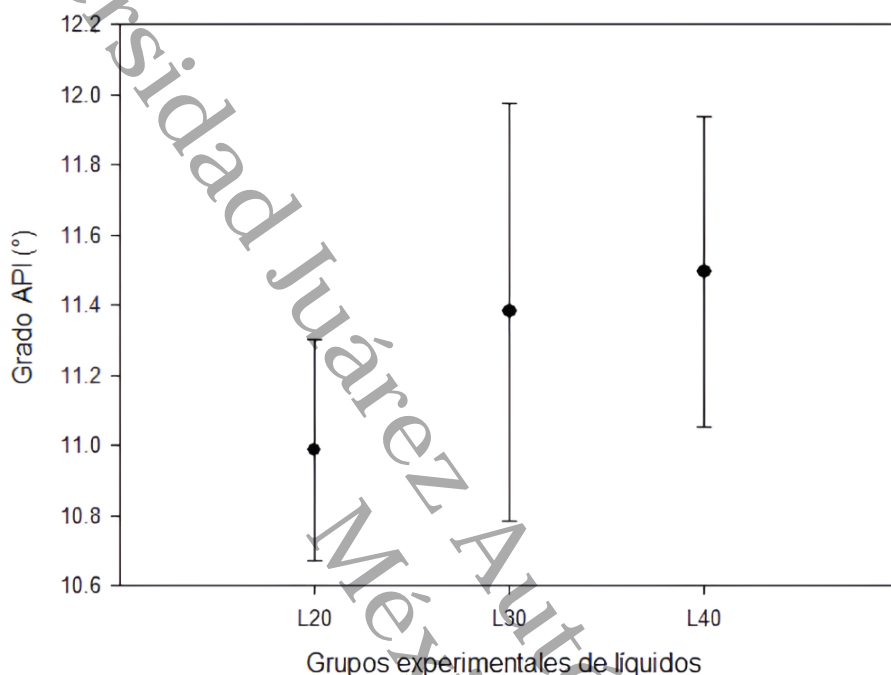


Figura 17. Distribución del Grado API en los grupos experimentales L20, L30 y L40.

Al comparar los resultados obtenidos en ambos grupos experimentales, se observa que tanto en las fracciones condensadas (grupo C) como en las fracciones que permanecieron en el reactor (grupo L), el tiempo de pirólisis (20, 30 y 40 minutos) no tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre los valores de Grado API. En el grupo C, las medias oscilaron entre 18.50 y 20.25 grados API, clasificándose como aceites pesados y medianos, mientras que en el grupo L las medias se mantuvieron en un rango más estrecho, entre 10.99 y 11.36 grados API, correspondientes a aceites pesados y extrapesados.

El ANOVA en ambos casos calculó valores de p superiores a 0.05 (grupo C: $p = 0.499$; grupo L: $p = 0.929$), indicando que las diferencias observadas entre los distintos tiempos de reacción se atribuyen a la variabilidad experimental. Las pruebas de

homogeneidad de varianzas de Levene, así como los análisis no paramétricos de Kruskal-Wallis y de la mediana de Mood, confirmaron la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que, aunque las dos fracciones presentan distintas características de densidad más ligeras en el grupo C y más densas en el grupo L, la clasificación del aceite se mantiene estable dentro de cada grupo y no depende de la duración del proceso de pirólisis.

Análisis post hoc

Al extender el análisis a la comparación conjunta de los grupos C y L, el ANOVA reveló diferencias altamente significativas entre los seis tratamientos evaluados ($F = 26.26$; $p < 0.001$). Las pruebas de supuestos confirmaron que los datos cumplen con normalidad ($p = 0.819$) y homogeneidad de varianzas ($p = 0.296$), validando el análisis realizado.

Las comparaciones múltiples (método Holm-Sidak) mostraron que no existen diferencias significativas entre los tiempos de pirólisis dentro de cada grupo (C20, C30 y C40 entre sí; L20, L30 y L40 entre sí), lo que indica estabilidad interna en los valores de Grado API. Sin embargo, se detectaron diferencias altamente significativas entre todos los grupos C frente a los grupos L ($p < 0.001$), con una diferencia promedio de 7 a 9 grados API.

Estos resultados suponen que el factor determinante en la clasificación de los aceites es la fracción de origen (condensada o remanente), más que la duración del proceso de pirólisis. Así, las fracciones condensadas (grupo C) presentan valores más elevados de grado API (19–20° API, aceites pesados a medianos), mientras que las fracciones retenidas en el reactor (grupo L) se mantienen en rangos menores ($\approx 11^\circ$ API, aceites pesados a extrapesados).

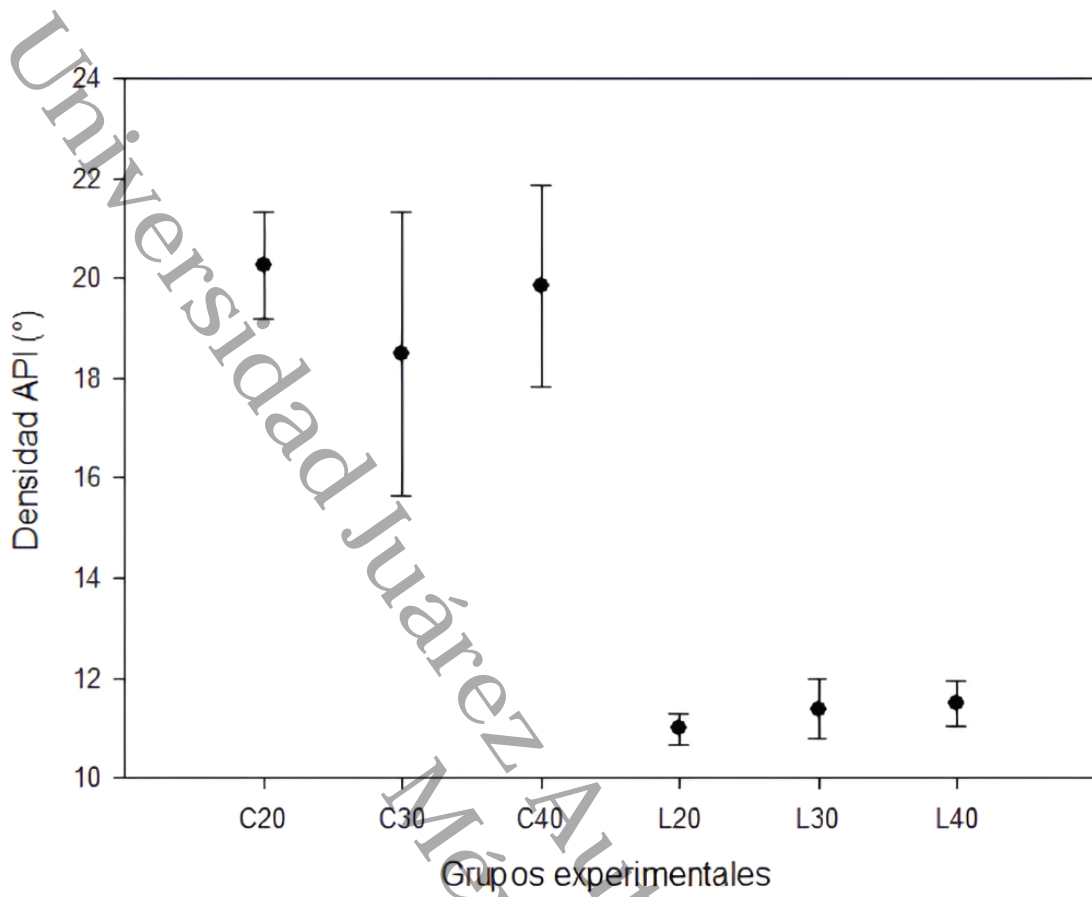


Figura 18. Comparación del grado API entre fracciones condensadas (C) y remanentes (L) obtenidas a diferentes tiempos de pirólisis.

Discusión

La hipótesis inicial del estudio planteaba que un mayor tiempo de pirólisis (20, 30 y 40 minutos) conduciría a aceites con un mayor grado API. Sin embargo, los resultados estadísticos demostraron lo contrario: el ANOVA indicó que el tiempo de residencia no tuvo un efecto significativo en el grado API, tanto en las fracciones condensadas ($p = 0.4991$) como en las fracciones líquidas internas ($p = 0.9292$). Este hallazgo coincide con lo señalado por Ahmad et al. (2019), quienes observaron que el tiempo no es un factor determinante en la calidad del aceite, aunque sí lo es la temperatura, la cual puede aumentar la ligereza del producto. De este modo, bajo las condiciones de este trabajo, la duración del proceso no modula la calidad del aceite obtenido.

En contraste, el análisis sí reveló que la fracción de origen del aceite constituye el factor determinante de la calidad, mostrando diferencias altamente significativas entre los condensados y los líquidos internos ($p < 0.001$). Esto confirma lo expuesto por Maafa (2021), quien señaló que las fracciones condensadas concentran compuestos de menor peso molecular y mayor volatilidad, lo que se traduce en productos más ligeros y energéticamente atractivos, mientras que las fracciones internas retienen compuestos de mayor densidad y peso molecular. En consecuencia, no es la duración de la pirólisis la que define la calidad del aceite, sino el tipo de fracción obtenida durante el proceso.

Los valores de grado API obtenidos en este estudio permiten clasificar las fracciones condensadas ($18.50\text{--}20.25^\circ$ API) como crudos pesados a medianos, mientras que las fracciones internas ($10.99\text{--}11.36^\circ$ API) se ubican en la categoría de crudos pesados a extrapesados. Estos valores guardan relación con los reportados en crudos nacionales como el Maya ($21\text{--}22^\circ$ API) y el Altamira ($15\text{--}16.5^\circ$ API), lo que sugiere que los aceites pirolíticos de EPS podrían destinarse a aplicaciones similares en asfaltos o combustibles pesados. López et al. (2017) destacan que los aceites obtenidos a partir de plásticos suelen clasificarse en estos rangos, confirmando su potencial de uso industrial.

Dado que el tiempo de pirólisis no influye significativamente en la calidad del aceite, la optimización del proceso debe enfocarse en mejorar la eficiencia de condensación y separación de vapores, maximizando la recuperación de la fracción condensada que contiene los productos más ligeros y de mayor API. Esta orientación coincide con lo planteado por Chanchí Golondrino y Canabal Cordero (2018), quienes remarcan la importancia de un diseño de condensadores adecuado para garantizar un producto final de mejor calidad. Sin embargo, aún persisten vacíos de conocimiento que requieren atención en investigaciones futuras, como la incorporación de catalizadores que puedan mejorar la calidad del aceite y la evaluación de la viabilidad económica del proceso a escala industrial. Estas líneas de trabajo se vuelven esenciales para consolidar la pirólisis de EPS como una alternativa sostenible y energéticamente viable.

Conclusiones

El presente estudio cumplió con los objetivos planteados al determinar el grado API de los aceites obtenidos mediante la pirólisis de poliestireno expandido (EPS) y al evaluar la influencia de las condiciones operativas, particularmente el tiempo de residencia en el reactor. A partir de los resultados obtenidos, se derivan las siguientes conclusiones:

El tiempo de pirólisis (20, 30 y 40 minutos) conduciría a aceites con mayor Grado API, es decir, de mejor calidad. Sin embargo, el análisis de varianza (ANOVA) demostró que este parámetro no ejerció un efecto estadísticamente significativo en ninguna de las fracciones líquidas analizadas: ni en las fracciones condensadas (C, $p = 0.4991$) ni en las fracciones líquidas internas (L, $p = 0.9292$).

El factor determinante de la calidad del aceite no fue el tiempo, sino la fracción de origen. El ANOVA reveló diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) entre las fracciones condensadas (C) y las líquidas internas (L). Esta divergencia se explica por la naturaleza física del proceso: los compuestos más ligeros y volátiles se condensan primero, formando la fracción C, mientras que los compuestos más pesados, densos y de mayor peso molecular permanecen en la fracción L, lo que directamente impacta en su grado API.

Los aceites obtenidos pueden clasificarse dentro de categorías reconocidas de crudos pesados. Las fracciones C presentaron grados API entre 18.50 y 20.25, situándolas en el rango de crudo pesado a mediano, mientras que las fracciones L mostraron valores más bajos (10.99–11.36), correspondientes a crudo pesado a extrapesado. Estos rangos son comparables con crudos convencionales mexicanos como el Maya o el Altamira, lo que sugiere un potencial uso en aplicaciones industriales similares, tales como la formulación de asfaltos o combustibles pesados.

Recomendaciones

Con base en los hallazgos anteriores, se proponen las siguientes líneas de acción para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos:

1. Optimizar el sistema de condensación: Dado que la fracción condensada (C) presenta una calidad significativamente superior, se recomienda redirigir los esfuerzos de diseño hacia la mejora de la eficiencia de los condensadores y la separación selectiva de vapores. El objetivo debe ser maximizar la recuperación de esta fracción ligera, ya que su rendimiento define en gran medida la calidad global del producto.
2. Explorar el uso de catalizadores: Es fundamental investigar la incorporación de catalizadores (por ejemplo, zeolitas, óxidos metálicos o ácidos) durante la pirólisis. Estos podrían favorecer reacciones de craqueo selectivo, reducir la formación de compuestos pesados y elevar el grado API del aceite, acercándolo a rangos de crudos más ligeros.
3. Evaluar la viabilidad técnica, y económica ambiental a escala piloto o industrial: Para que la pirólisis de EPS trascienda del laboratorio, se requieren estudios integrales que incluyan análisis de costos, balances de masa y energía, rendimientos a mayor escala y, especialmente, caracterización de emisiones durante la combustión del aceite. Estos datos permitirán comparar su desempeño ambiental con el de combustibles fósiles y validar su sostenibilidad.

Referencias

- Instituto Americano del Petróleo. (s. f.). *Estándares*. <https://www.api.org/products-and-services/es/standards>
- Castells, X., & Velo, E. (2012). *Tratamiento y valorización de residuos*. Díaz de Santos. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=29Vl_0IqInoC
- Centro Europeo de Postgrado. (s. f.). *¿Qué es la pirólisis?* <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>
- Chanchí Golondrino, J. C., & Canabal Cordero, C. S. (2018). *Efectos de la adición de poliestireno expandido reciclado (REPS) en las propiedades físicas y mecánicas de un mortero con dosificación cemento-arena 1:3*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6366050>
- Flores-Iralda, J., Gómez Gómez, G., Conejo Rodríguez, L., Huerta Jacobo, X., Nava Sosa, D., & Riesco Ávila, J. (2022). *Propiedades fisicoquímicas de combustibles alternativos obtenidos mediante pirólisis de residuos* [Manuscrito en preprint]. Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato. <http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/7312/1/3657-Texto%20del%20art%C3%ADculo-12093-1-10-20220829.pdf>
- García, N. (2019). *Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de un plan de gestión posconsumo de poliestireno expandido (EPS) utilizado en el envase de alimentos en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de La Salle]. <http://hdl.handle.net/10882/9794>
- Instituto Tecnológico del Plástico. (2023, 10 de octubre). *Pirólisis: El método termoquímico para la transformación sostenible de los residuos*. <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>

López-Aguirre, J. F., Pomaquero-Yuquilema, J. C., & López-Salazar, J. L. (2021). *Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba. Polo del Conocimiento*, 6(5), 153–174.

<https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2139>

López, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2017). *Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 346–368.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.142>

Maafa, I. M. (2021). *Pyrolysis of polystyrene waste: A review. Polymers*, 13(2), 225.

<https://doi.org/10.3390/polym13020225>

Martínez, C., & Laines, J. (2013). *Poliestireno expandido (EPS) y su problema ambiental. Revista Kuxulkab'*, 6(36), 33–41.

<https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/339>

Mendiola, R. (2023, 15 de febrero). *Poliestireno expandido: ¿Amigo o enemigo?*

<https://www.bioplaster-research.com/bio/poliestireno-expandido-amigo-o-enemigo>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Valorización energética / tratamientos térmicos.* <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/valorizacion-energetica-tratamientos-termicos-introduccion.html>

NOVOIL. (2021, 8 de noviembre). *Tipos de petróleo crudo en México.*

<https://www.novaoil.mx/post/tipos-de-petroleo-en-mexico>

Quiroga, A., Vildoza, A., Córdova, A., Santa Cruz, H., & Zanoni, H. (2022). *Obtención de combustible mediante pirólisis de plástico.* <https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2022/06/Articulo2-RADI-19.pdf>

- Ramírez, D. L. (2022). *Análisis del ciclo de vida del unicef* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].
<https://repositorio.uaaan.mx/handle/123456789/48667>
- Ramos, W., Zamudio, V., Villegas, E., Manrique, H., & Pretell, V. (2022). *Pirólisis de residuos de poliestireno expandido para la obtención de combustibles líquidos*. En *Actas de la Multiconferencia Internacional de Ingeniería, Educación y Tecnología LACCEI 2022*. https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FP353.pdf
- Rivas, M., & Garelli-Ríos, O. (2021, 10 de marzo). *Impacto de la contaminación por plásticos en la biodiversidad y patrimonio biocultural de México*. Heinrich Böll Stiftung México. <https://mx.boell.org/es/2021/03/10/impacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural>
- Rojas, T. (2023, 4 de mayo). *Poliestireno expandido (EPS): Usos, ventajas y aplicaciones*. <https://www.plastico.com/es/noticias/poliestireno-expandido-eps-usos-ventajas-y-aplicaciones>
- Rueda-Beauregard, J., Alegría-Hernández, B., Vázquez-Vázquez, L., Vargas-González, R., López-Martínez, S., Fuentes-Domínguez, I., Lobato-García, C., & Morales-Bautista, C. (2023). *Determinación de la gravedad API por los métodos directo e indirecto (picnometría)*. *Revista de Ciencias Básicas*, 9(1), 45–52.
<https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs/article/view/6134>
- Siddiqui, M. N., & Redhwi, H. H. (2009). *Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products*. *Fuel Processing Technology*, 90(4), 545–552.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.003>
- Tecnología de Plásticos México. (2024, 12 de enero). *¿Qué es el poliestireno (PS)? Tipos y aplicaciones desglosadas*. <https://www.pt-mexico.com/articulos/que-es-el-poliestireno-ps-tipos-y-aplicaciones>

Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W., Atausupa, M., & Wildor-Gosgot, A. (2022). *Pirólisis: Una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos*. *INDESDOS*, 5(2), 1–15.

<https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/view/854>

Wildor-Gosgot, A., Rivera-López, Y., Rascón, J., Barrena-Gurbillón, M., Ordinola-Ramírez, C., Oliva, M., & Montenegro-Santillán, Y. (2021). *Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirólisis*. *INDESDOS*, 4(1), 1–12.

<https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/view/766>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	DETERMINACIÓN DE GRADOS API DE ACEITES OBTENIDOS EN LA PIRÓLISIS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Danna Paola Correa García
ORCID:	https://orcid.org/0009-0009-3737-9708
Resumen de la Tesis:	<p>El Poliestireno Expandido (EPS) o unicel representa un desafío ambiental significativo debido a su baja tasa de reciclaje y alta acumulación, impulsando la búsqueda de alternativas de valorización. Este proyecto tuvo como objetivo determinar el Grado API de los aceites obtenidos mediante la pirólisis de EPS, evaluando la influencia del tiempo de residencia en el reactor. La metodología empleó un reactor pirolítico tipo <i>batch</i>, realizando ensayos a 20, 30 y 40 minutos. Los productos líquidos se separaron en fracciones condensadas (C) e internas (L), y se caracterizó su densidad para el cálculo del Grado API estandarizado. Los resultados refutaron la hipótesis inicial, pues el Análisis de Varianza (ANOVA) demostró que el tiempo de pirólisis no tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre el Grado</p>

	<p>API en ninguna de las fracciones (C: $p = 0.4991$; L: $p = 0.9292$). Sin embargo, se encontraron diferencias altamente significativas entre las fracciones de origen ($p < 0.001$). La fracción C concentró los aceites más ligeros ($18.50\text{--}20.25^\circ$ API), clasificándose como crudos pesados a medianos, mientras que la fracción L retuvo compuestos más pesados ($10.99\text{--}11.36^\circ$ API), clasificados como crudos pesados a extrapesados. Se concluye que los aceites pirolíticos de EPS son comparables con crudos nacionales como el Maya o el Altamira, con uso potencial como asfalto o combustible pesado. La optimización del proceso debe enfocarse en maximizar la eficiencia de condensación de la fracción ligera (C) y explorar el uso de catalizadores.</p>
<p>Palabras claves de la Tesis:</p>	<p>Poliestireno Expandido Pirólisis, Grado API, Aceites Pirolíticos, Valorización.</p>
<p>Referencias citadas:</p>	<p>Instituto Americano del Petróleo. (s. f.). <i>Estándares</i>. https://www.api.org/products-and-services/es/standards</p> <p>Castells, X., & Velo, E. (2012). <i>Tratamiento y valorización de residuos</i>. Díaz de Santos. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=29Vl_0IqlnoC</p> <p>Centro Europeo de Postgrado. (s. f.). <i>¿Qué es la</i></p>

pirólisis?

<https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>

Chanchí Golondrino, J. C., & Canabal Cordero, C. S. (2018). *Efectos de la adición de poliestireno expandido reciclado (REPS) en las propiedades físicas y mecánicas de un mortero con dosificación cemento-arena 1:3.*

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6366050>

Flores-Iralda, J., Gómez Gómez, G., Conejo Rodríguez, L., Huerta Jacobo, X., Nava Sosa, D., & Riesco Ávila, J. (2022). *Propiedades fisicoquímicas de combustibles alternativos obtenidos mediante pirólisis de residuos* [Manuscrito en preprint]. Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato.

<http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/7312/1/3657-Texto%20del%20art%C3%ADculo-12093-1-10-20220829.pdf>

García, N. (2019). *Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de un plan de gestión posconsumo de poliestireno expandido (EPS) utilizado en el envase de*

alimentos en Colombia [Tesis de maestría, Universidad de La Salle].
<http://hdl.handle.net/10882/9794>

Instituto Tecnológico del Plástico. (2023, 10 de octubre). *Pirólisis: El método termoquímico para la transformación sostenible de los residuos*.
<https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>

López-Aguirre, J. F., Pomaquero-Yuquilema, J. C., & López-Salazar, J. L. (2021). *Análisis de la contaminación ambiental por plásticos en la ciudad de Riobamba*. *Polo del Conocimiento*, 6(5), 153–174.
<https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2139>

López, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2017). *Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 346–368.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.142>

Maafa, I. M. (2021). *Pyrolysis of polystyrene*

waste: A review. *Polymers*, 13(2), 225.

<https://doi.org/10.3390/polym13020225>

Martínez, C., & Laines, J. (2013). *Poliestireno expandido (EPS) y su problema ambiental*. *Revista Kuxulkab'*, 6(36), 33-41.

<https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/339>

Mendiola, R. (2023, 15 de febrero). *Poliestireno expandido: ¿Amigo o enemigo?*

<https://www.bioplaster-research.com/bio/poliestireno-expandido-amigo-o-enemigo>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Valorización energética / tratamientos térmicos*.

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/valorizacion-energetica-tratamientos-termicos-introduccion.html>

NOVOIL. (2021, 8 de noviembre). *Tipos de petróleo crudo en México*.

<https://www.novaoil.mx/post/tipos-de->

[petroleo-en-mexico](#)

Quiroga, A., Vildoza, A., Córdova, A., Santa Cruz, H., & Zanoni, H. (2022). *Obtención de combustible mediante pirólisis de plástico*. <https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2022/06/Articulo2-RADI-19.pdf>

Ramírez, D. L. (2022). *Análisis del ciclo de vida del unicef* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <https://repositorio.uaaan.mx/handle/123456789/48667>

Ramos, W., Zamudio, V., Villegas, E., Manrique, H., & Pretell, V. (2022). *Pirólisis de residuos de poliestireno expandido para la obtención de combustibles líquidos*. En *Actas de la Multiconferencia Internacional de Ingeniería, Educación y Tecnología LACCEI 2022*. https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FP353.pdf

Rivas, M., & Garelli-Ríos, O. (2021, 10 de marzo). *Impacto de la contaminación por plásticos en la biodiversidad y patrimonio biocultural de México*. Heinrich Böll Stiftung México. <https://mx.boell.org/es/2021/03/10/i>

[mpacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural](#)

Rojas, T. (2023, 4 de mayo). *Poliestireno expandido (EPS): Usos, ventajas y aplicaciones*.

<https://www.plastico.com/es/noticias/poliestireno-expandido-eps-usos-ventajas-y-aplicaciones>

Rueda-Beurregard, J., Alegría-Hernández, B., Vázquez-Vázquez, L., Vargas-González, R., López-Martínez, S., Fuentes-Domínguez, I., Lobato-García, C., & Morales-Bautista, C. (2023).

Determinación de la gravedad API por los métodos directo e indirecto (picnometría). Revista de Ciencias Básicas, 9(1), 45–52.

<https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs/article/view/6134>

Siddiqui, M. N., & Redhwi, H. H. (2009). *Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products. Fuel Processing Technology*, 90(4), 545–552.

<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.003>

Tecnología de Plásticos México. (2024, 12 de enero). *¿Qué es el poliestireno (PS)? Tipos*

y aplicaciones desglosadas.

<https://www.pt-mexico.com/articulos/que-es-el-poliestireno-ps-tipos-y-aplicaciones>

Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W., Atausupa, M., & Wildor-Gosgot, A. (2022). *Pirólisis: Una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos*. *INDESDOS*, 5(2), 1–15.

<https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/view/854>

Wildor-Gosgot, A., Rivera-López, Y., Rascón, J., Barrena-Gurbillón, M., Ordinola-Ramírez, C., Oliva, M., & Montenegro-Santillán, Y. (2021). *Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirólisis*. *INDESDOS*, 4(1), 1–12.

<https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/view/766>