

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERIA INDUSTRIAL

“Análisis de los cambios superficiales de residuos poliméricos (PET, PS, PSE, HDPE, LDPE) después del tratamiento por plasma de resplandor.”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

“María del Carmen Rodríguez García

DIRIGIDA POR:

“Dra. Maribel González Torres”

“Dra. Cristina Arely de León Condes”

Tianguistenco, Estado de México, marzo,2022

Agradecimientos

Se agradece al ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) por sus instalaciones para realizar el tratamiento y caracterización de las muestras.

A mis maestros y compañeros que formaron parte de todo este proceso, a mi universidad por abrirme las puertas y brindarme una nueva oportunidad.

A mi madre Eva García por su apoyo incondicional durante toda mi trayectoria académica, por todo su esfuerzo, su confianza y por no dejar de creer en mí ni un solo día.

A mi abuelo Adán García por ser mi guía y mi compañía, por su dedicación y tiempo.

Resumen

En el presente trabajo, se evaluaron los cambios estructurales y morfológicos en la superficie de los polímeros antes y después del tratamiento por plasma para identificar su efecto en la superficie.

Los polímeros que a los que se les realizó el tratamiento fueron: botella de refresco (PET), plato de unicel (PS), cuchara de plástico (PSE), tapa de detergente (HDPE) y pega-solo (LDPE).

El tratamiento realizado fue por medio de plasma de resplandor a potencias de 20 y 40 W durante 10 min.

Una vez terminado el tratamiento, se abordan las distintas técnicas de caracterización para así poder llevar a cabo el análisis, tales como Microscopia Electrónica de Barrido por la cual fue utilizada para estudiar y analizar las características morfológicas, de las muestras bajo estudio.

También se utilizó Espectroscopía Foto electrónica de Rayos X (XPS), con esta técnica se analizó la primera capa de la superficie de la muestra, Espectroscopia Infrarroja para determinar los grupos funcionales de las muestras y Espectroscopia de Energía Dispersiva, para conocer el contenido elemental de las muestras todo esto antes y después del tratamiento.

El ángulo de contacto también fue implementado para conocer el resultado del tratamiento, con este análisis se determina si el tratamiento por plasma causa efectos en los residuos examinados.

Abstract

In the present work, structural and morphological changes on the surface of polymers were evaluated before and after plasma treatment to identify their effect on the surface.

The polymers that underwent the treatment were: soda bottle (PET), Styrofoam plate (PS), plastic spoon (PSE), detergent cap (HDPE) and glue-only (LDPE).

The treatment carried out was by means of glow plasma at powers of 20 and 40 W for 10 min.

Once the treatment was finished, the different characterization techniques were approached to carry out the analysis, such as Scanning Electron Microscopy by which it was used to study and analyze the morphological characteristics of the samples under study.

X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) was also done, with this technique the first layer of the sample surface was analyzed, Infrared Spectroscopy to determine the functional groups of the samples and Energy Dispersive Spectroscopy, to know the elemental content of the samples. It shows all this before and after the treatment.

The contact angle was also implemented to know the result of the treatment, in this a drop of distilled water was placed on the samples to analyze what changes occurred on the surface as the power of the treatment increased.

índice

TESIS.....	4
Agradecimientos	5
Resumen.....	6
Abstract.....	7
índice.....	8
índice de figuras.....	11
índice tablas	15
CAPÍTULO I.....	17
1.6 Introducción	18
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 JUSTIFICACIÓN	20
1.4 HIPÓTESIS.....	21
1.5 OBJETIVOS	22
CAPITULO II.....	23
1.6 Marco teórico.....	24
1.6.1. definición de plasma	24
1.6.2 Tipos de plasma	25
1.6.3 Plasma de resplandor.....	26
1.6.4 Mecanismos de acoplamiento	27

1.6.5 POLÍMEROS	28
1.6.6 Tipos de polímeros.....	29
1.6.7 Residuos poliméricos	30
1.6.8 Tipos de residuos poliméricos	31
1.6.9 Tratamientos de residuos	35
1.6.10 Técnicas de caracterización	36
CAPÍTULO III.....	38
Metodología	39
Análisis Morfológico	47
a) Microscopía Electrónica de Barrido	47
b) Microscopia Óptica.....	47
Análisis Estructural	47
a) Espectroscopia de Energía Dispersiva	47
b) Espectroscopia Infrarroja.....	47
c) Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X.....	48
Hidrofobicidad	48
CAPÍTULO IV	50
Resultados y Discusión	51
Caracterización de las muestras antes del tratamiento	53
Morforlogía	53
Estructura química	57
Caracterización de las muestras después del tratamiento	58

	10
Morforlogía.....	59
Estructura.....	62
Análisis Estructural.....	72
Grupos químicos funcionales.....	72
Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS).....	81
Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS) después del tratamiento.....	84
Hidrofobicidad	89
Conclusiones.....	100
Competencias aplicadas.....	102
Referencias.....	106

índice de figuras

Ilustración 1 Plasma como cuarto estado de la materia.(Ingenius 2010).....	24
Ilustración 2 Tipos de plasma. (Elaboración propia)	25
Ilustración 3 Plasma no térmico. (Elaboración propia)	26
Ilustración 4 Arreglo resistivo. (Elaboración propia)	27
Ilustración 5 Arreglo capacitivo. (Elaboración propia)	28
Ilustración 6 Arreglo inductivo. (Elaboración propia).....	28
Ilustración 7 Monómero del PET. (Elaboración propia)	31
Ilustración 8 Monómero del PVC. (Elaboración propia).....	32
Ilustración 9 Monómero del PS. (Elaboración propia)	33
Ilustración 10 Monómero del PSE. (Elaboración propia).....	33
Ilustración 11 Monómero del HDPE. (Elaboración propia)	34
Ilustración 12 Monómero del LDPE. (Elaboración propia).....	35
Ilustración 13Esquema representativo del reactor y dispositivos periféricos. (Elaboración propia)	44
Ilustración 14 Tratamiento de polímeros por plasma. (Elaboración propia)	45
Ilustración 15 Medición de ángulo de contacto, método Sessile. (Elaboración propia).....	49
Ilustración 16. Tratamiento por plasma de residuos 20 W, 10 min.	53
Ilustración 17. Micrografía de la superficie de la botella (PET).....	54
Ilustración 18. Micrografía de la superficie del plato de unicel (PS).	54
Ilustración 19 MEB de la morfología de la cuchara (PSE).....	55
Ilustración 20. Micrografía tapa de detergente (HDPE).	56
Ilustración 21. Micrografía de la muestra de pega-solo (LDPE).	56

Ilustración 22 Micrografía de la superficie de la botella (PET) ,A) antes y B) después del tratamiento por plasma.....	59
Ilustración 23 Micrografía de la superficie del plato de unicel (PS), A) antes y B) después del tratamiento por plasma.....	60
Ilustración 24 Micrografía de la superficie de la cuchara de plástico (PSE), A) antes y B) después del tratamiento por plasma.....	60
Ilustración 25 Micrografía de la superficie de la tapa de detergente (HDPE), A) antes y B) después del tratamiento por plasma.	61
Ilustración 26 Micrografía de la superficie de pega-solo (LDPE) A) antes y B) después del tratamiento por plasma.....	62
Ilustración 27 Micrografía de la superficie de botella de refresco (PET) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.	65
Ilustración 28 Micrografía de la superficie de plato de unicel (PS) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.	66
Ilustración 29 Micrografía de la superficie de cuchara de plástico (PSE) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.	67
Ilustración 30 Micrografía de la superficie de tapa de botella de detergente (HDPE) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.....	68
Ilustración 31 Micrografía de la superficie de pega-solo (LDPE) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.	69
Ilustración 32 Espectros IR de botella de PET. (elaboración propia).....	72
Ilustración 33 Espectros IR de Plato de Unicel. (Elaboración propia)	73
Ilustración 34 Espectros IR de Cuchara de plástico. (Elaboración propia)	74

Ilustración 35 Espectros IR de Pega-solo. (Elaboración propia)	75
Ilustración 36 Espectros IR de tapa de detergente. (Elaboración propia).....	76
Ilustración 37 Comparación de Espectros IR de botella de refresco antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia).....	77
Ilustración 38 Comparación de Espectros IR plato de unigel antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia).....	78
Ilustración 39 Comparación de Espectros IR cuchara de plástico antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia).....	79
Ilustración 40 Comparación de Espectros IR cuchara de pega-solo antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia).....	80
Ilustración 41 Comparación de Espectros IR cuchara de tapa de detergente antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia).....	80
Ilustración 42 Espectro XPS general de botella de refresco PET. (Elaboración propia).....	81
Ilustración 43 Espectro XPS general de plato de unigel PS. (Elaboración propia)	82
Ilustración 44 Espectro XPS general de cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia).....	83
Ilustración 45 Espectro XPS general de pega-solo LDPE. (Elaboración propia).....	83
Ilustración 46 Espectro XPS general de tapa de detergente HDPE. (Elaboración propia).....	84
Ilustración 47 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de botella de refresco PET. (Elaboración propia).....	85
Ilustración 48 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de plato de unigel PS. (Elaboración propia)	86
Ilustración 49 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia).....	87

Ilustración 50 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de pega-solo LDPE. (Elaboración propia).....	88
Ilustración 51 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de la tapa de detergente HDPE. (Elaboración propia).....	89
Ilustración 52 Gota de agua destilada sobre botella de plástico PET.	90
Ilustración 53 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para PET. (Elaboración propia)	91
Ilustración 54. Gota de agua destilada sobre plato de unicel PS. (Elaboración propia)	92
Ilustración 55 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para PS. (Elaboración propia).....	93
Ilustración 56 Gota de agua destilada sobre cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia).....	93
Ilustración 57 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para PSE. (Elaboración propia)	95
Ilustración 58 Gotas de agua destilada sobre la muestra de HDPE. (Elaboración propia).....	95
Ilustración 59 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para HDPE. (Elaboración propia).....	97
Ilustración 60 Gota de agua destilada sobre la muestra de LDPE.	97
Ilustración 61 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para LDPE. (Elaboración propia)	99

índice tablas

Tabla 1 Polímeros naturales. (Elaboración propia).....	29
Tabla 2 Polímeros sintéticos. (Elaboración propia).....	30
Tabla 3 Residuos a examinar (elaboración propia).....	53
Tabla 4 Estructura de botella de plástico PET. (Elaboración propia).....	57
Tabla 5 Estructura de Plato de unigel. (Elaboración propia).....	57
Tabla 6 Estructura de cuchara de plástico. (Elaboración propia).....	57
Tabla 7 Estructura de taparrosca de botella de detergente. (Elaboración propia).....	58
Tabla 8 Estructura de plástico pega-solo. (Elaboración propia).....	58
Tabla 9 Estructura de botella de plástico a 20W. (Elaboración propia).....	62
Tabla 10 Estructura de cuchara de plástico a 40W (elaboración propia).....	63
Tabla 11 Estructura de pega-solo a 20W. (Elaboración propia).....	63
Tabla 12 Estructura de plato de unigel a 20W (elaboración propia).....	64
Tabla 13 Estructura de taparrosca de botella de detergente a 20W. (Elaboración propia).....	64
Tabla 14 Estructura de botella de plástico a 40W. (Elaboración propia).....	70
Tabla 15 Estructura de cuchara de plástico a una potencia de 40W. (Elaboración propia).....	70
Tabla 16 Estructura de plástico pega-solo a 40 W de potencia. (Elaboración propia).....	71
Tabla 17 Estructura de plato de unigel a 40 W de potencia. (Elaboración propia).....	71
Tabla 18 Estructura de taparrosca a 40 W de potencia. (elaboración propia).....	71
Tabla 19 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo botella de plástico PET. (Elaboración propia).....	90
Tabla 20 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo plato de unigel PS. (Elaboración propia).....	92
Tabla 21 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia).....	94

Tabla 22 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo tapa de detergente HDPE. (Elaboración propia).....	96
Tabla 23 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo pega-solo LDPE. (Elaboración propia)	98

CAPÍTULO I

1.6 Introducción

El termino plasma fue utilizado por primera vez en 1917 por Irving Langmuir para referirse a un gas ionizado. En el transcurso de su investigación el físico observo que los iones de un gas al ser expuestos a una corriente eléctrica se comportaban de una manera muy similar a las células que conforman la sangre, de ahí el nombre asignado a este estado de la materia.

El plasma actualmente se puede aplicar en la modificación de propiedades superficiales de distintos materiales como es el plástico, cerámica, vidrio, metales. El tratamiento por plasma de resplandor consiste en modificar la estructura de un polímero mediante pequeñas descargas eléctricas y así poder modificar la superficie de este ya sea en estructura o morfológicamente.

En México el problema de los residuos, tratamiento, separación, recolección y eliminación se ha convertido en un problema grave, que ocasiona gasto sociales y económicos además del costo ambiental para toda la población. Esto solo es el resultado de varias condiciones entre ellas la mala cultura de reciclaje que se tiene actualmente en el país.

Existen distintos tratamientos para poder disminuir o eliminar la cantidad de residuos generados, la mayoría de estos tratamientos causan un impacto más grave en el medio ambiente.

El presente proyecto de investigación describe el procedimiento que se llevara a cabo para realizar el tratamiento por plasma de resplandor en residuos poliméricos. Se pretende que al ser tratados los residuos por medio de esta técnica se presenten cambios su superficie. Analizando los materiales antes y después del tratamiento por medio de técnicas de caracterización.

1.2 Planteamiento del problema.

En la actualidad los polímeros se han convertido en una parte muy importante de la vida, ya que la gran mayoría de los objetos que están alrededor están compuestos por distintos tipos de polímeros.

La problemática generada en el país es que la gran mayoría de los desechos poliméricos no se degradan, ni tienen algún tipo de descomposición rápida de forma natural, con el paso prolongado del tiempo (100 a 1000 años) estos se degradan.

La eliminación de estos residuos ha generado un impacto ambiental realmente preocupante. Puesto que muchos de estos residuos si bien son reciclables no se tiene la infraestructura, la promoción ni la cultura necesaria para que el reciclaje de solución al problema ambiental que se tiene en la actualidad.

Es por todo lo anterior que es necesario proponer soluciones al problema de generación de residuos poliméricos, entre las soluciones se encuentra el tratamiento de los residuos ya existentes por medio de diferentes técnicas, una de estas técnicas es el tratamiento por plasma, se pretende estudiar si el tratamiento por plasma de resplandor es una alternativa de solución a la problemática ambiental que se vive a nivel global.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En México se cuenta con más de 22 millones de habitantes, los cuales diariamente producen aproximadamente 13000 toneladas de residuos, de estas toneladas 123 toneladas son plásticos. En México se producen 300 millones de toneladas de plásticos al año, y sólo se recicla el 3%. Estos residuos mencionados han tenido un mal manejo ya que generalmente terminan acumulándose en calles, ríos y mares. Y se obtiene como consecuencia un rápido deterioro ambiental. (SEMARNAT, 2020)

Debido a las consecuencias que se experimentan por el cambio climático es necesario que a todos los niveles se genere conciencia en cuanto a la responsabilidad de reciclar, degradar o bien buscar un sustituto para este tipo de desechos. El plasma se puede utilizar para realizar tratamientos a los residuos de polímeros, este tratamiento es considerado de los más limpios ya que los elementos contaminantes que se despiden al realizar tratamiento o calcinación quedan atrapados en una red vítrea con lo que se reducen las emisiones gaseosas de partículas, también disminuye el volumen de residuos. Otra de las ventajas es que por medio del plasma se puede modificar la interacción de a la superficie del polímero con el medio ambiente modificando el tiempo de degradación.

Es por la problemática mencionada con anterioridad que con el desarrollo de este proyecto se propone una alternativa para el tratamiento de estos residuos que permita una mejor gestión de residuos.

1.4 HIPÓTESIS

Por medio del tratamiento por plasma de resplandor a diferentes potencias la superficie de residuos poliméricos puede presentar cambios estructurales y morfológicos.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

Evaluar los cambios estructurales y morfológicos en la superficie de los polímeros después del tratamiento por plasma para identificar su efecto en la superficie.

1.5.2 Específicos

- Revisar conceptos de tipos de polímeros, tipos de tratamientos poliméricos, concepto de plasma.
- Seleccionar tipos de residuos para el tratamiento.
- Evaluar las características de los materiales antes del tratamiento.
- Realizar el tratamiento por plasma de resplandor.
- Evaluar características después del tratamiento
- Comparar resultados obtenidos antes y después del tratamiento

CAPITULO II

1.6 Marco teórico

1.6.1. definición de plasma

Se entiende por plasma a un gas conformado por partículas cargadas de iones libres cuya interacción tiene efectos colectivos dominados por interacciones electromagnéticas de largo alcance entre sí.

En la ilustración 1 se muestran los 4 estados de la materia de acuerdo con su nivel energético. Se considera al plasma como el cuarto estado de la materia que cuenta con características propias, estas lo definen como estado gaseoso. Este puede ser manipulado de manera más fácil y rápida por medio de campos magnéticos.

El plasma está conformado por el mismo número de cargas positivas y negativas.

Puede ser utilizado para la modificación de las propiedades superficiales de plásticos, vidrio, etc.

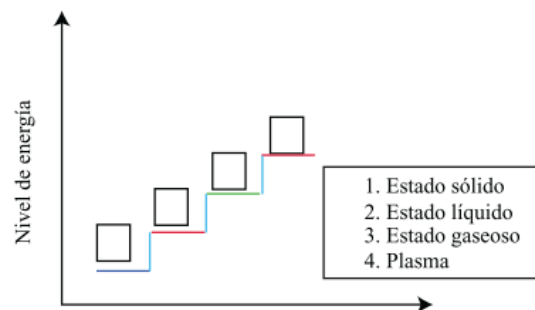


Ilustración 1 Plasma como cuarto estado de la materia.(Ingenius 2010)

1.6.2 Tipos de plasma

Los tipos de plasma se dividen en dos: plasmas térmicos y plasmas no térmicos. En la Ilustración 2 se presenta las divisiones de los tipos de plasma

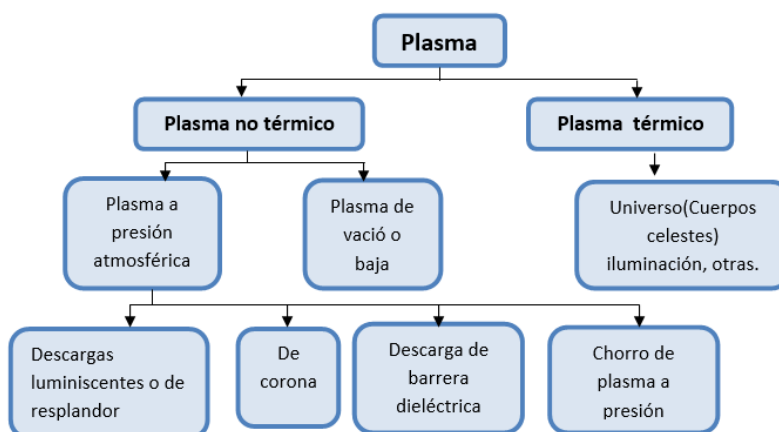


Ilustración 2 Tipos de plasma. (Elaboración propia)

- PLASMA TERMICO:** tienen un grado de ionización muy alto lo cual provoca que los impactos que tienen los electrones y partículas pesadas a mayor presión tengan una temperatura igual.

Un ejemplo de un plasma térmico es el interior de una estrella, el plasma formado en el canal de un rayo.
- PLASMA NO TERMICO:** cuentan con un grado de ionización bajo y poca presión. Dado esto los electrones tienen mayor temperatura que las partículas pesadas, provocando un desequilibrio térmico. La temperatura de las partículas siempre será cercana a la del ambiente, entre 25°C y 100°C. (Nationalgeographic., 2019). La ilustración 3 muestra un ejemplo de plasma no térmico generado en el laboratorio.

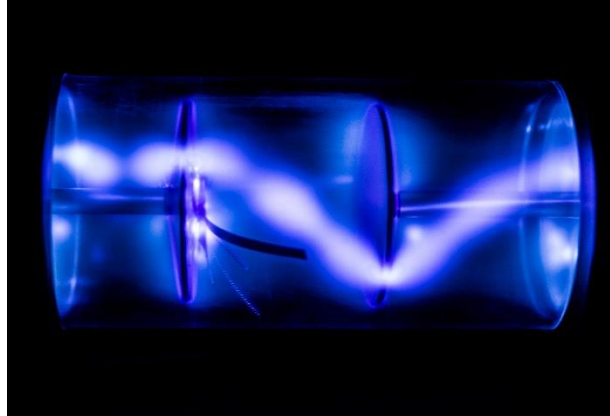


Ilustración 3 Plasma no térmico. (Elaboración propia)

1.6.3 Plasma de resplandor

El plasma de resplandor es una especie de plasma, lo que significa que es un gas parcialmente ionizado que consiste en descargas luminosas de concentraciones casi iguales con cargas positivas y negativas y un gran número de neutrales. Los plasmas de resplandor son formados en un reactor que contiene algún gas (inerte o molecular) con bajas presiones. Una diferencia de potencial (voltaje) es aplicado entre dos electrodos. Los átomos de gas que se encuentran dentro del reactor son ionizados y producen electrones libres e iones positivos. Las colisiones de excitación ocurridas y el movimiento de electrones a niveles más bajos, dan como resultado la luz característica de los plasmas de resplandor. (A. Bogaerts, 1999)

Las descargas de resplandor son de baja energía (1-10 eV) y pueden ser iniciadas y sostenidas a presiones bajas (menores a 1 mbar) por descargas eléctricas de corriente directa, radiofrecuencia o microondas. Se le llama “Resplandor” ya que los electrones que son liberados de sus orbitas generan fotones los cuales producen una luz.

En la generación de plasmas de descargas de resplandor, el campo eléctrico puede aplicarse a través de acoplamiento resistivo, capacitivo, inductivo, o sus combinaciones.

La emisión de electrones se produce, debido a las colisiones entre partículas. (Osvaldo G. López, 2013)

1.6.4 Mecanismos de acoplamiento

Existen diversos mecanismos de acoplamiento para la formación de descargas luminiscentes. Estos mecanismos de acoplamiento son: resistivo, capacitivo e inductivo.

- **Descargas de resplandor resistivas:**

En los acoplamientos resistivos, Ilustración 4 se ponen en contacto directo los electrodos con el gas ionizado, el cual actúa como resistencia eléctrica.



Ilustración 4 Arreglo resistivo. (Elaboración propia)

- **Descargas de resplandor Capacitivo:**

En el acoplamiento capacitivo ver ilustración 5, los electrodos se colocan fuera del contacto del gas por medio de una pared no conductora entre los electrodos y el gas. Este tipo de acoplamiento se utiliza generalmente cuando se requiere mantener a los electrodos libres de elementos que pudieran afectar el campo eléctrico.

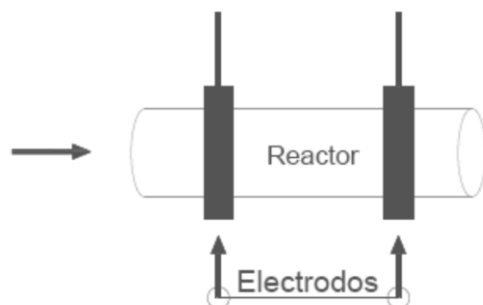


Ilustración 5 Arreglo capacitivo. (Elaboración propia)

- **Descargas de resplandor Inductivo:**

Para el arreglo inductivo, Ilustración 6, no se necesitan electrodos. La descarga de resplandor es generada en el reactor por campos magnéticos inducidos por el paso de una corriente eléctrica en una bobina que lo envuelve.

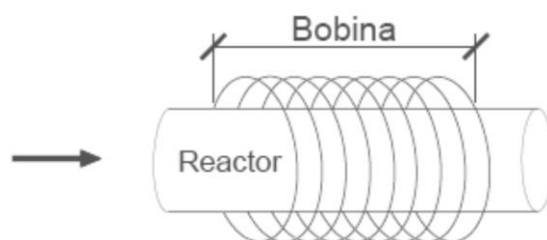


Ilustración 6 Arreglo inductivo. (Elaboración propia)

1.6.5 POLÍMEROS

Los polímeros son moléculas constituidas por eslabones llamados monómeros. Los monómeros son moléculas pequeñas de las que se parte para formar los polímeros.

De acuerdo con su origen pueden ser polímeros naturales o sintéticos. Los polímeros naturales son aquellos que provienen del reino animal o vegetal como el látex, almidón, ADN, ácidos nucleicos, etc.

Los polímeros sintéticos contienen entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, son creados por el hombre y se obtienen de la industria. Por ejemplo, el nylon, poliestireno, PVC, etc. (Francisco López Serrano Ramos, 2015)

1.6.6 Tipos de polímeros

- POLIMEROS NATURALES

Son obtenidos de la naturaleza. En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de polímeros naturales.



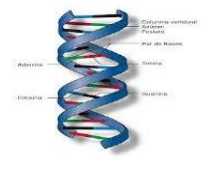

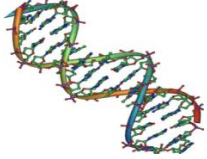
Polímeros naturales	
Celulosa	
Almidón	
ADN	
Caucho natural	
Ácidos nucleicos	

Tabla 1 Polímeros naturales. (Elaboración propia)

- **POLÍMEROS SINTÉTICOS**

Son creados por el hombre a partir de elementos de la naturaleza, todas sus características llevan a que cada polímero sintético tenga una función específica.

Estos polímeros son utilizados de una manera masiva por todo tipo de industrias, ya que son bajo costo de producción, durabilidad, versatilidad de producción, entre otras características. Proviene en su mayoría del petróleo, ver tabla 2.

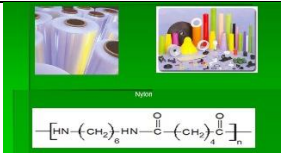

Polímeros sintéticos	
Nylon	 $\left[\text{HN}-(\text{CH}_2)_6\text{HN}-\overset{\text{O}}{\parallel}(\text{C}_6\text{H}_4)_4\overset{\text{O}}{\parallel} \right]_n$
Poliestireno	
Policloruro de vinilo	
Polietileno	

Tabla 2 Polímeros sintéticos. (Elaboración propia)

1.6.7 Residuos poliméricos

Los residuos poliméricos son los sobrantes de la aplicación de materiales poliméricos en la industria, tales como empaques, embalajes, equipos electrónicos, envasado, entre otros.

El uso de los materiales poliméricos conduce a un aumento significativo de los desechos. Las propiedades no reactivas de todos los desechos producidos complican su eliminación, ya que los polímeros no se descomponen de una manera rápida y natural, estos permanecen en el planeta por más de 300 años.

De acuerdo con sus componentes hidrocarbonados, los desechos pueden ser utilizados para generar energía. Cuando los desechos son orgánicos son colocados en la región de alta densidad de energía del plasma térmico, es producida una reacción de pirolisis la cual es capaz de descomponer por completo los enlaces químicos que contienen los materiales orgánicos. (Sina Mohseniana, 2015).

1.6.8 Tipos de residuos poliméricos

- PET: Tereftalato de polietileno es un polímero que pertenece al grupo de los materiales sintéticos denominados poliéster. Tiene por características una alta resistencia a la corrosión y desgaste, buena resistencia química, alta transparencia, reciclable, además se puede usar en productos que tienen contacto con productos alimenticios.

En la Ilustración 7 se muestra el modelo de la molécula del Tereftalato de polietileno

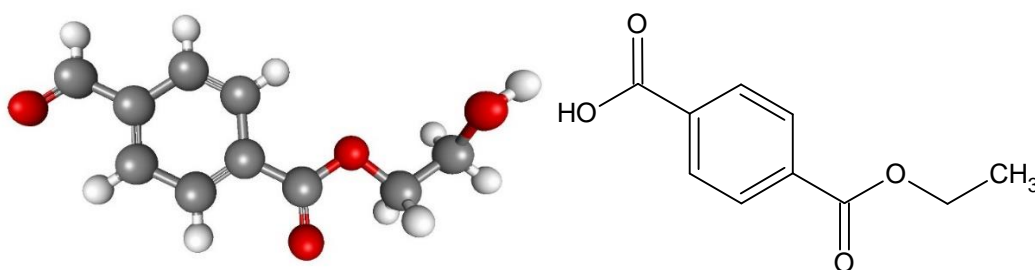


Ilustración 7 Monómero del PET. (Elaboración propia)

- PVC: cloruro de polivinilo. Es un plástico de los que más son producidos en el mundo. se clasifica como rígido el cual es utilizado en tuberías, puertas, etc. Y el flexible es utilizado para producir envolturas de plástico, revestimiento de paredes.

Tiene por características principales resistencia a la humedad y abrasión, resistencia al agua y fuego, de bajo costo y tiene demasiada resistencia a impactos y productos químicos.

En la Ilustración 8 se muestra el modelo de la molécula del Cloruro de polivinilo.

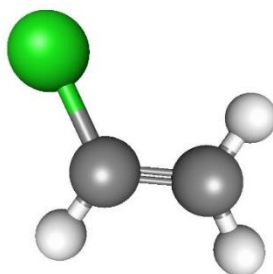


Ilustración 8 Monómero del PVC. (Elaboración propia)

- PS: Poliestireno. Polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero.

Entre sus características se encuentra que es rígido, transparente y quebradizo, es resistente al agua y químicos inorgánicos, funciona como aislante térmico, bajo costo, posee una elevada fuerza de tensión, no provoca tanto impacto ambiental.

Puede ser utilizado en electrodomésticos, autopartes, envases de alimentos, también se puede utilizar como aislador térmico en paredes y techos.

En la Ilustración 8 se muestra el modelo de la molécula del poliestireno.

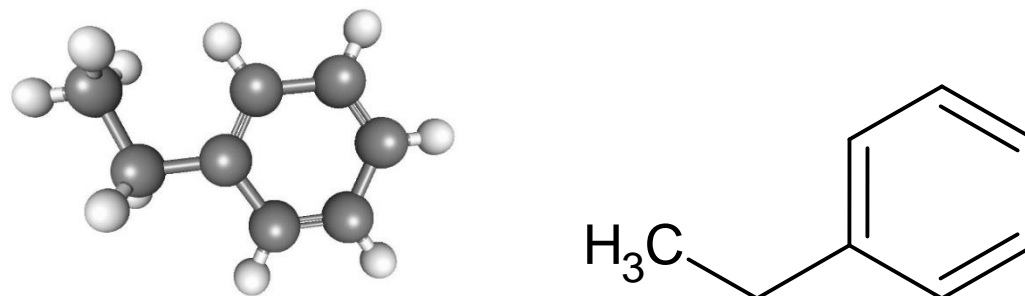


Ilustración 9 Monómero del PS. (Elaboración propia)

- PSE: Polietersulfona, polímero sintético, con forma parecida a los policarbonatos.

En sus características: es resistente al calor, no cristalino, baja resistencia a la intemperie, baja resistencia al impacto, claridad óptica, cuenta con propiedades de aislamiento, resistencia química a ácidos.

En la Ilustración 10 se muestra el modelo de la molécula de polietersulfona

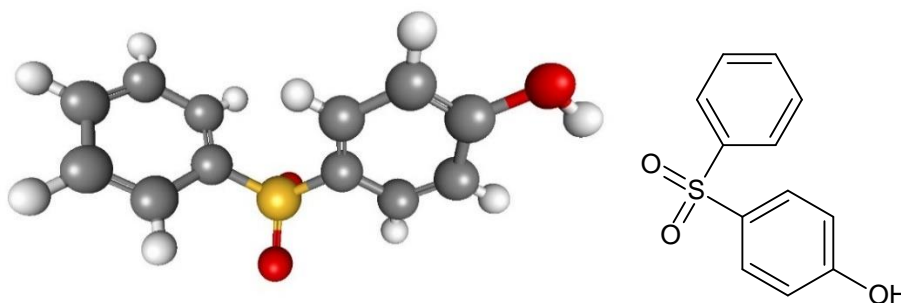


Ilustración 10 Monómero del PSE. (Elaboración propia)

- HDPE: Polietileno de alta densidad, se denomina polímero termoplástico. Es considerado de los materiales plásticos más versátiles.

Aporta dureza, resistencia, y tolerancia a altas temperaturas. Puede ser moldeado mediante su calentamiento, resistente al impacto.

Es utilizado para recipientes, tapas, juguetes, utensilios domésticos, etc.

En la Ilustración 11 se muestra el modelo de la molécula del polietileno de alta densidad.

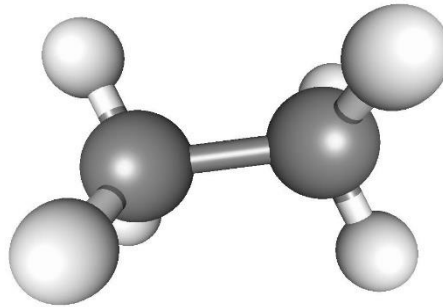


Ilustración 11 Monómero del HDPE. (Elaboración propia)

- LDPE: polietileno de baja densidad, polímero termoplástico considerado débil pero flexible. Derivado del petróleo, es resistente a ácidos y aceites vegetales, se puede procesar con facilidad, material aislante y de bajo costo, dureza y transparencia.

Puede ser utilizado para bolsas, envoltorios de comida, tapas y botellas flexibles, alambres y cables, etc.

En la Ilustración 12 se muestra el modelo de la molécula del polietileno de baja densidad.

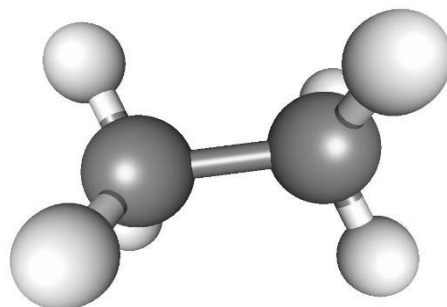


Ilustración 12 Monómero del LDPE. (Elaboración propia)

1.6.9 Tratamientos de residuos

Entre las principales formas de recuperar aquellos materiales que son desechados se cuenta con tres maneras distintas de aprovechar los residuos:

- **El reciclaje mecánico**, el cual consiste en lavar y moler los residuos para así obtener un producto en forma de escama para que tenga distintas aplicaciones de reutilización. Este tipo de reciclaje es realizado por medio de presión y calor para así producir otros objetos con un material termoplástico definido. (Espinoza, 2009)
- **Reciclaje químico**: los residuos que se utilizan son descompuestos mediante procesos térmicos en los que se suministra calor y, mediante el control en la cantidad de oxígeno y el uso de catalizadores se logra fragmentar en componentes más sencillos. Se pueden tratar polímeros termoestables y plásticos de composición compleja.

Existen diferentes procesos para llevar a cabo este tipo de reciclaje como son:

- **Pirólisis**: consiste en la descomposición térmica de materiales orgánicos en una región de proceso atmosférico libre de oxígeno (Sina Mohseniana, 2015)
- **Hidrogenación y gasificación**: consisten en la obtención de un gas con una alta capacidad calorífica, de una fase líquida más pesada y de un residuo sólido.

- **Recuperación de energía:** es recuperada de manera directa la capacidad calorífica de los residuos. El calor que se libera durante la combustión de los residuos puede usarse para calentar, o en algún proceso en el que esa energía haga funcionar una turbina que genere movimiento o electricidad. (Alethia Vázquez Morillas, 2014)

1.6.10 Técnicas de caracterización

- **Microscopia electrónica de barrido:** es una técnica por la cual se obtienen imágenes con alta resolución, se utiliza para estudiar y analizar las características morfológicas, de las muestras bajo estudio.

Su principio de funcionamiento se basa en el uso de un haz de electrones extremadamente fino, que bajo la acción de un juego de bobinas deflectoras es desplazado sobre la superficie de la muestra rastreándola. Cuando el haz primario entra en contacto con la superficie de la muestra, una porción de electrones es reflejada de la superficie, pero otra parte penetra algunas capas atómicas, siguiendo una trayectoria complicada muy diferente de una recta, antes de volver a emerger a la superficie. Es el tratamiento de estos electrones lo que conduce a la obtención de la imagen. (Stassi, 2014)

- **Espectroscopía de Energía Dispersiva:** permite el análisis químico de un área superficial seleccionada. El resultado es un histograma donde se representa energía frente a intensidad, dependiendo de la composición química del material utilizado. (Stassi, 2014)

- **Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS):** Por medio de esta técnica es posible analizar la primera capa superficial de un material, puede proporcionar información cualitativa y cuantitativa la mayoría de los elementos presentes excepto (He

y H). Esta técnica se base en la recolección de los electrones expulsados al irradiarse la muestra con Rayos X, Estos electrones proporcionan información de la energía del enlace electrónico (BE) de cada elemento antes de la perturbación. (Maribel González-Torres, 2014)

- **Espectroscopia infrarroja:** se basa en la absorción de la energía infrarrojas por

las moléculas en una muestra. La molécula comienza a vibrar de una manera determinada cuando se suministra energía mediante una luz infrarroja. La espectroscopia IR detecta los grupos funcionales que se encuentran presentes en un material.

- **Angulo de contacto:** describe las propiedades elementales de la superficie de un material sólido, estudia las propiedades de un material en su estado natural.

(Gurram Giridhar, 2017)

Este ángulo se puede determinar midiendo el ángulo entre la tangente de la superficie de caída en la línea de contacto y la superficie. El valor de este ángulo depende de la naturaleza del líquido y de la superficie o pared.

El ángulo de contacto puede ser aplicado en pintura, pesticidas, metalurgia, detergentes, telas, superficies autolimpias. (Abdullah Alghunaim, 2016).

El método de la gota Sessile consiste en colocar una gota de líquido sobre la superficie del material. Para todos los métodos el ángulo de contacto se mide en la interfaz sólido-líquido-vapor.

CAPÍTULO III

Metodología

El diagrama 1 muestra el diagrama general del desarrollo de este trabajo de investigación, que posteriormente es detallado en las siguientes secciones.

El diagrama 2 muestra el diagrama de flujo del proceso del análisis de los residuos poliméricos.

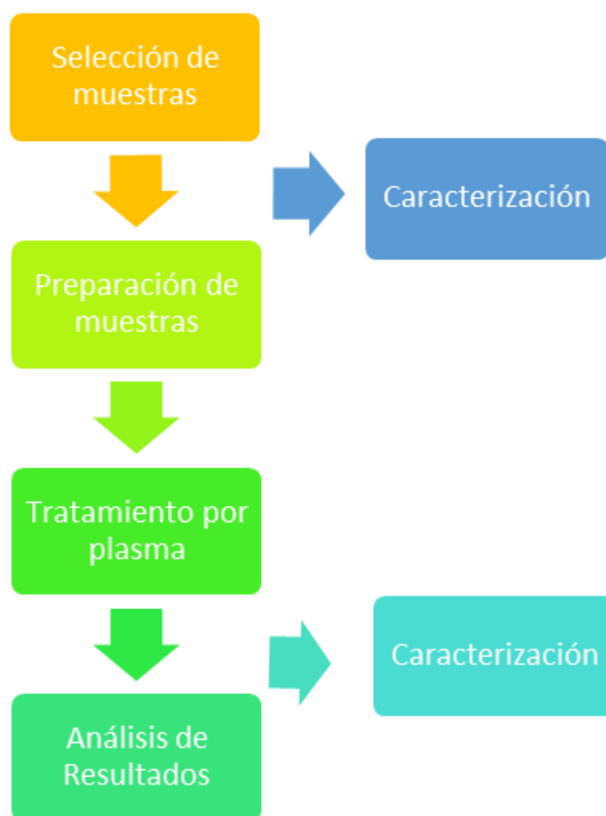


Diagrama 1 Metodología general de la experimentación. (Elaboración propia)

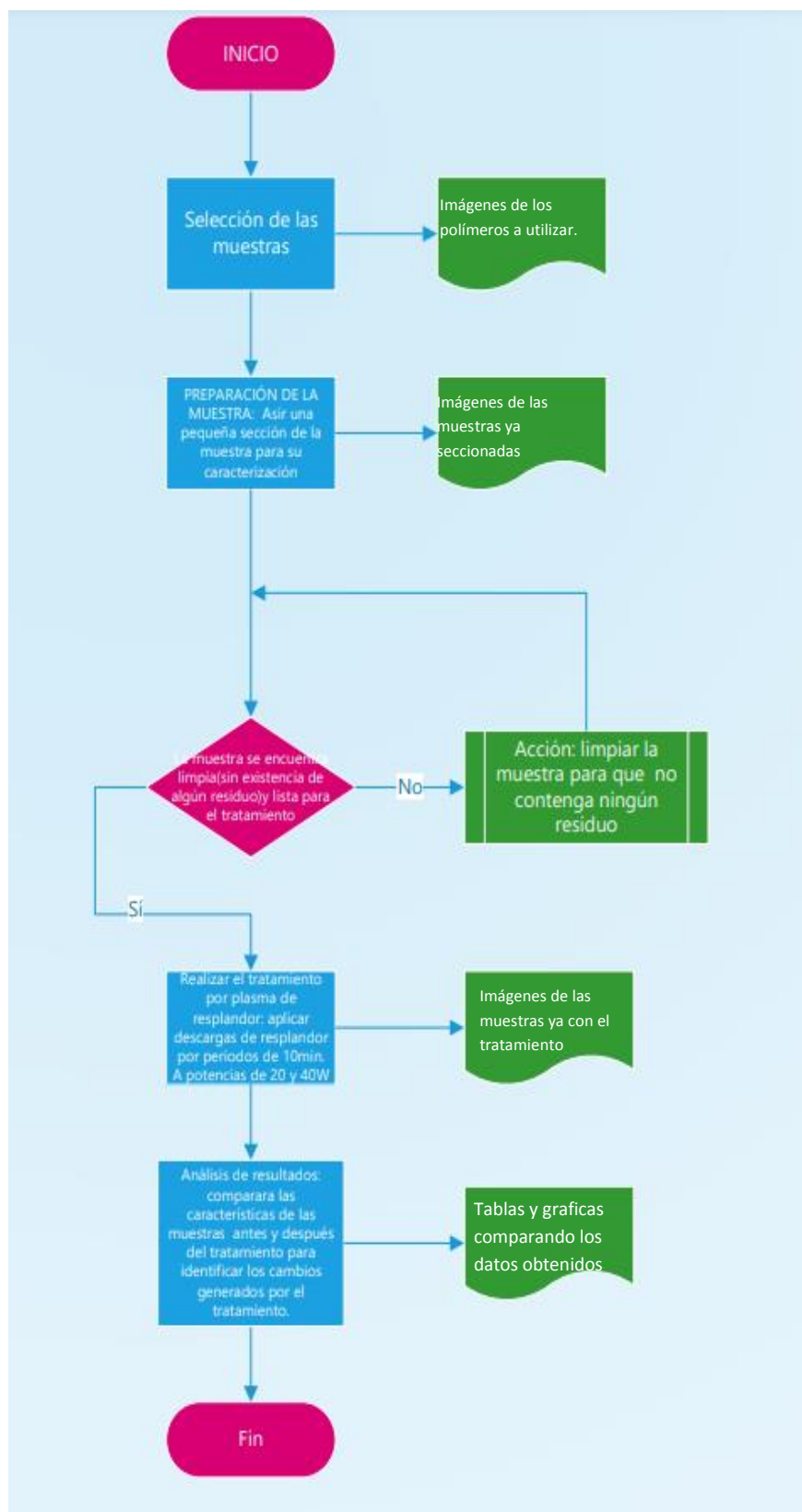












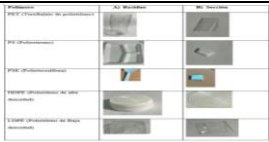
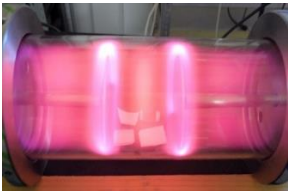
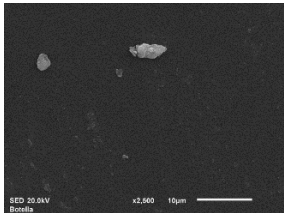

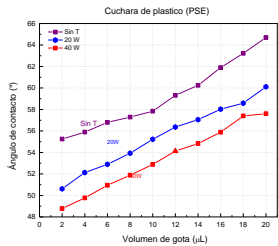



Diagrama 2 Diagrama de flujo del análisis de los cambios en polímeros mediante del tratamiento por plasma

Revisión: 00	Análisis de los cambios superficiales de residuos poliméricos		Hoja 1-2
Fecha de realización:		Código de documento	
Realizo:		Reviso:	
Personal requerido para la realización:			
Supervisor ()	Operador ()	Investigador a cargo ()	Otro ()
Riesgos asociados al proceso		Equipo de protección personal	
			
Inflamable	Corrosivo	Uso obligatorio de mascarilla	Uso de overol antifluído
			
Altamente inflamable	Nocivo	Uso obligatorio de lentes	uso obligatorio de bata
			
Toxico	Radioactivo	Uso obligatorio de guantes de látex	
Descripción del proceso			
		Selección de residuos más generados por la población.	
		Seleccionar los residuos a utilizar y tomar una pequeña sección.	
		Colocar muestra por muestra en el reactor y someterlas al tratamiento por plasma de resplandor durante 10 minutos con potencias de 20 W.	

Revisión: 00	Análisis de los cambios superficiales de residuos poliméricos		Hoja 2-2
Fecha de realización:		Código de documento	
Realizó:		Revisó:	
Personal requerido para la realización:			
Supervisor ()	Operador ()	Investigador a cargo ()	Otro ()
		<p>Para analizar el tratamiento mediante microscopía electrónica se coloca la muestra sobre una superficie negra, en seguida el microscopio por encima de la muestra y se captura la imagen.</p>	
		<p>Realizar el análisis mediante ángulo de contacto, para esto se debe colocar la muestra en una superficie plana, con una micropipeta ir colocando gotas de agua destilada comenzando por 2 microlitros, hasta llegar a 20. En cada gota colocada capturar una fotografía con buena resolución para así medir el ángulo en el software Image j</p>	
		<p>Una vez insertada la imagen en el software se mide el ángulo externo derecho e izquierdo y se saca el promedio de cada gota. se insertan los resultados en el software Origin Graph para realizar la gráfica de comparación de ángulos.</p>	
		<p>Ya comparados todos los datos, se concluye si el tratamiento logra algún efecto en los residuos.</p>	

Selección de muestras: Como primer paso se tiene la selección de muestras poliméricas que formen parte de los desechos encontrados más frecuentemente en la zona urbana.

Preparación de muestras: Una vez seleccionadas las muestras estas serán seccionadas para su tratamiento por plasma, a una sección de las muestras se les realizará la caracterización para conocer sus propiedades previas al tratamiento. Otra parte de las muestras se prepararán dentro del reactor para ser tratadas por plasma de resplandor.

Tratamiento por plasma: Se aplicará descargas de resplandor a las muestras por periodos de 10 minutos, a potencia de 20 y 40 W. Una vez terminado el tratamiento, las muestras serán recuperadas del reactor y se caracterizarán nuevamente.

El tratamiento por plasma de resplandor realizado a los diferentes tipos de materiales poliméricos se realiza dentro de un reactor tubular de vidrio con 9 cm de diámetro y 29 cm de longitud con volumen aproximado de 1500 cm³. Para bajar la presión dentro del tubo, debe de ser sellado, esto se logra utilizando dos bridas de acero inoxidable, estas bridas cuentan con una entrada central en donde se acopla un electrodo de acero inoxidable por medio de una varilla metálica (15 cm), el electrodo tiene un diámetro aproximado de 6 cm, entre ambos electrodos existe una separación de 7 cm.

En las paredes del reactor se fijan las secciones de las muestras a tratar, estas se colocan entre el espacio existente en los electrodos.

Las entradas del reactor que no se usan son selladas para evitar la entrada de aire. Por el lado derecho del reactor se conecta una bomba para reducir la presión, a su vez se conecta a un medidor de presión Pirani 945 MKS Instruments HPSTM, para monitorear constantemente las

presiones. El sistema consiste en una bomba mecánica Alcatel Pascal 2015 C1 y un condensador Alcatel LNT 25 S enfriado por medio de Nitrógeno líquido.

La presión se reduce hasta 10^{-2} mbar y se aplican descargas de resplandor con acoplamiento resistivo con una fuente de radio frecuencia VM1000A Dressler Cesar a 13.56 MHZ. La señal de la fuente es conectada a cada uno de los electrodos del reactor como se muestra en la ilustración 13.

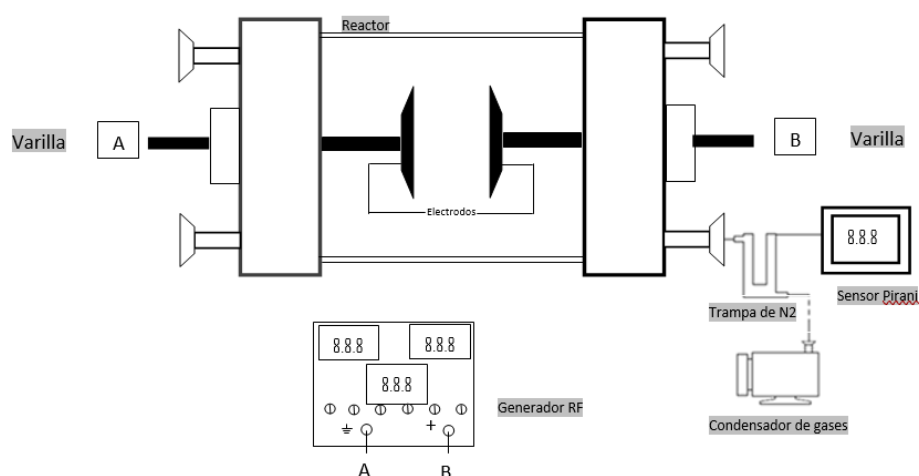


Ilustración 13 Esquema representativo del reactor y dispositivos periféricos. (Elaboración propia)

Una vez que la presión y las descargas se estabilizan, se deja que el plasma interactúe con la superficie de las muestras. Ver Ilustración 14. Se usaron potencias de 20 a 100 W con incrementos de 20 W durante 10 minutos. Una vez terminados los 10 minutos se detiene el tratamiento por plasma, se abre el reactor y las muestras son extraídas para su análisis.

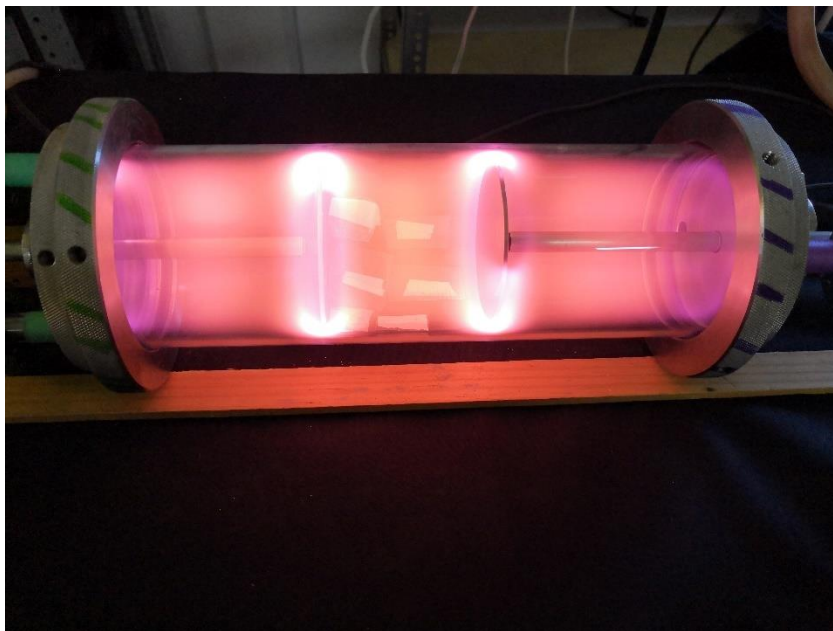


Ilustración 14 Tratamiento de polímeros por plasma. (Elaboración propia)

Análisis de resultados: Se compararán las características de las muestras antes y después del tratamiento para identificar los cambios generados por el tratamiento por plasma.

Caracterización de muestras:

La caracterización de las muestras fue realizada en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), con excepción del ángulo de contacto.

En el diagrama 2 se muestra la caracterización que se realizará antes y después del tratamiento por plasma.

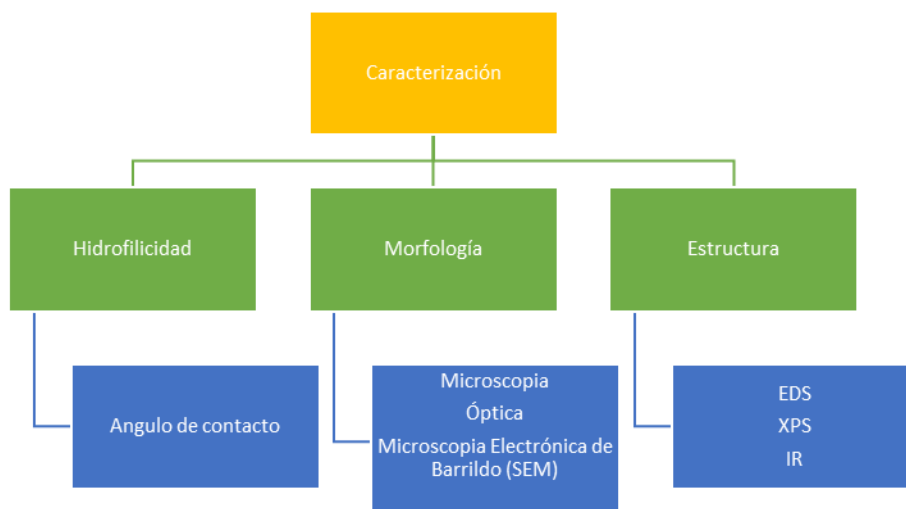


Diagrama 3 Caracterización de las muestras. (Elaboración propia)

De las muestras se obtendrá:

Morfología: Se obtendrán las características de la superficie de las muestras por medio de Microscopia Óptica y Microscopia Electrónica de Barrido.

Estructura: Para obtener los cambios estructurales se utilizará la espectroscopia de Energía Dispersiva, Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X y la espectroscopia Infrarroja.

Hidrofobicidad: Se obtendrán las características de mojabilidad de las muestras antes y después del tratamiento por medio del ángulo de contacto.

Se estudió la morfología de los materiales por medio de: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopia Electrónica de Transmisión, Microscopía Óptica (MO), la estructura química por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) y Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), la hidrofobicidad de las muestras por medio del ángulo de contacto.

Análisis Morfológico

a) Microscopía Electrónica de Barrido

Con la Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) se estudia la morfología de las partículas, así como la forma y diámetro. Se realizó en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5900LV. El material fue recubierto con Au en un evaporador Denton Vacuum Desk II a 0.066 mbars, durante 120 s y 50 mA para incrementar la transferencia de cargas eléctricas en la superficie y así obtener las características morfológicas con mayor claridad y magnificación. Se utilizaron electrones secundarios y electrones retro dispersados para la obtención de las micrografías con amplificaciones entre 500x y 10000x.

b) Microscopia Óptica

Microscopía óptica se empleó para analizar la superficie de las partículas y observar que características presentaban. Se utilizó un microscopio óptico Dino-Lite Pro-modelo AM7013MZT4 para capturar las imágenes digitales de aumento fijo de 480X.

Análisis Estructural

a) Espectroscopia de Energía Dispersiva

Se realizó con una sonda modelo ISIS con voltaje de aceleración de 20 kV acoplada en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5900LV, que permite, la identificación cualitativa, el análisis semicuantitativo puntual de los elementos químicos de la muestra con número atómico mayor a 6.

b) Espectroscopia Infrarroja

El análisis estructural del polímero fue realizado mediante espectroscopia infrarroja con el objetivo de identificar los grupos químicos funcionales del material. Se utilizó un espectrofotómetro infrarrojo Thermo Scientific Nicolet iS5 con celda de diamante aplicando 100

barridos en el intervalo de absorción de 4000 a 550 cm^{-1} utilizando el método de Reflectancia Total Atenuada (ATR)

c) Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X

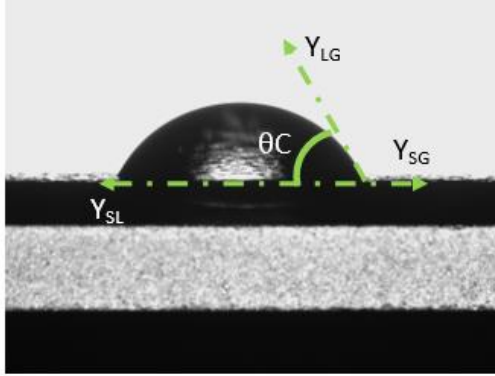
El análisis químico superficial del polímero se realizó con un espectroscopio XPS Thermo K-Alpha equipado con una fuente monocromador de rayos X de Al. El diámetro del área de análisis fue de 400 μm . Se usó una fuente de iones Ar para neutralizar cargas estáticas en las muestras.

Hidrofobicidad

El ángulo de contacto es un parámetro indicativo de la humectabilidad de la superficie del material y el medio que lo rodea. El ángulo de contacto medido a las superficies fue un ángulo de contacto de avance utilizando la técnica de la gota Sessile. Se colocaron sobre la superficie de los polímeros gotas de agua destilada de 2 a 30 μL incrementando su volumen en 2 μL en cada medición.

Se tomaron 15 fotografías a cada gota sobre la superficie de cada uno de los polímeros tratados en este trabajo con una cámara digital. Para obtener el valor del ángulo de contacto se procesaron las fotos con el programa ImageJ.

En la ilustración 15 se muestra cómo se realiza la medición del ángulo de contacto por el método Sessile.



Y_{SV} = Tensión superficial entre sólido y gas.

Y_{SL} = Tensión superficial entre sólido y líquido.

Y_{LV} = Tensión superficial entre líquido y gas.


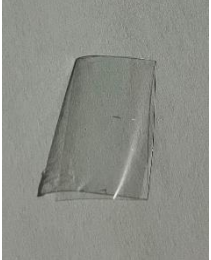


θ_C = Ángulo de contacto






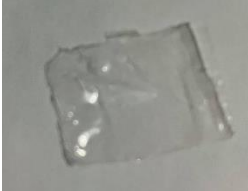
Ilustración 15 Medición de ángulo de contacto, método Sessile. (Elaboración propia)

CAPÍTULO IV

Resultados y Discusión

En la siguiente tabla se muestran los residuos poliméricos utilizados para tomar las muestras a examinar.

Polímero	A) Residuo	B) Sección	Descripción
PET (Tereftalato de polietileno)			<p>En el inciso A se puede observar el residuo a utilizar que es una botella de refresco, la cual es transparente, resistente a caídas, flexible, de peso ligero, con textura lisa en la parte superior y con algunos bordes en la parte inferior.</p> <p>La muestra para tratar que se observa en el inciso B se tomó de la parte lisa de la botella.</p>
PS (Poliestireno)			<p>En el inciso A se muestra un plato de unicel, es de color blanco, utilizado para colocar alimentos frescos como carne o verduras, su superficie es lisa y cuenta con ciertos bordes</p>

			<p>levantados en las orillas y el centro, además es usado como aislante térmico, textura blanda.</p>
<p>PSE (Polietersulfona)</p>			<p>Se observa en A una cuchara desechable, la cual fue seleccionada como muestra. El inciso B) muestra la sección tomada para el análisis. Esta es de color blanco, rígida, quebradiza, un poco gruesa de los bordes.</p>
<p>HDPE (Polietileno de alta densidad)</p>			<p>Se tomó como muestra la tapa de una botella de detergente, esta es de dura, resistente, de color blanco y con textura en la parte de arriba y lados.</p>
<p>LDPE (Polietileno de Baja densidad)</p>			<p>La muestra fue tomada de una bolsa de plástico, la cual es incolora, ligera, de acuerdo con el uso es flexible, resistente,</p>

			impermeable.
--	--	--	--------------

Tabla 3 Residuos a examinar (elaboración propia).

Los residuos mostrados en la tabla fueron seccionados y se adhirieron al reactor, posteriormente fueron sometidos a tratamiento por plasma de resplandor durante 10 minutos con potencias de 20 W. La ilustración 16 muestra el tratamiento realizado a los polímeros.

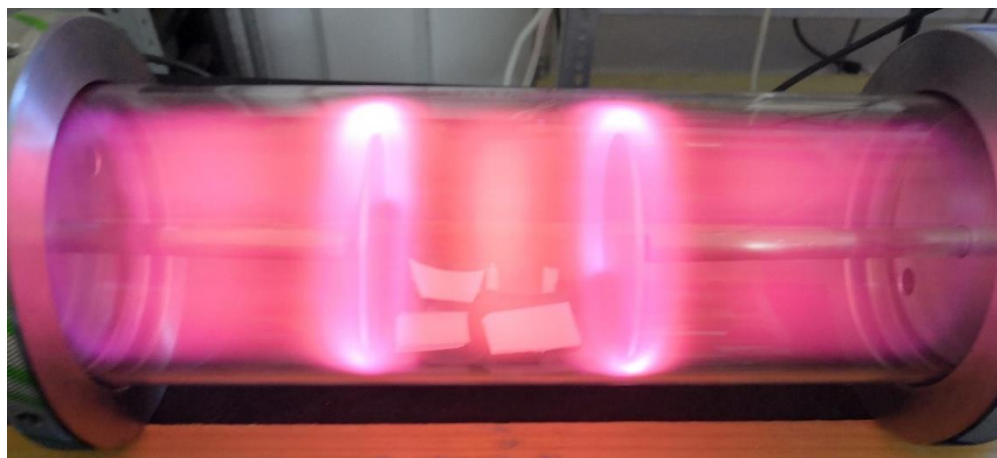


Ilustración 16. Tratamiento por plasma de residuos 20 W, 10 min.

Caracterización de las muestras antes del tratamiento

A continuación, se muestran los resultados de los análisis realizados a los residuos antes de ser tratados por los plasmas de resplandor.

Morforlogía

Se presenta la morfología de las muestras a tratar, obtenida por medio de Microscopia Electrónica de Barrido para cada una de las opciones seleccionadas.

En la ilustración 17 se muestra la micrografía obtenida de la superficie de la botella (PET), se puede observar que la morfología es lisa con algunos levantamientos, y en algunas zonas tiene textura rugosa.

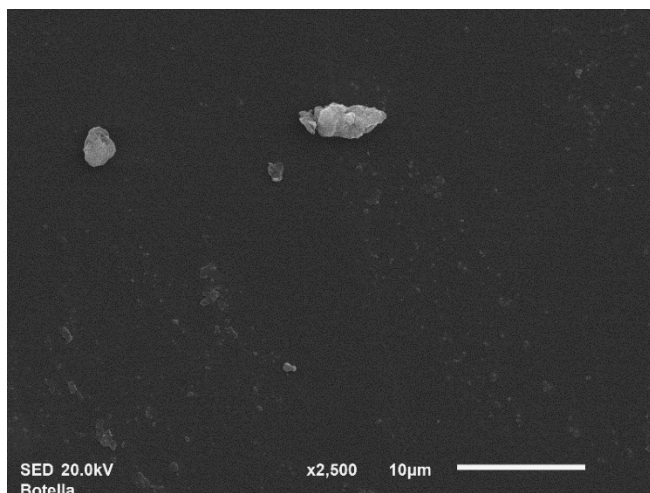


Ilustración 17. Micrografía de la superficie de la botella (PET).

En la ilustración 18 se muestra se muestra la micrografía del plato de unicel (PS). Se puede observar que la superficie en genera es lisa con algunos levantamientos, con algunas irregularidades.

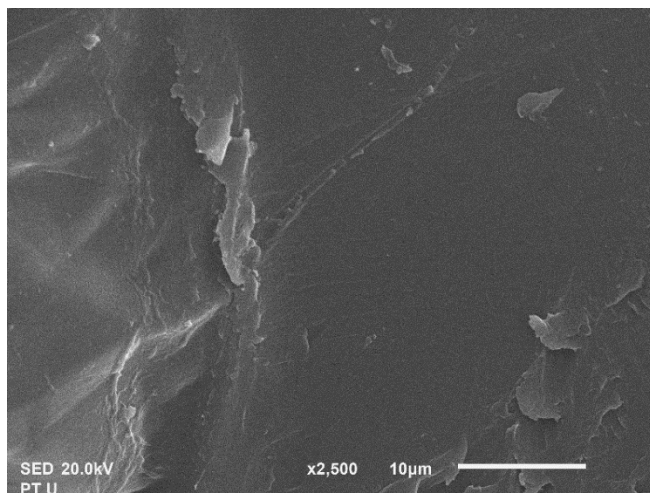


Ilustración 18. Micrografía de la superficie del plato de unicel (PS).

En la ilustración 19 se muestra la superficie de PSE, la muestra fue obtenida de una cuchara de plástico. Se observa un grupo de partículas, superficie principalmente lisa, con regiones en donde la textura es rugosa, además forman algunos bordes, se observan también ciertos aglomerados.

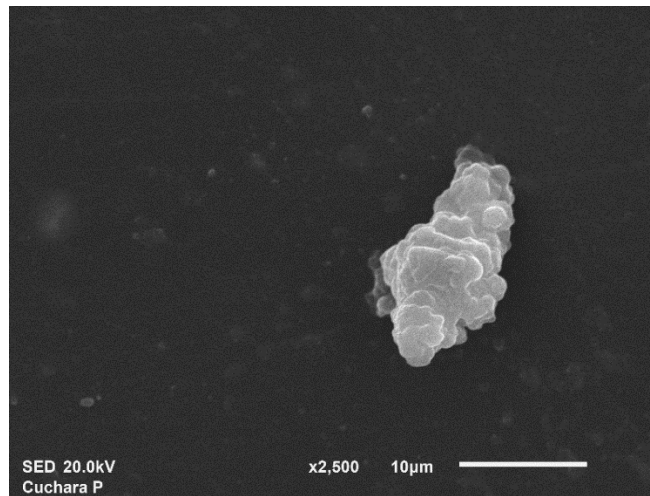


Ilustración 19 MEB de la morfología de la cuchara (PSE).

En la ilustración 20, presenta la morfología de la tapa de detergente (HDPE), se puede observar que la superficie es básicamente lisa, con irregularidades dadas por ciertos aglomerados y formación de bordes.

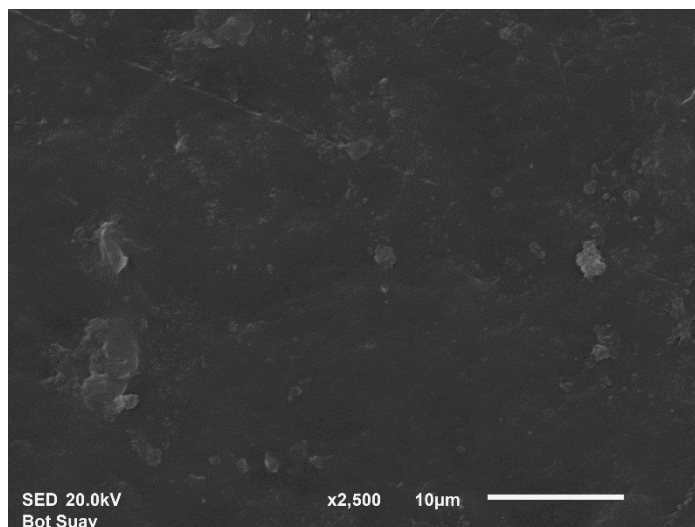


Ilustración 20. Micrografía tapa de detergente (HDPE).

En la ilustración 21 se muestra la superficie de pega-solo (LDPE), en la micrografía se observa que tiene algunos levantamientos particulados, la textura es principalmente lisa sin irregularidades.

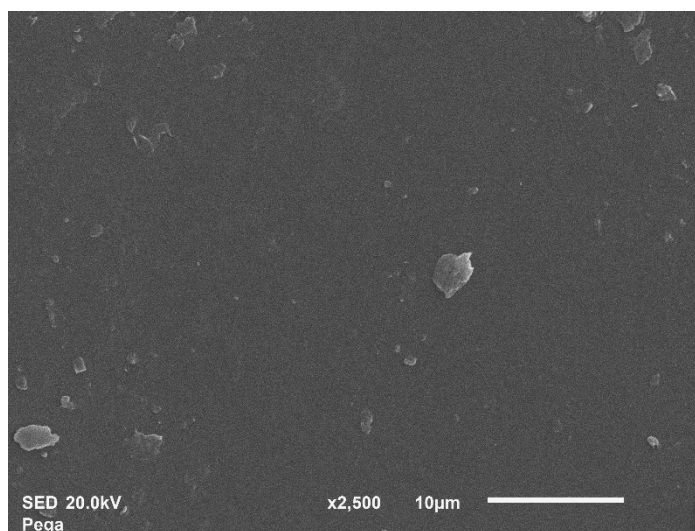


Ilustración 21. Micrografía de la muestra de pega-solo (LDPE).

Estructura química

De acuerdo con el análisis EDS la estructura de la botella de plástico analizada está formada principalmente por C (Carbono) siendo el de mayor porcentaje atómico y Oxígeno (O), como se muestra en la tabla 4. El análisis fue realizado tomado el promedio de 6 áreas diferentes de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	56.78%
O	43.22%
TOTAL	100%

Tabla 4 Estructura de botella de plástico PET. (Elaboración propia)

La estructura de un plato de unigel analizado cuenta con Carbono con porcentaje atómico mayoritario y Aluminio, tal como se muestra en la tabla 5.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	99.72%
Al	0.28%
TOTAL	100%

Tabla 5 Estructura de Plato de unigel. (Elaboración propia)

La estructura de la cuchara de plástico analizada cuenta con un porcentaje del 100% de C(Carbono) tal como se muestra en la tabla 6. La información fue tomada de 7 áreas diferentes de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	100%

Tabla 6 Estructura de cuchara de plástico. (Elaboración propia)

La estructura del taparrosca de una botella de detergente, cuenta con un porcentaje de Carbono del 100%, tal como se muestra en la tabla 7.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	100%

Tabla 7 Estructura de taparrosca de botella de detergente. (Elaboración propia)

De acuerdo con los resultados del análisis EDS la estructura del plástico pega-solo analizada cuenta en su estructura con Carbono teniendo el mayor porcentaje atómico, Cloro y Oxígeno, tal como se muestra en la tabla 8. El análisis se realizó tomando 7 áreas diferentes de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	63.54%
Cl	35.60%
O	0.86%
TOTAL	100%

Tabla 8 Estructura de plástico pega-solo. (Elaboración propia)

Caracterización de las muestras después del tratamiento

A continuación, se muestran los resultados de los análisis realizados a los residuos después de ser tratados por los plasmas de resplandor.

- **Tratamiento: 10 min, 20 W de potencia**

Morforlogía

Se presenta la morfología de las muestras después del tratamiento por plasma de resplandor durante 10 min a potencia de 20 W obtenida por medio de Microscopía Electrónica de Barrido para cada una de las opciones seleccionadas.

En la ilustración 22 se muestra la superficie de la botella (PET) después del tratamiento, en el inciso A) se observa la muestra antes del tratamiento y en el B) se puede observar que la morfología después del tratamiento, en la cual se presentan ciertas irregularidades, parece erosionada y presenta zonas con levantamientos.

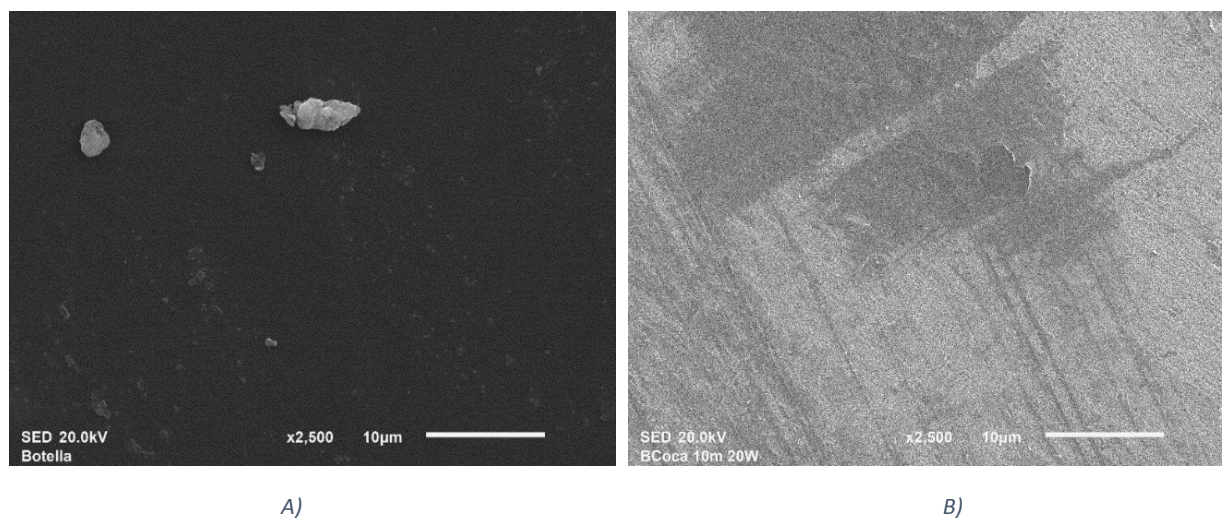


Ilustración 22 Micrografía de la superficie de la botella (PET) ,A) antes y B) después del tratamiento por plasma.

En la ilustración 23 se muestra la superficie del plato de unicel (PS) A) Antes y B) después del tratamiento por plasma. Se puede observar que la superficie presenta unos pequeños bordes, también se pueden observar algunos levantamientos.

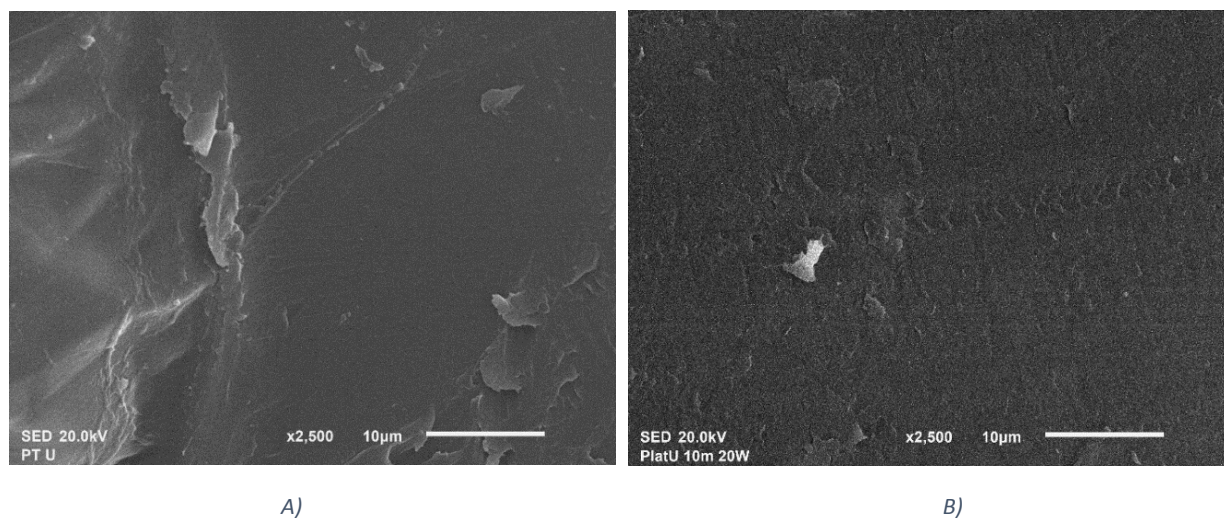


Ilustración 23 Micrografía de la superficie del plato de unigel (PS), A) antes y B) después del tratamiento por plasma.

En la ilustración 24 se muestra superficie de PSE A) antes y B) después del tratamiento, la muestra fue obtenida de una cuchara de plástico. Se observa un grupo de partículas, superficie principalmente lisa, se observan también ciertos aglomerados, se cuenta con regiones en donde la textura es rugosa.

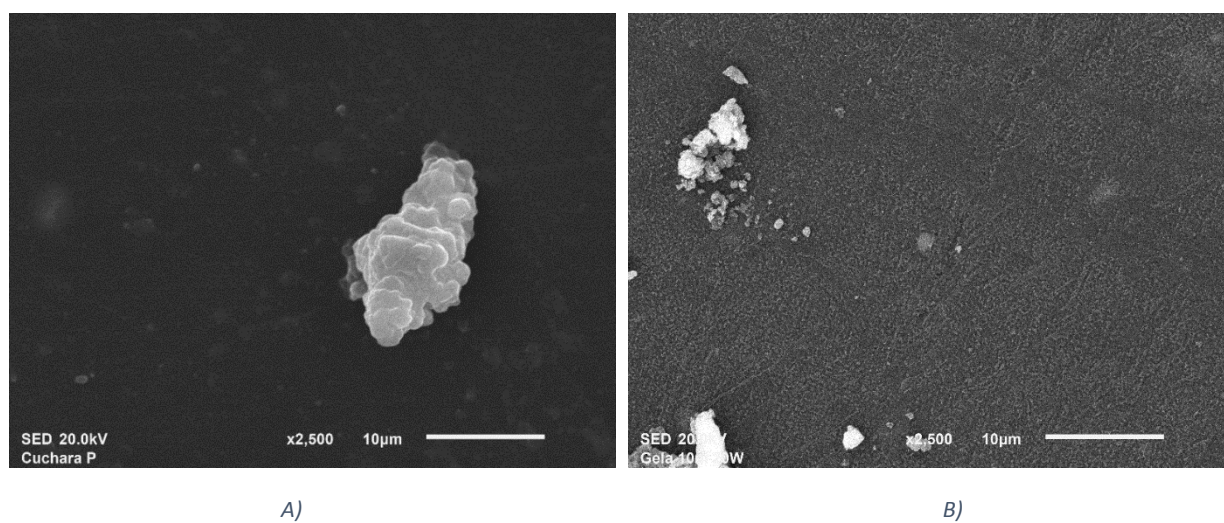


Ilustración 24 Micrografía de la superficie de la cuchara de plástico (PSE), A) antes y B) después del tratamiento por plasma.

En la ilustración 25, presenta la morfología de la tapa de detergente (HDPE) A) antes y B) después del tratamiento, se puede observar que la superficie es rugosa, con algunas irregularidades, se observan bordes de distintas dimensiones y aglomerados.

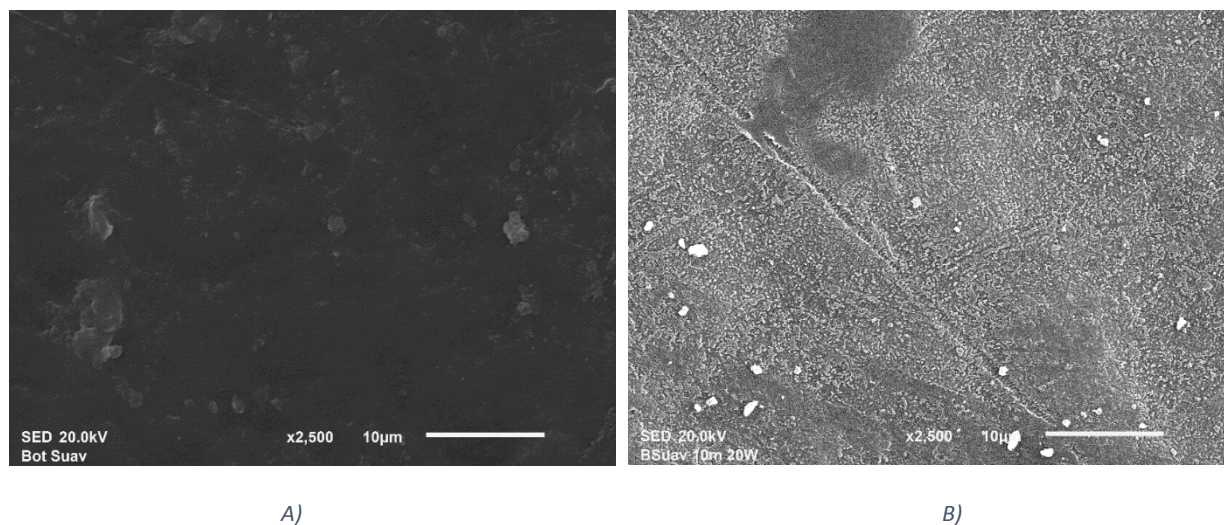


Ilustración 25 Micrografía de la superficie de la tapa de detergente (HDPE), A) antes y B) después del tratamiento por plasma.

En la ilustración 26 se muestra la superficie de pega-solo (LDPE) A) antes y B) después del tratamiento por plasma de resplandor, en la micrografía se observa que tiene algunos levantamientos particulados, la textura es principalmente lisa, cuenta con algunos aglomerados, además se pueden observar unas cuantas aberturas de distintos tamaños.

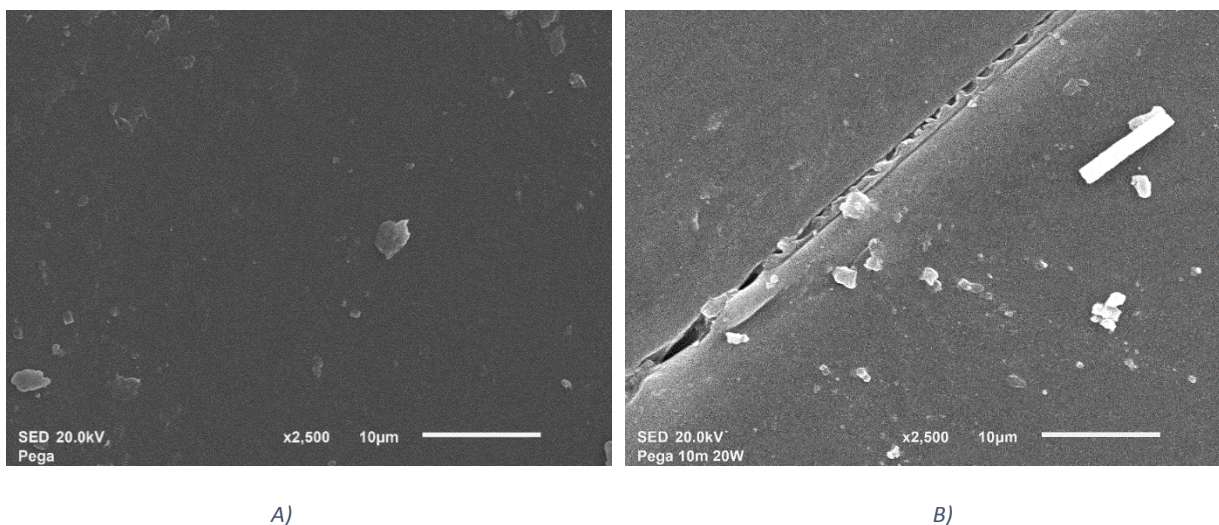


Ilustración 26 Micrografía de la superficie de pega-solo (LDPE) A) antes y B) después del tratamiento por plasma.

Estructura

De acuerdo con el análisis EDS la estructura de la botella de plástico tratada a 10 min con una potencia de 20W, se encuentra formada principalmente por C (Carbono) siendo el de mayor porcentaje atómico y oxígeno (O) como se muestra en la tabla 9. El análisis fue realizado tomado el promedio de 5 áreas diferentes de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	57.28%
O	42.72%
TOTAL	100%

Tabla 9 Estructura de botella de plástico a 20W. (Elaboración propia)

La estructura de la cuchara de plástico después del tratamiento a 20 W durante 10 min., se forma de C(Carbono) al 100% tal como se muestra en la tabla 10. La información fue tomada de 6 áreas diferentes de la muestra.

Elemento	PROMEDIO
C	100%

Tabla 10 Estructura de cuchara de plástico a 40W (elaboración propia)

De acuerdo con los resultados del análisis EDS la estructura del plástico pega-solo analizada cuenta en su estructura con porcentaje atómico mayoritario de C(carbono), seguido de Cl(cloro), Au(oro) y O(oxígeno) tal como se muestra en la tabla 11. Se realizó el análisis tomando el promedio de 5 áreas distintas de la muestra.

Elemento	PROMEDIO
C	63.83%
O	0.89%
CL	32.94%
Au	2.34%
TOTAL	100%

Tabla 11 Estructura de pega-solo a 20W. (Elaboración propia)

La estructura del plato de unigel analizada cuenta con un porcentaje del 100% de C(Carbono) tal como se muestra en la tabla 12. La información fue tomada de 5 áreas diferentes de la muestra.

Elemento	PROMEDIO
C	100.00%

Tabla 12 Estructura de plato de unigel a 20W (elaboración propia)

La estructura del taparrosca de una botella de detergente, cuenta con un porcentaje de Carbono del 100%, tal como se muestra en la tabla 13. la información se tomó de 5 áreas diferentes de la muestra.

Elemento	PROMEDIO
C	100%

Tabla 13 Estructura de taparrosca de botella de detergente a 20W. (Elaboración propia)

- **Tratamiento: 10 min, 40 W de potencia**

Morfología

A continuación, se presenta la morfología de las muestras después del tratamiento por plasma de resplandor a 10 min a una potencia de 40 W obtenida por medio de Microscopía Electrónica de Barrido aplicada en las muestras con las que se han estado trabajando.

En la ilustración 27 se muestra la superficie de la botella (PET) comparada en 3 distintas etapas, la A) en la que se observa la muestra antes del tratamiento, el inciso B) se examinó la muestra después del tratamiento a 20W y en el inciso C) la muestra se fue tratada a 40W de potencia en la cual se observa que tiene levantamientos pronunciados en toda la superficie, la textura sigue siendo lisa, además se pueden identificar pequeños aglomerados. Se observa que a

comparación del tratamiento de 20 W, el de 40 W produce el levantamiento de una capa de material.

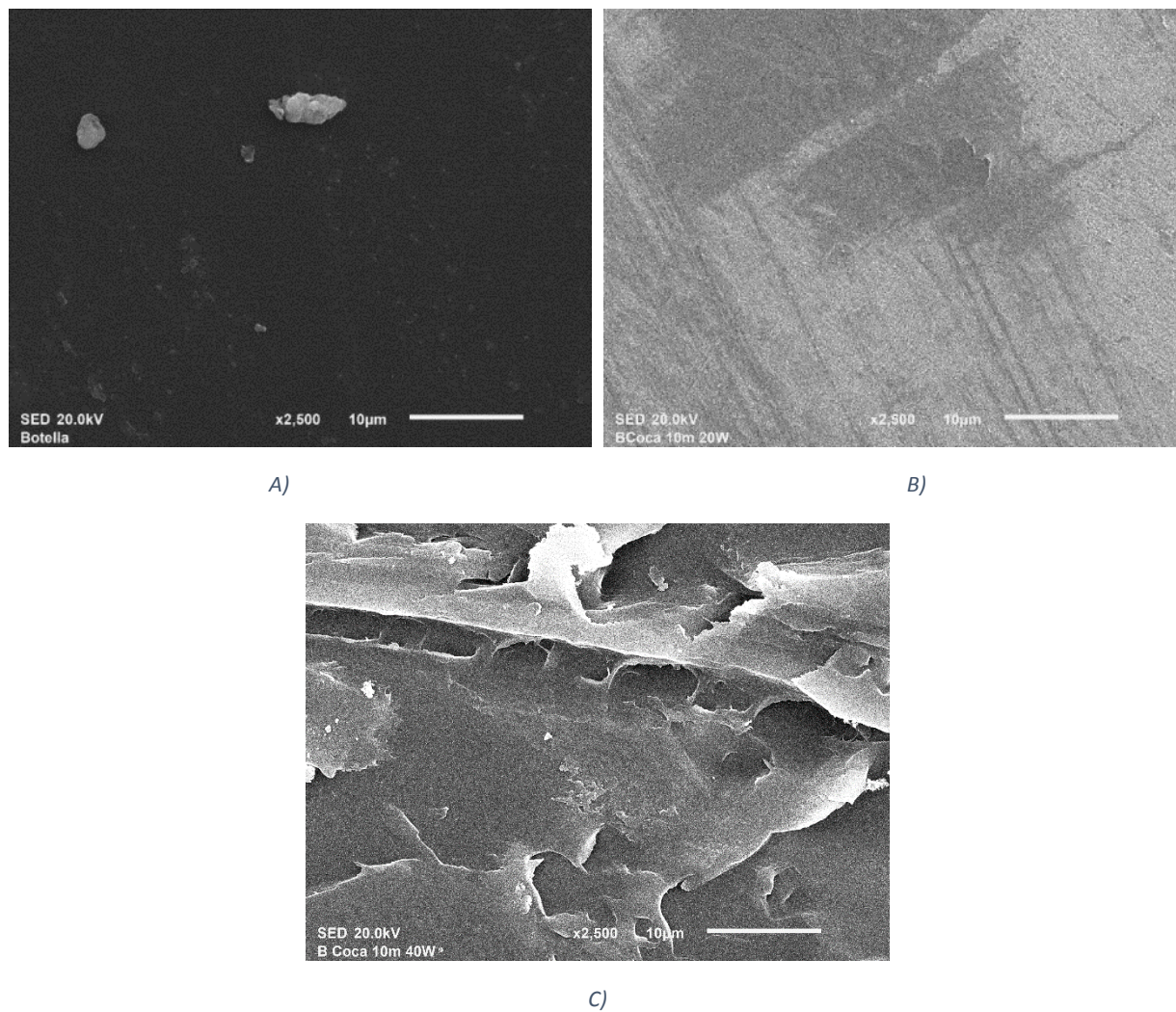


Ilustración 27 Micrografía de la superficie de botella de refresco (PET) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.

De acuerdo con la ilustración 28, se pudo observar que la superficie del plato de unicel (PS) que se encuentra comparada en etapas diferentes del tratamiento tuvo cambios bastante notorios en la textura, ya que en el inciso A) y B) su textura es más lisa que en el C) que fue tratado a una potencia de 40 W, se formaron aglomerados y disminuyeron los bordes que se podían observar en los primeros incisos.

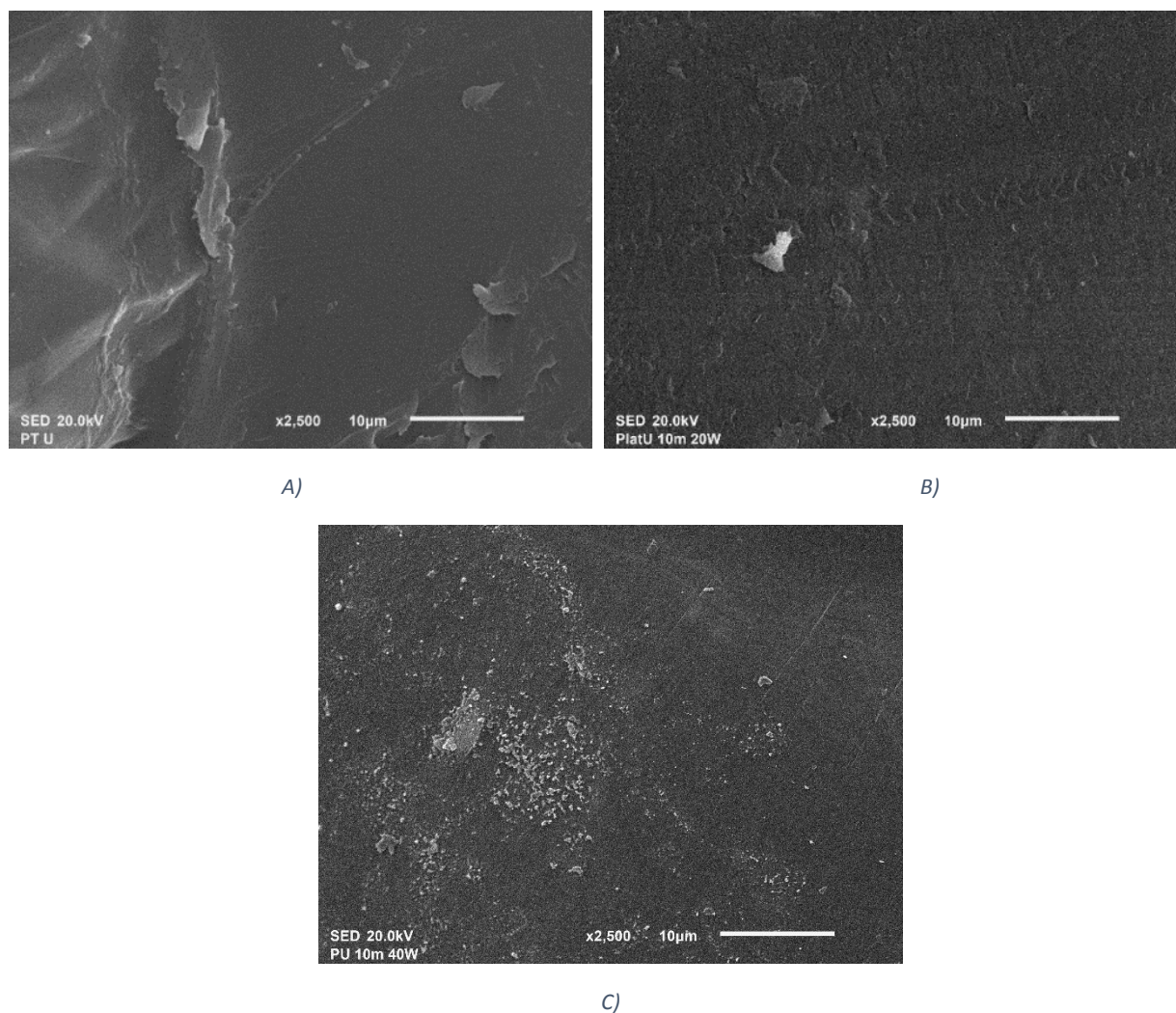


Ilustración 28 Micrografía de la superficie de plato de unicel (PS) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.

En la ilustración 29 se muestra la superficie de PSE, esta muestra fue tomada de una cuchara de plástico, comparada con el inciso A) que su superficie era lisa y B) que comienza a

estar erosionada, en el inciso C) al realizar el tratamiento con una potencia de 40W cambio la textura a rugosa, con zonas con levantamientos, además de ciertos aglomerados.

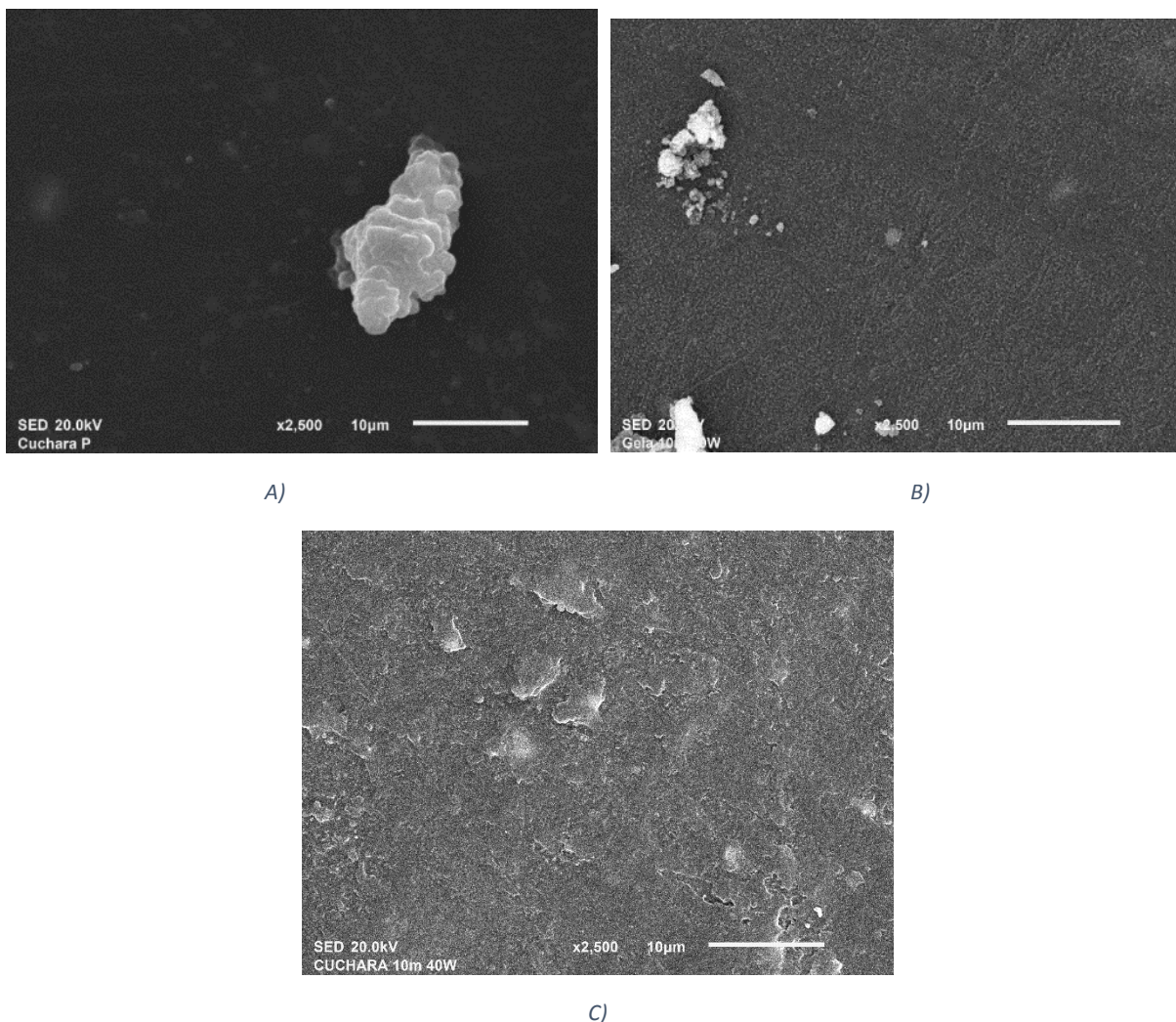


Ilustración 29 Micrografía de la superficie de cuchara de plástico (PSE) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.

La morfología de la muestra tomada de una tapa de botella de detergente, cambio notoriamente al ser tratada con una potencia de 40W, en la ilustración 30, A comparación con el inciso A) que la textura es completamente lisa y la B) que la superficie presenta zonas con erosión, aglomerados y algunas brechas, en el inciso C) se observa que la superficie

mayoritariamente tiene una textura rugosa, con bordes, para el tratamiento de 40 W la superficie erosionada es mayor a la que no sufrió cambios.

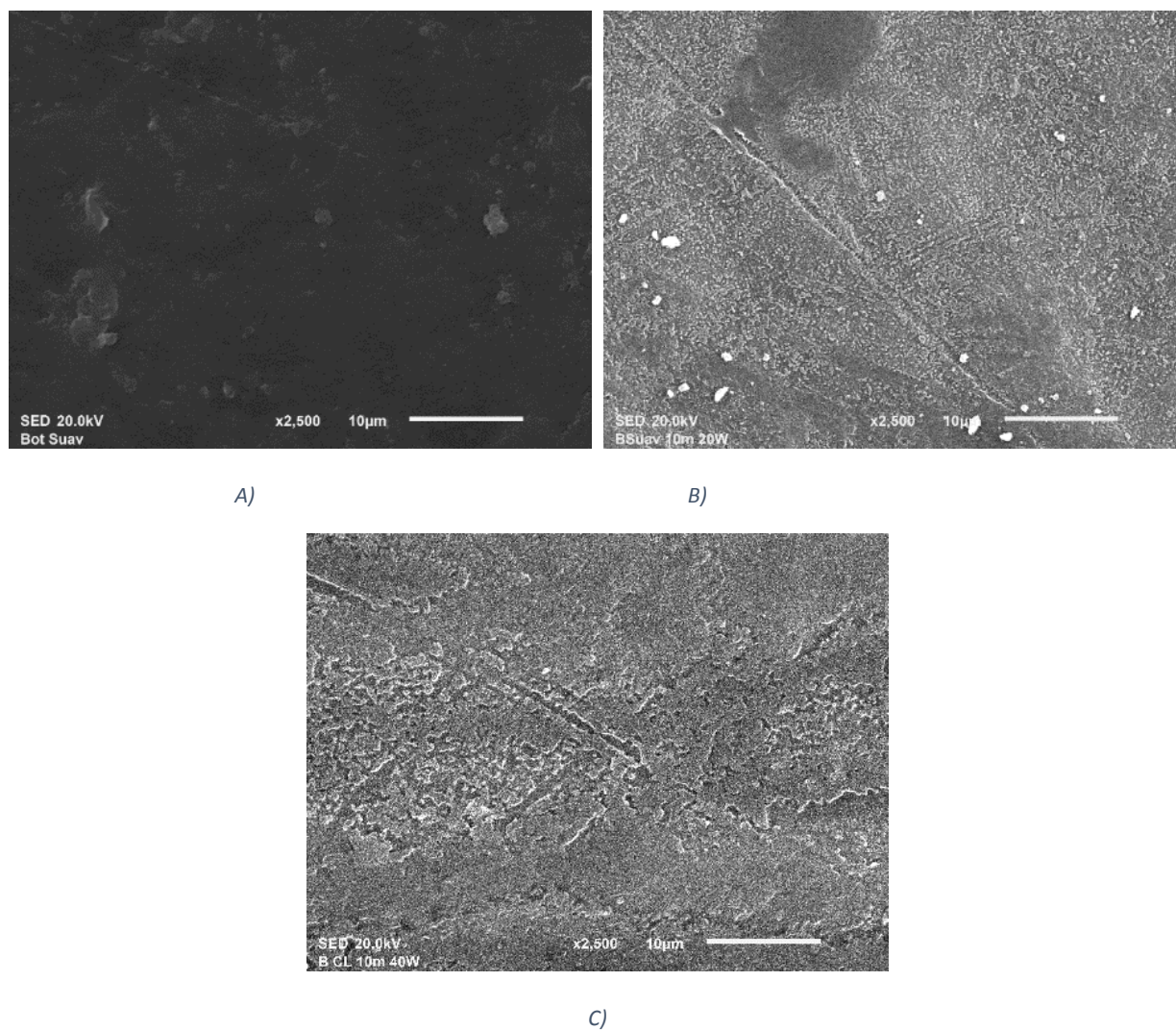
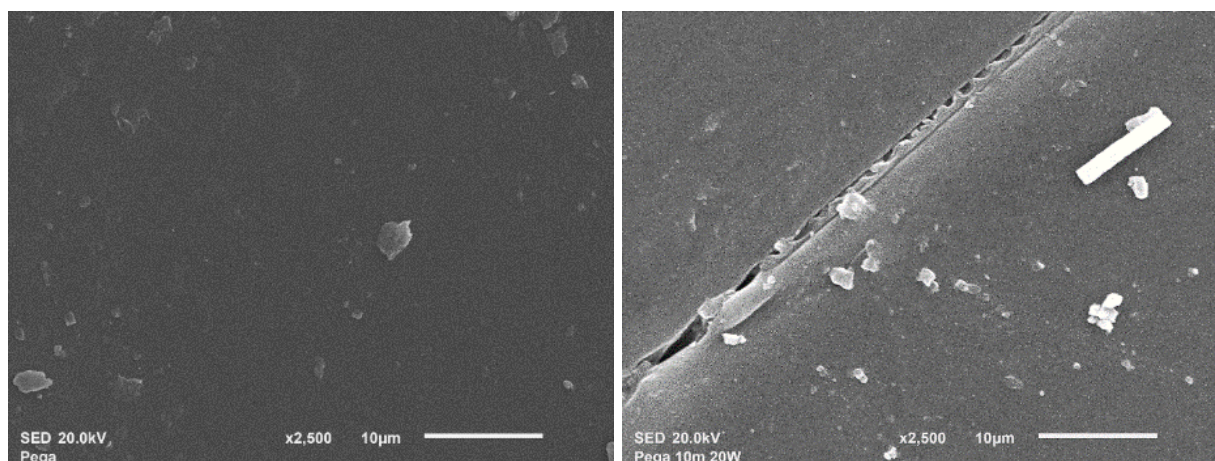


Ilustración 30 Micrografía de la superficie de tapa de botella de detergente (HDPE) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.

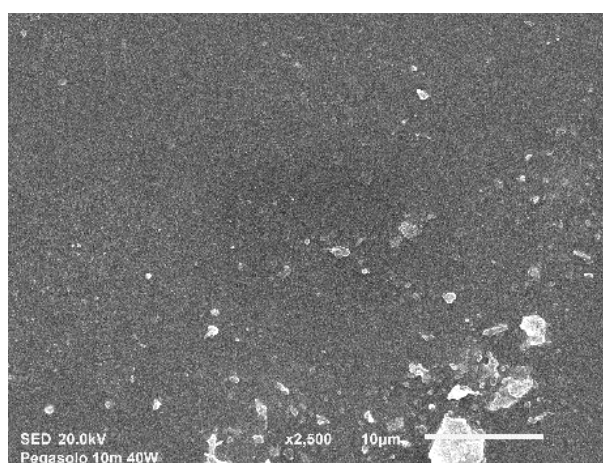
La morfología de la muestra tomada de una tapa de pega-solo, se muestra en la ilustración 31, A) antes del tratamiento, B) después de ser trata a 20 W, se observa que en ambos casos la superficie es lisa y presenta algunas irregularidades, sin embargo, no se muestras mayores

cambios. Al realizar el tratamiento de 40 W se observan levantamientos de distintos tamaños, con una textura levemente rugosa, además de aglomerados muy pequeños en toda la superficie.



A)

B)



C)

Ilustración 31 Micrografía de la superficie de pega-solo (LDPE) A) antes, B) después del tratamiento a 20W y C) después del tratamiento a 40W.

Estructura química.

De acuerdo con el análisis EDS la estructura de la botella de plástico tratada a 10 min con una potencia de 40W, se encuentra formada principalmente por C (Carbono) siendo el de mayor

porcentaje atómico, N (nitrógeno) como se muestra en la tabla 14 . El análisis fue realizado tomado el promedio de 6 áreas diferentes de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	57.85%
N	1.34%
O	40.81%
TOTAL	100.00%

Tabla 14 Estructura de botella de plástico a 40W. (Elaboración propia)

La estructura de la cuchara de plástico después del tratamiento a 40 W durante 10 min., se forma de C(Carbono) con el mayor porcentaje atómico, N(nitrógeno), O (oxígeno) y Ca (calcio) tal como se muestra en la tabla 15. La información fue tomada de 6 áreas diferentes de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	93.96%
N	2.06%
O	2.97%
Ca	0.98%
TOTAL	100.00%

Tabla 15 Estructura de cuchara de plástico a una potencia de 40W. (Elaboración propia)

De acuerdo con los resultados del análisis EDS la estructura del plástico pega-solo analizada cuenta en su estructura con porcentaje atómico mayoritario de C(carbono), seguido de Cl(cloro), O(oxígeno) y N(nitrógeno) tal como se muestra en la tabla 16. Se realizo el análisis tomando el promedio de 6 áreas distintas de la muestra.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	53.04%
N	1.73%
O	5.35%
Cl	39.89%
TOTAL	100.00%

Tabla 16 Estructura de plástico pega-solo a 40 W de potencia. (Elaboración propia)

La estructura de un plato de unicel después del tratamiento de 40 W por 10 min. cuenta con C(Carbono) con porcentaje atómico mayoritario y N(nitrógeno) , el análisis se realizó tomando en cuenta el promedio de 6 áreas diferentes de la muestra, tal como se muestra en la tabla 17.

ELEMENTO	PROMEDIO
C	96.91%
N	3.09%
TOTAL	100.00%

Tabla 17 Estructura de plato de unicel a 40 W de potencia. (Elaboración propia)

La estructura del taparrosca de una botella de detergente, cuenta con un porcentaje mayoritario de Carbono del 94.78%, seguido de oxígeno y por último nitrógeno tal como se muestra en la tabla 18. El análisis se realizó tomando 6 áreas distintas de la muestra

ELEMENTO	PROMEDIO
C	94.78%
N	1.66%
O	3.56%
TOTAL	100.00%

Tabla 18 Estructura de taparrosca a 40 W de potencia. (elaboración propia)

Análisis Estructural

Grupos químicos funcionales

Los principales grupos funcionales de las muestras de residuos poliméricos fueron analizados por Espectroscopia Infrarroja (IR-ATR) antes del tratamiento por plasma. El análisis se muestra en las siguientes ilustraciones.

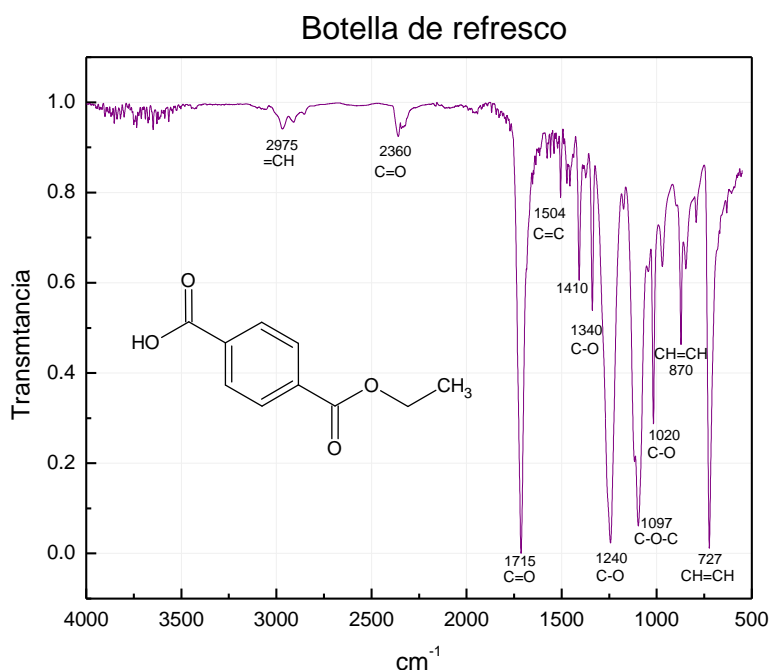


Ilustración 32 Espectros IR de botella de PET. (elaboración propia)

El espectro Infrarrojo de la botella de refresco (PET), se presenta en la ilustración 32. Se puede observar que el pico correspondiente a la absorción centrada en 2975 cm⁻¹ corresponde a los grupos funcionales a =CH, las bandas centradas en 2360 cm⁻¹ y 1725 cm⁻¹ corresponden a los enlaces C=O, mientras que las absorciones de 1504 cm⁻¹ y 1410 cm⁻¹ son características de los enlaces C=C, el enlace C-O aparece en las bandas de absorción centradas en 1410 cm⁻¹, 1340 cm⁻¹ y 1240 cm⁻¹. La absorción centrada en 1097 cm⁻¹ es característica de los enlaces C-O-C,

mientras que el pico localizado en 1020 cm^{-1} corresponde a C-O. Por último, los picos localizados en 870 cm^{-1} y 727 cm^{-1} son característicos de los dobles enlaces CH=CH, como se observa en la figura, todos estos enlaces corresponden a la estructura molecular de la molécula de PET. (Dos Santos Pereira, et. Al. 2017)

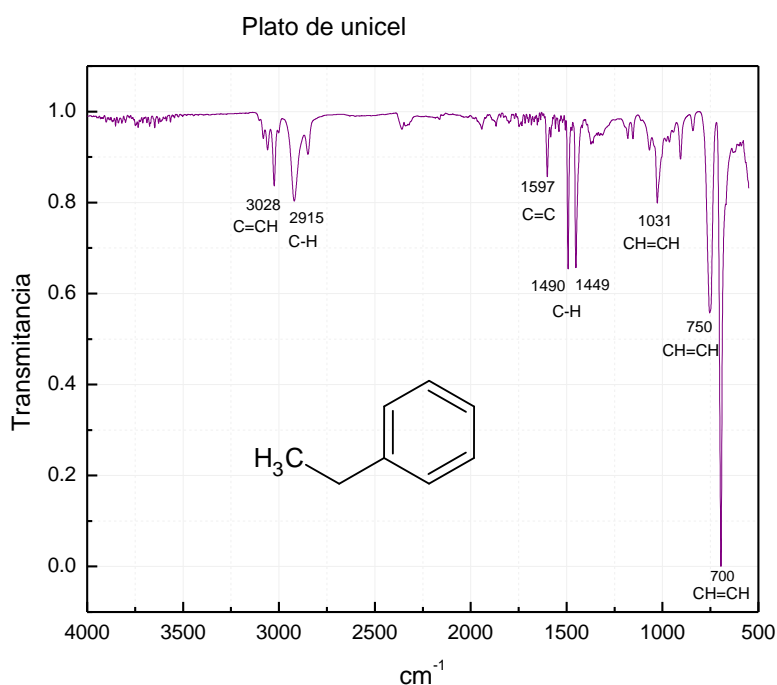


Ilustración 33 Espectros IR de Plato de Unigel. (Elaboración propia)

El espectro Infrarrojo del plato de unigel (PS), se presenta en la ilustración 33. El análisis IR muestra vibraciones en 3028 cm^{-1} que corresponde al enlace C=CH, la siguiente banda centrada en 2915 cm^{-1} se les asigna a los grupos C-H, en 1597 cm^{-1} se encuentran los picos característicos de los grupos C=C, en seguida se observa en 1490 cm^{-1} y 1449 cm^{-1} las absorciones de C-H. Para los picos localizados en 1031 cm^{-1} , 750 cm^{-1} y 700 cm^{-1} corresponden a los enlaces CH=CH. Todos los enlaces anteriores son característicos de la molécula de Estireno. (Dai, K., et al., 2020)

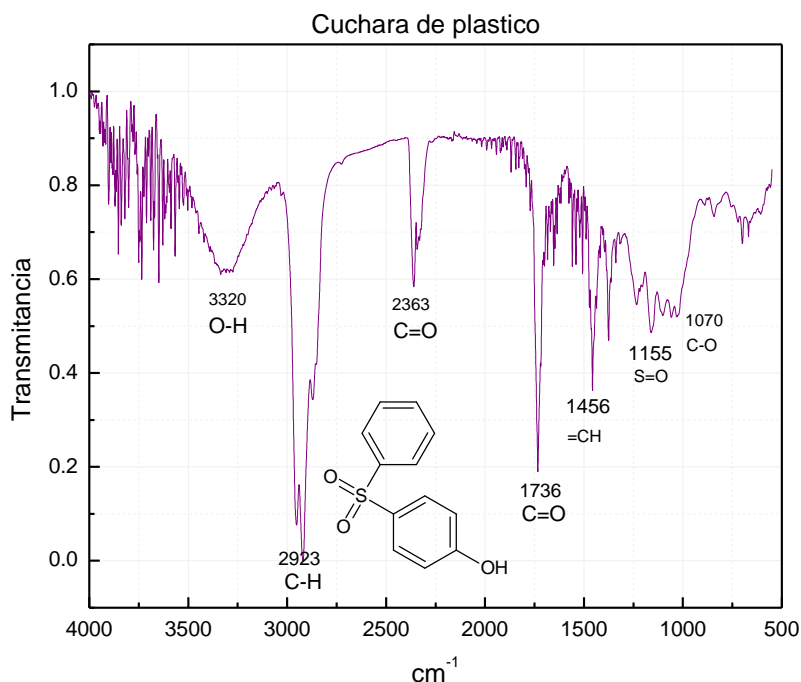


Ilustración 34 Espectros IR de Cuchara de plástico. (Elaboración propia)

El espectro Infrarrojo de la cuchara de plástico (PSE), se presenta en la ilustración 34. Se observa el pico centrado a 3320 cm^{-1} corresponde a los enlaces OH, para la absorbancia localizada en 2923 cm^{-1} les corresponde a los grupos funcionales C-H, la absorción centrada en 2363 cm^{-1} se asigna a los enlaces C=O. Para el pico centrado en 1736 cm^{-1} se le asigna el grupo funcional C=O, mientras que en el pico de 1456 cm^{-1} se encuentran los enlaces =CH, por otra parte la estructura de la molécula de poliéster sulfona tiene S=O estos enlaces se encuentran localizados en el pico 1155 cm^{-1} y los C-O se encuentran en 1070 cm^{-1} . (Liaw, D, J 1977)

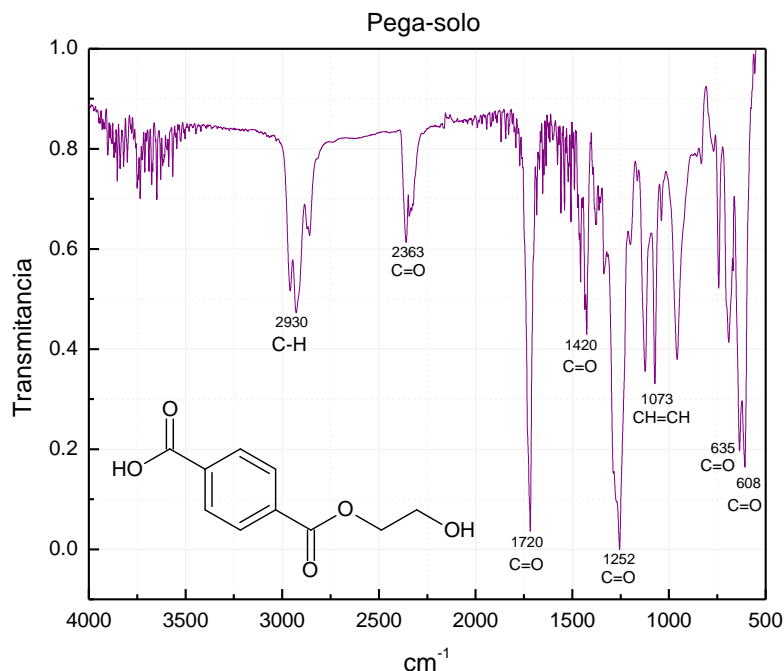


Ilustración 35 Espectros IR de Pega-solo. (Elaboración propia)

El espectro Infrarrojo del pega-solo (LDPE), se presenta en la ilustración 35. Se puede observar que el pico correspondiente a la absorción centrada en 2930 cm^{-1} se asigna a los grupos funcionales C-H, las bandas centradas en 2363 cm^{-1} , 1720 cm^{-1} , 1420 cm^{-1} y 1252 cm^{-1} corresponden a los enlaces C=O, el enlace CH=CH aparece en las bandas de absorción centradas en 1073 cm^{-1} . Los picos con centro en 635 cm^{-1} y 608 cm^{-1} son característicos de los enlaces C=O. (Ge, 2013)

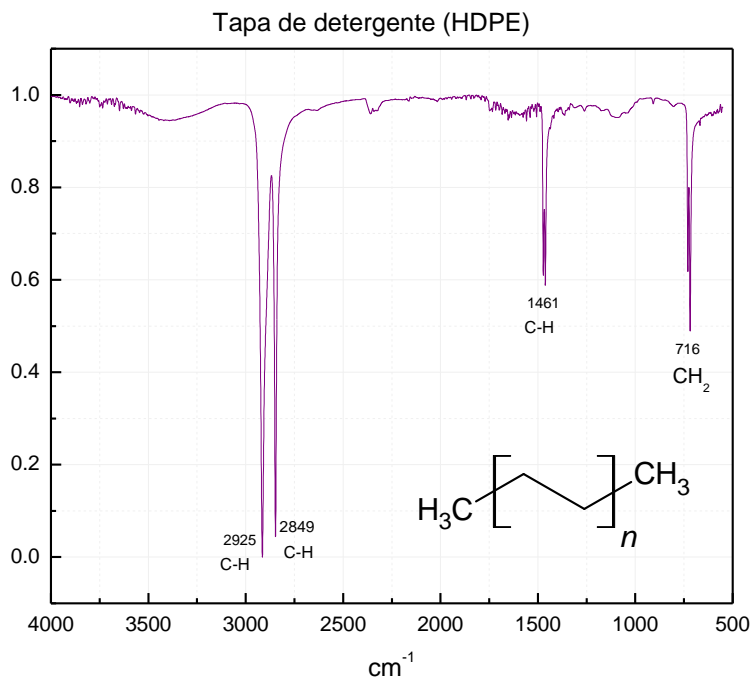


Ilustración 36 Espectros IR de tapa de detergente. (Elaboración propia)

El espectro Infrarrojo de la tapa de detergente (HDPE), se observan los picos centrados en 2925 cm^{-1} , 2849 cm^{-1} y 1461 cm^{-1} corresponden a los enlaces C-H, para la absorbancia localizada al final en 716 cm^{-1} les corresponde a los grupos funcionales CH_2 , tal como se muestra en la Ilustración 36. (Sarker, Mayo 2014)

Estructura después del tratamiento por plasma

Los principales grupos funcionales de las muestras de residuos poliméricos fueron analizados por Espectroscopia Infrarroja (IR-ATR) después del tratamiento por plasma con un tiempo de 10 min a potencias de 20 W y 40 W durante. El análisis se muestra en las siguientes ilustraciones.

En la ilustración 37 se muestra la comparación de los espectros de la botella de refresco antes del tratamiento (morado), tratado a 20 W (azul) y a 40 W (naranja). Se observa que no hay

cambios en los principales picos de absorción, los grupos funcionales se conservan sin modificaciones aun después de los tratamientos.

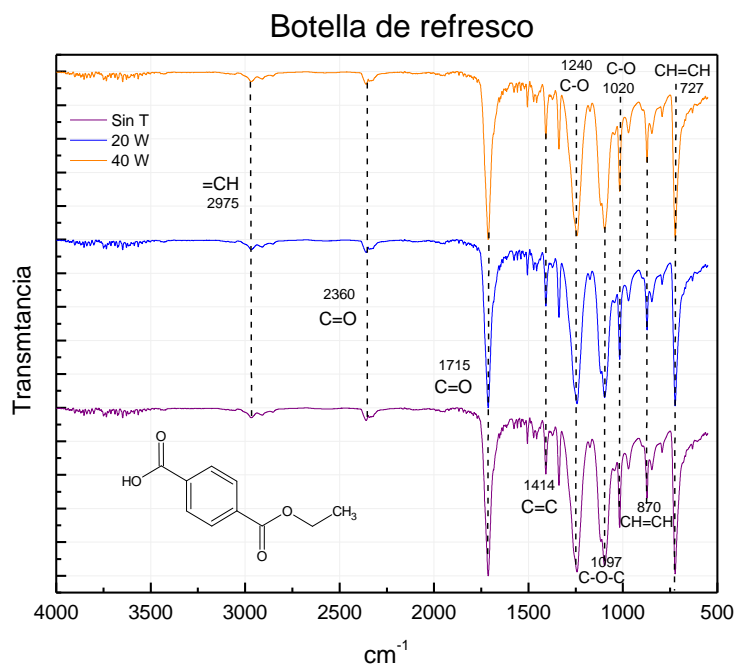


Ilustración 37 Comparación de Espectros IR de botella de refresco antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia)

En la ilustración 38 se muestra la comparación de los espectros del plato de unigel antes del tratamiento (morado), tratado a 20 W (azul) y a 40 W (naranja). No se observan cambios significativos en los grupos funcionales aun después del tratamiento, Se conservan los grupos funcionales característicos del Poliestireno.

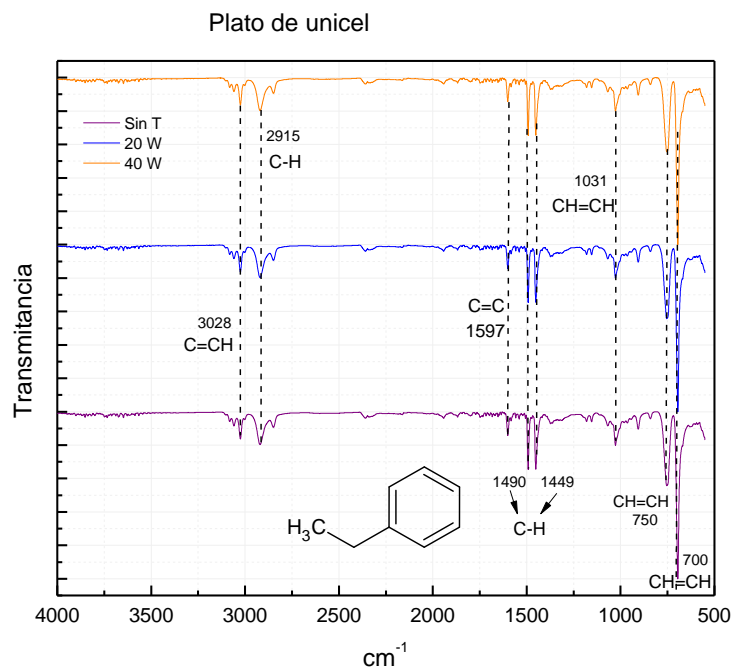


Ilustración 38 Comparación de Espectros IR plato de unicel antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia)

En la ilustración 39 se muestra la comparación de los espectros de la cuchara de plástico antes del tratamiento (morado), tratado a 20 W (azul) y a 40 W (naranja). Se puede observar que no presentan cambios notorios en los grupos funcionales aun aplicando el tratamiento.

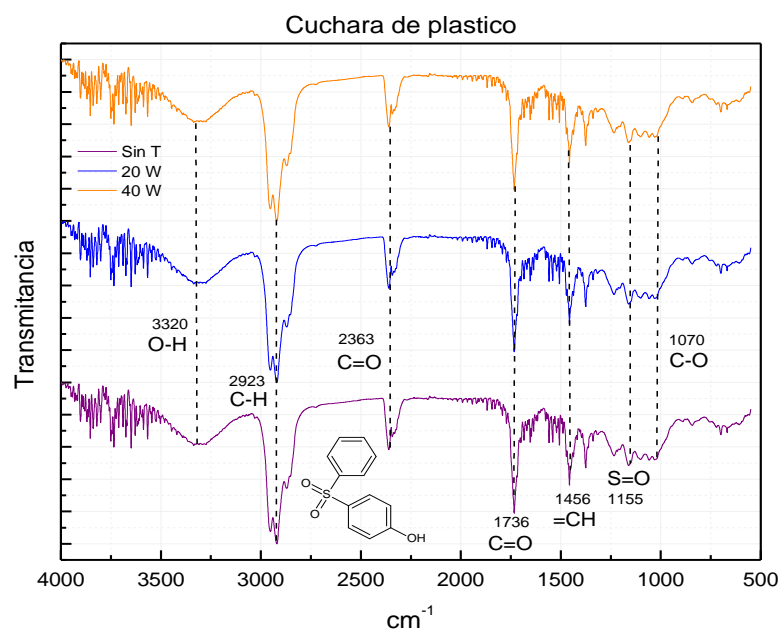


Ilustración 39 Comparación de Espectros IR cuchara de plástico antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia)

En la ilustración 40 se muestra la comparación de los espectros del pega-solo antes del tratamiento (morado), tratado a 20 W (azul) y a 40 W (naranja). Los grupos funcionales no tuvieron modificaciones aun después del tratamiento.

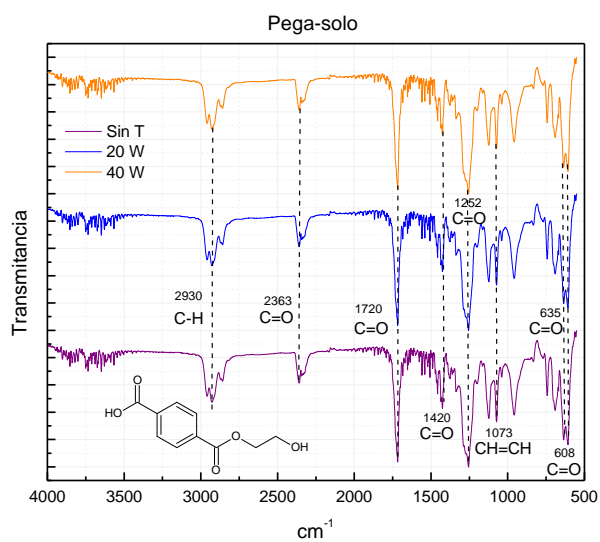


Ilustración 40 Comparación de Espectros IR cuchara de pega-solo antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia)

En la ilustración 41 se muestra la comparación de los espectros del pega-solo antes del tratamiento (morado), tratado a 20 W (azul) y a 40 W (naranja). Se observa que no surgieron cambios significativos en los grupos funcionales después del tratamiento.

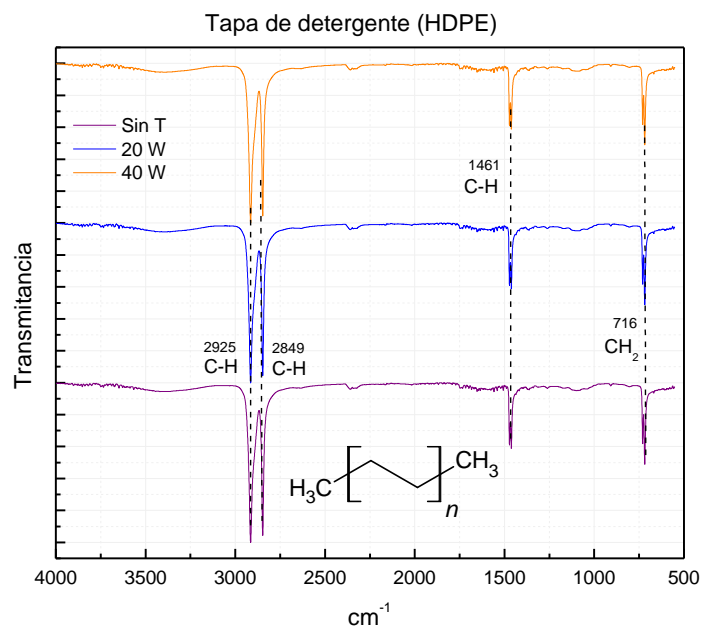


Ilustración 41 Comparación de Espectros IR cuchara de tapa de detergente antes y después del tratamiento a 20 y 40 W. (Elaboración propia)

Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS)

Las estructuras de cualquier material presentan características diferentes al volumen total del material, esto debido a que en las superficies se presenta el cambio de fases entre el material y la atmosfera, por lo tanto, al tener este contacto con el medio ambiente se tienen características que están relacionadas con los fluidos circundantes en combinación con las de la estructura del material.

Se presentan los espectros generales de las muestras analizadas previo al tratamiento por plasma y con los tratamientos a diferentes potencias, estos representan el contenido de sus respectivos elementos, se incluye además el porcentaje atómico en la gráfica.

En la Figura 42 se muestra el análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de la botella de plástico (PET) antes del tratamiento. Se observa que la estructura superficial de la muestra está formada principalmente por C y O, se observa además la presencia de N, esto puede ser debido a la interacción del material con el ambiente.

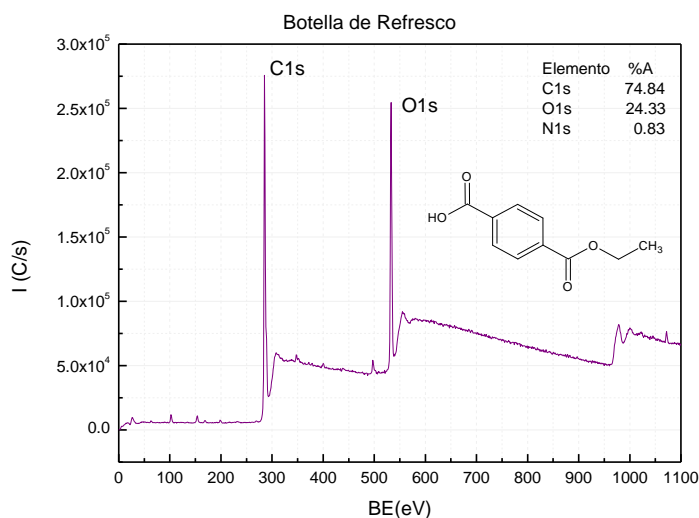


Ilustración 42 Espectro XPS general de botella de refresco PET. (Elaboración propia)

En la Figura 43 se muestra el análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), del plato de unicel (PS) antes del tratamiento. La estructura superficial de la muestra está formada por C y O, también se observa que está presente N, esto puede ser debido a la interacción del material con el ambiente.

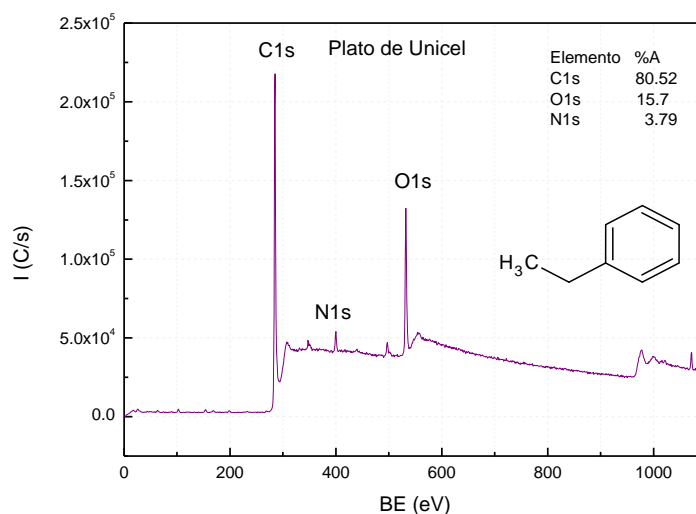


Ilustración 43 Espectro XPS general de plato de unicel PS. (Elaboración propia)

En la Figura 44 se muestra el análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de la cuchara de plástico (PSE) antes del tratamiento. Se puede observar que la muestra tiene una estructura formada por C mayoritariamente y por O.

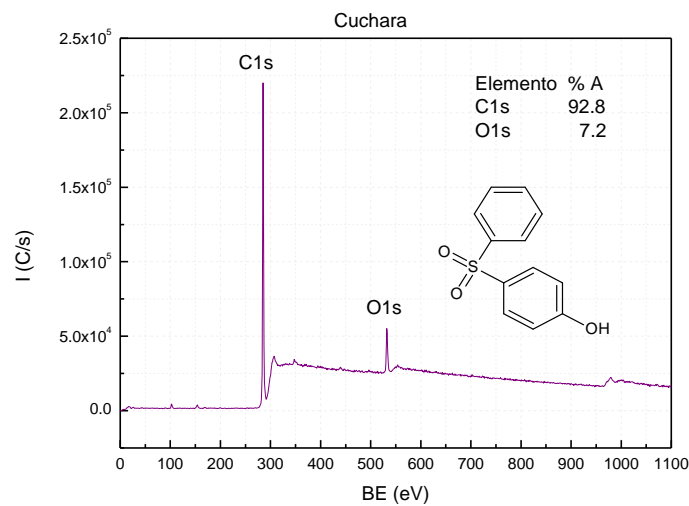


Ilustración 44 Espectro XPS general de cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia)

En la Figura 45 se muestra el análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de pega-solo (LDPE) antes del tratamiento. Se observa que la estructura de la muestra se conforma de C y O.

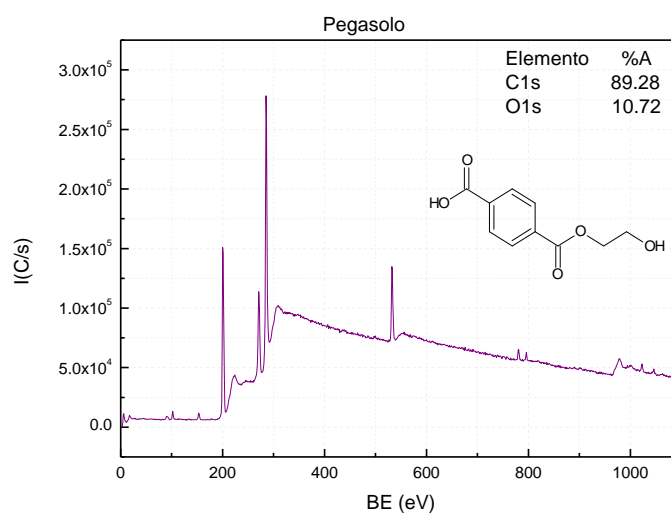


Ilustración 45 Espectro XPS general de pega-solo LDPE. (Elaboración propia)

En la Figura 46 se muestra el análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de tapa de detergente (HDPE) antes del tratamiento. La muestra tiene una estructura conformada mayormente de C y O, se observa la presencia de N y Si, esto puede ser a consecuencia de la interacción de la muestra con el ambiente.

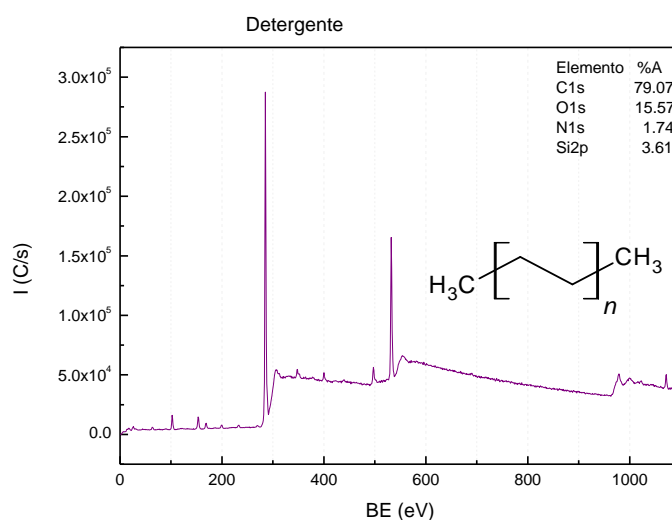


Ilustración 46 Espectro XPS general de tapa de detergente HDPE. (Elaboración propia)

Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS) después del tratamiento

En la Figura 47 se muestra la comparación del análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de la botella de plástico (PET) antes y después del tratamiento a 20W y 40W. Se observa que la estructura superficial de la muestra está formada principalmente por C con un porcentaje de entre 69 y 75% y O con un porcentaje de entre 20 y 30% , se observa además la presencia de N, esto puede ser debido a algún pequeño residuo en el reactor.

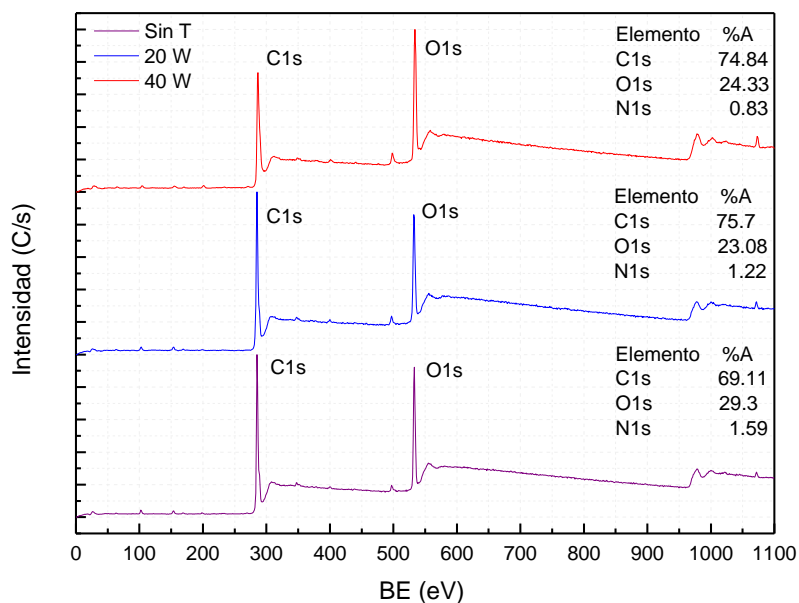


Ilustración 47 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de botella de refresco PET. (Elaboración propia)

En la Figura 48 se muestra la comparación del análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), del plato de unicel (PS) antes y después del tratamiento a 20W y 40W. Se observa que la estructura superficial de la muestra está formada principalmente por C con un porcentaje de entre 78% y 82% y O con un porcentaje de entre 14% y 20% , se observa además la presencia de N, esto puede ser debido a la interacción de la muestra con el medio ambiente.

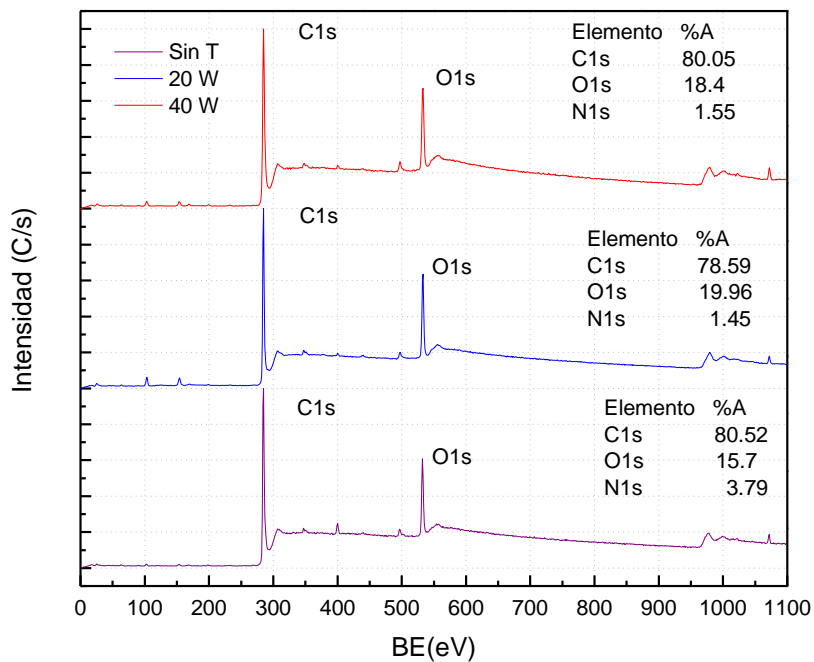


Ilustración 48 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de plato de unicel PS. (Elaboración propia)

En la Figura 49 se muestra la comparación del análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de la cuchara de plástico (PSE) antes y después del tratamiento a 20W y 40W. Se observa que la estructura superficial de la muestra de sin tratamiento y con tratamiento a 40W está formada principalmente por C con un porcentaje de entre 91% y 97% y O con un porcentaje de entre 2% y 9% , se observa además la presencia de N en el tratamiento a 20 W con un porcentaje de 0.98% , esto puede ser debido a la interacción que pudo tener muestra con el ambiente.

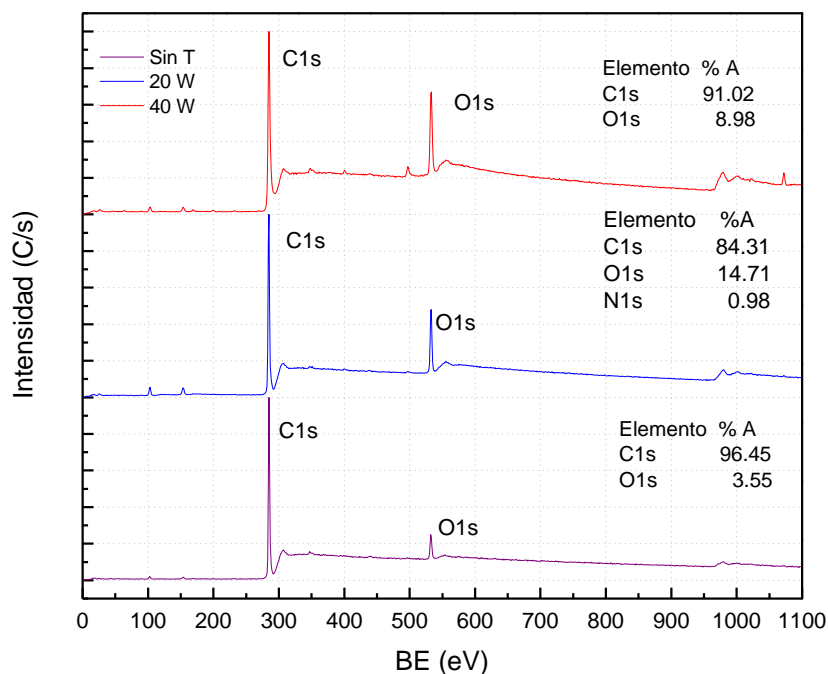


Ilustración 49 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia)

En la Figura 50 se muestra la comparación del análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), del pega-solo (LDPE) antes y después del tratamiento a 20W y 40W. Se observa que la estructura superficial de la muestra de sin tratamiento está formada principalmente por C con un 89.28% y por O con un 10.72%. en la estructura superficial de la muestra con tratamiento de 20W y 40 W se observa además de C y O la presencia de N con un porcentaje de entre 1% y 4% esto puede ser debido a la interacción que pudo tener muestra con el ambiente o a algún residuo quedado en el reactor.

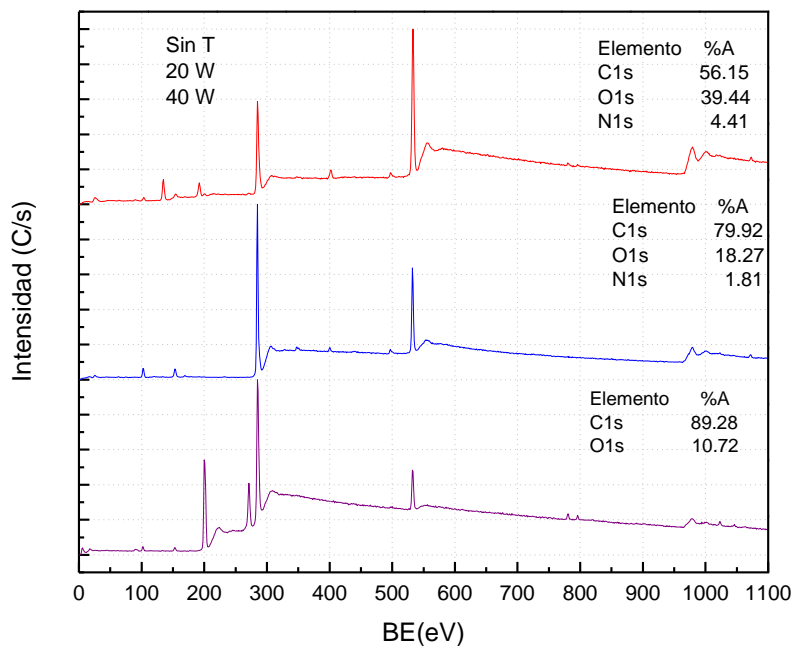


Ilustración 50 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de pega-solo LDPE. (Elaboración propia)

En la Figura 51 se muestra la comparación del análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos X (XPS), de la tapa de detergente (HDPE) antes y después del tratamiento a 20W y 40W. Se observa que la estructura superficial de la muestra está formada principalmente por C con un porcentaje de entre 70% y 80% y O con un porcentaje de entre 14% y 27% , se observa además la presencia de N con un porcentaje entre 1% y 4%, esto puede ser debido a la interacción de la muestra con el medio ambiente.

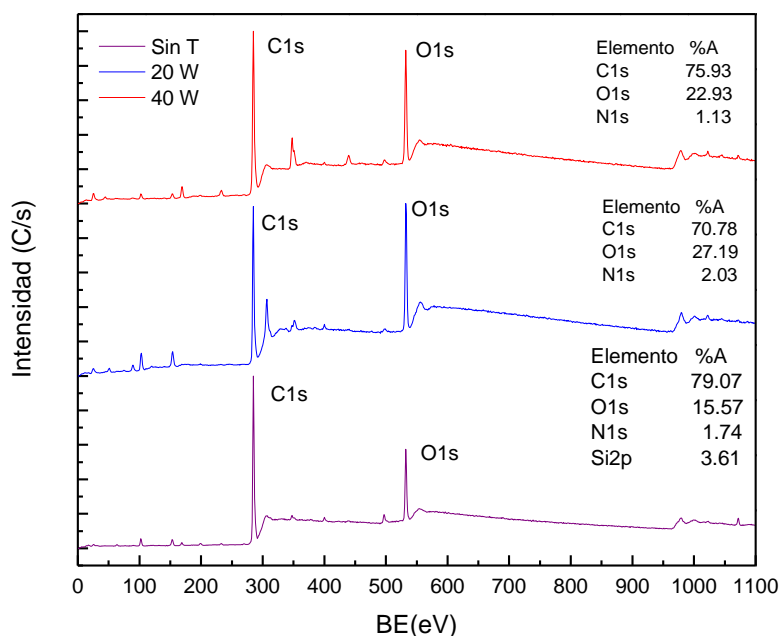


Ilustración 51 Comparación del Espectro XPS antes y después del tratamiento por plasma de la tapa de detergente HDPE. (Elaboración propia)

Hidrofobicidad

Ángulo de contacto

Los plasmas tienen la capacidad de modificar la superficie de casi cualquier material, por medio del tratamiento por plasma se pueden alterar las características superficiales y globales del material, en función de la energía y tiempo del tratamiento. Esto afecta directamente la profundidad de los impactos de las partículas que colisionan con las superficies. Este tratamiento da la oportunidad de usar materiales ya conocidos en nuevas aplicaciones, además de mejorar las propiedades superficiales.

El ángulo de contacto en un sistema polimérico-solución es función, de la energía superficial, morfología y de las cargas que actúan en la superficie. La evolución del ángulo de contacto de las muestras antes y después del tratamiento se observa en las siguientes figuras, la

evolución del ángulo de contacto estático de avance sobre los residuos poliméricos en función del volumen de gota (2 a 20 μL) para agua destilada es mostrada.

En la figura 52 se observa una gota de agua destilada sobre la muestra, esta gota se usa para medir el ángulo de contacto, además en la tabla 19 se muestra el promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo modificando el volumen del líquido 2 a 20 μL con incrementos de 2 μL , sin tratamiento y con tratamiento a 20 W y 40 W.

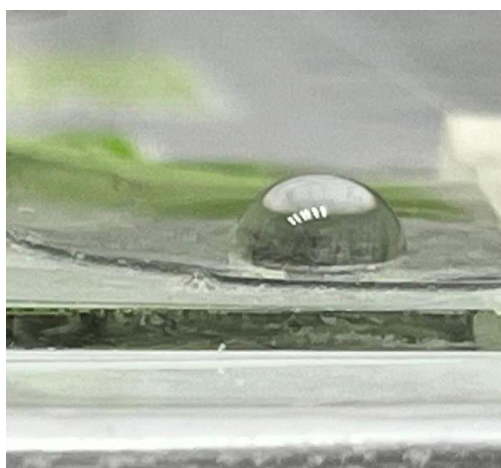


Ilustración 52 Gota de agua destilada sobre botella de plástico PET.

Sin tratamiento		Tratamiento a 20W		Tratamiento a 40W	
Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm
2μL	56.823	2 μL	55.1355	2 μL	53.163
4μL	58.016	4 μL	55.825	4 μL	54.16
6μL	59.182	6 μL	56.7895	6 μL	54.8385
8μL	59.7515	8 μL	58.2885	8 μL	55.9675
10μL	61.008	10 μL	59.061	10 μL	57.002
12μL	61.9925	12 μL	59.796	12 μL	57.752
14μL	63.1145	14 μL	60.77	14 μL	58.8595
16μL	64.0175	16 μL	61.5645	16 μL	60.3645
18μL	64.7985	18 μL	63.2525	18 μL	60.849
20μL	65.98	20 μL	63.6805	20 μL	61.949

Tabla 19 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo botella de plástico PET. (Elaboración propia)

El ángulo de contacto con agua destilada para PET se muestra en la figura 53 en un intervalo de 56° a 62° , se observa que sin tratamiento y con el tratamiento de 20 W el ángulo de contacto incrementa a medida que incrementa el volumen de la gota, mientras que en el tratamiento de 40 W el ángulo de contacto disminuye notoriamente registrándose en el intervalo de 53° a 61° , esto quiere decir que el tratamiento funciona correctamente ya que provoca que el agua tenga más interacción con la superficie del plástico.

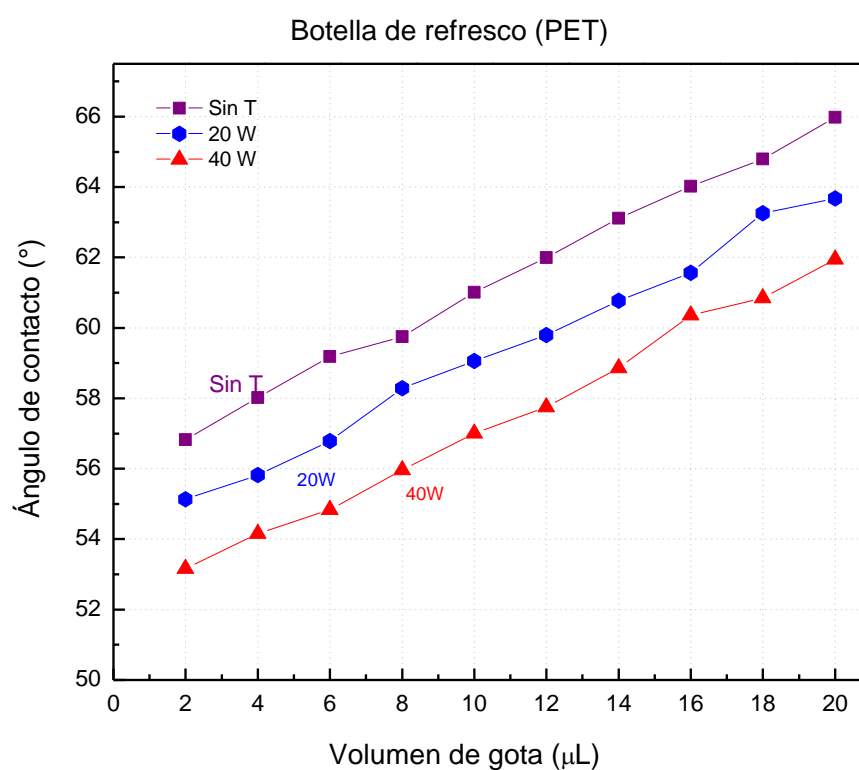


Ilustración 53 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para PET. (Elaboración propia)

En la figura 54 se observa una gota de agua destilada sobre la muestra de PS, esta gota se usa para medir el ángulo de contacto, además en la tabla 20 se muestra el promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo modificando el volumen del líquido 2 a 20 μL con incrementos de 2 μL , sin tratamiento y con tratamiento a 20 W y 40 W.

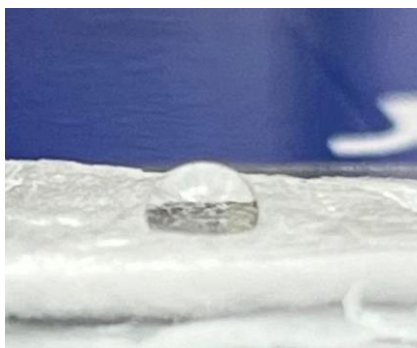


Ilustración 54. Gota de agua destilada sobre plato de unigel PS. (Elaboración propia)

Sin tratamiento		Tratamiento a 20W		Tratamiento a 40W	
Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm
2μL	55.4745	2 μ L	54.9375	2 μ L	52.0295
4μL	56.382	4 μ L	55.87	4 μ L	52.7595
6μL	56.9875	6 μ L	56.7505	6 μ L	54.1635
8μL	58.2585	8 μ L	58.218	8 μ L	55.3865
10μL	59.035	10 μ L	58.876	10 μ L	55.7895
12μL	60.148	12 μ L	60.368	12 μ L	56.9365
14μL	60.897	14 μ L	60.9955	14 μ L	57.8425
16μL	61.8125	16 μ L	62.1825	16 μ L	58.9365
18μL	63.024	18 μ L	62.8825	18 μ L	60.046
20μL	64.2415	20 μ L	63.816	20 μ L	61.26

Tabla 20 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo plato de unigel PS. (Elaboración propia)

El ángulo de contacto con agua destilada para PS se muestra en la figura 55 en un intervalo de 57° a 64°, se observa que sin tratamiento y con el tratamiento de 20 W el ángulo de contacto incrementa a medida que incrementa el volumen de la gota, mientras que en el tratamiento de 40 W el ángulo de contacto disminuye notoriamente registrándose en el intervalo de 52° a 61°, esto quiere decir que el tratamiento funciona correctamente ya que provoca que el agua tenga más interacción con la superficie del plástico.

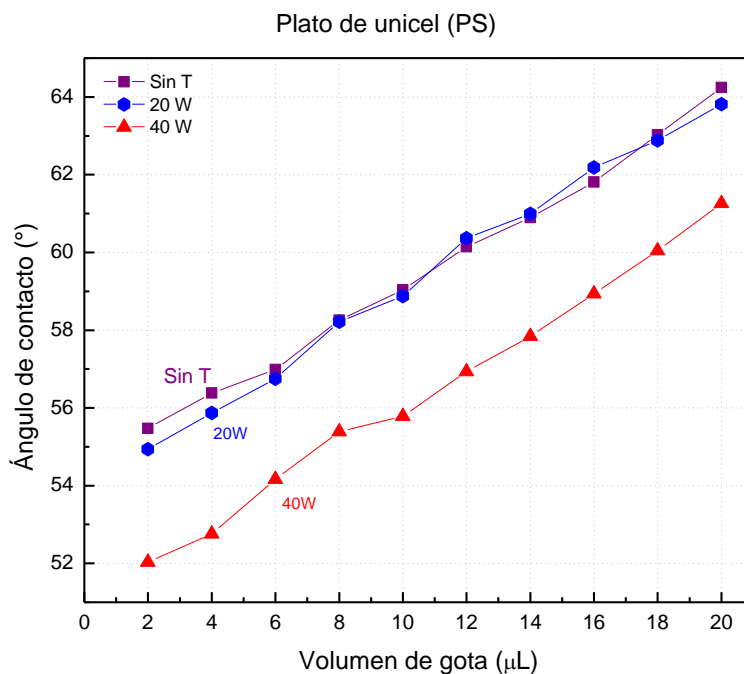


Ilustración 55 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para PS. (Elaboración propia)

En la figura 56 se muestra una gota de agua destilada sobre la muestra de PSE para medir el ángulo de contacto, además en la tabla 21 se muestra el promedio de los ángulos derecho e izquierdo en el intervalo de volumen de 2 a 20 μL con incrementos de 2 μL , sin tratamiento y con tratamiento a 20 W y 40 W.



Ilustración 56 Gota de agua destilada sobre cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia)

Sin tratamiento		Tratamiento a 20W		Tratamiento a 40W	
Volumen de gota	Promedio α	Volumen de gota	Promedio α	Volumen de gota	Promedio α
2 μ L	55.2435	2 μ L	50.6125	2 μ L	48.773
4 μ L	55.8925	4 μ L	52.1255	4 μ L	49.774
6 μ L	56.7995	6 μ L	52.898	6 μ L	50.9475
8 μ L	57.2895	8 μ L	53.9325	8 μ L	51.884
10 μ L	57.84	10 μ L	55.2215	10 μ L	52.882
12 μ L	59.3105	12 μ L	56.3695	12 μ L	54.122
14 μ L	60.249	14 μ L	57.0585	14 μ L	54.835
16 μ L	61.892	16 μ L	58.0285	16 μ L	55.885
18 μ L	63.228	18 μ L	58.5885	18 μ L	57.396
20 μ L	64.694	20 μ L	60.112	20 μ L	57.6015

Tabla 21 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo cuchara de plástico PSE. (Elaboración propia)

El ángulo de contacto para PSE se muestra en la figura 57, para la muestra sin tratamiento se encuentra en un intervalo de 55° a 67°, se observa que a comparación de los ángulos obtenidos sin tratamiento, los resultantes del tratamiento a 20 W disminuyen de manera significativa quedando en el intervalo de 51° a 60°, mientras que para el tratamiento de 40 W vuelve a disminuir llegando al intervalo de 48° a 58°, es decir que el tratamiento provoca mayor interacción entre el agua y el plástico

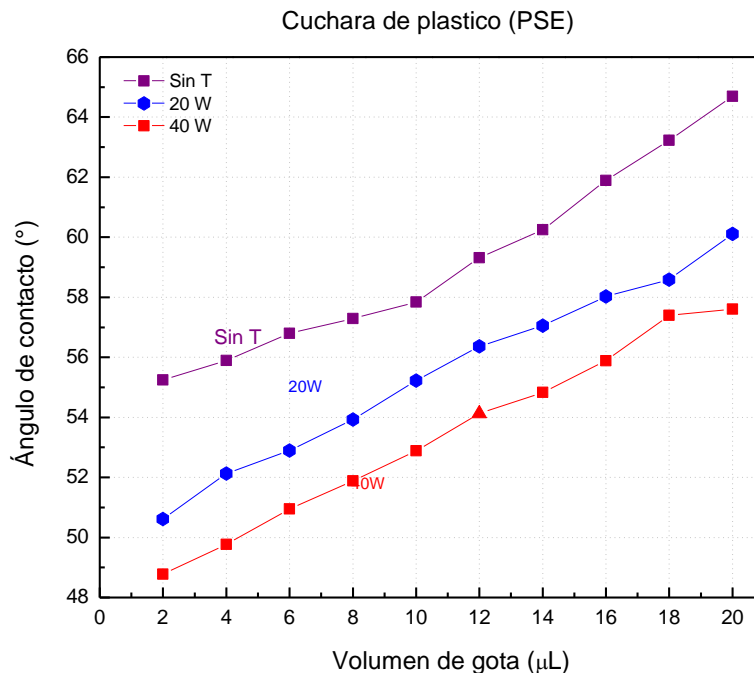


Ilustración 57 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para PSE. (Elaboración propia)

En la figura 58 se muestra una de las gotas de agua destilada sobre la muestra de HDPE que se usaron para medir el ángulo de contacto, además en la tabla 22 se muestra el promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo en el intervalo de 2 a 20 μL , con incrementos de 2 μL , sin tratamiento y con tratamiento a 20 W y 40 W.

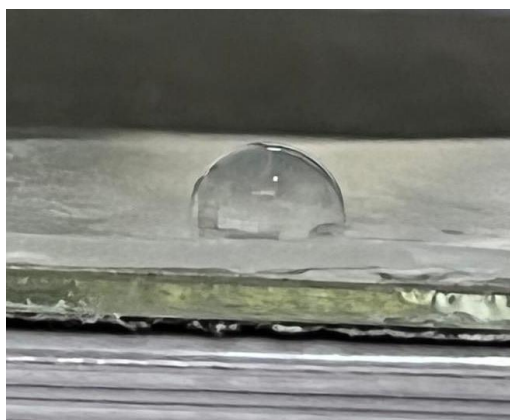


Ilustración 58 Gotas de agua destilada sobre la muestra de HDPE. (Elaboración propia)

Sin tratamiento		Tratamiento a 20W		Tratamiento a 40W	
Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm
2μL	55.1696	2 μ L	54.2355	2 μ L	51.845
4μL	56.0735	4 μ L	55.0165	4 μ L	53.1135
6μL	57.0545	6 μ L	55.78	6 μ L	54.1855
8μL	57.761	8 μ L	56.943	8 μ L	54.924
10μL	58.8015	10 μ L	58.042	10 μ L	56.1705
12μL	59.806	12 μ L	59.2915	12 μ L	57.1815
14μL	60.982	14 μ L	60.346	14 μ L	57.7415
16μL	62.2775	16 μ L	60.806	16 μ L	59.2105
18μL	63.241	18 μ L	62.0335	18 μ L	60.246
20μL	64.2065	20 μ L	63.122	20 μ L	61.214

Tabla 22 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo tapa de detergente HDPE. (Elaboración propia)

El ángulo de contacto con agua destilada para HDPE se muestra en la figura 59, se observa que los ángulos para la muestra sin tratamiento se encuentran en el intervalo de 55° a 64°, con el tratamiento a 20 W el ángulo disminuye a el intervalo de 54° a 63°, mientras que en el tratamiento a 40 W el ángulo se posiciona en el intervalo de 52° a 63°, es decir que esto sugiere que el tratamiento con más potencia está causando que la superficie se modifique y se tenga mayor interacción del agua con el material.

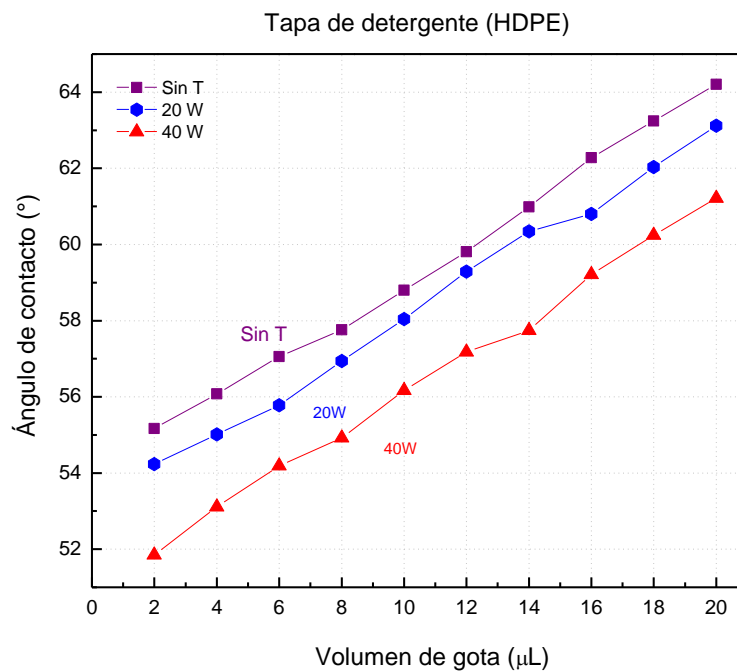


Ilustración 59 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para HDPE. (Elaboración propia)

En la figura 60 se muestra una gota de agua destilada sobre la muestra de LDPE usada para medir el ángulo de contacto, además en la tabla 23 se muestra el promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo en el intervalo de 2 a 20 μL , con incrementos de 2 μL , sin tratamiento y con tratamiento a 20 W y 40 W.

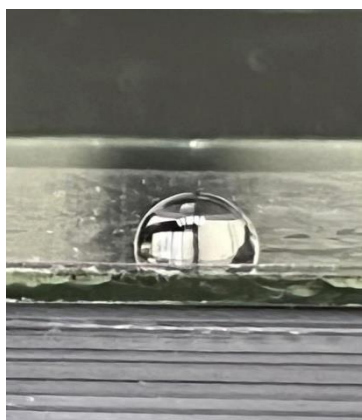


Ilustración 60 Gota de agua destilada sobre la muestra de LDPE.

Sin tratamiento		Tratamiento a 20W		Tratamiento a 40W	
Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm	Volumen de gota	Promedio \pm
2μL	56.0435	2 μ L	54.931	2 μ L	50.117
4μL	56.5905	4 μ L	55.532	4 μ L	50.9965
6μL	57.653	6 μ L	56.6015	6 μ L	51.892
8μL	58.852	8 μ L	57.867	8 μ L	53.1745
10μL	59.816	10 μ L	59.2675	10 μ L	53.6785
12μL	60.617	12 μ L	59.847	12 μ L	54.6945
14μL	62.377	14 μ L	60.929	14 μ L	56.077
16μL	63.5195	16 μ L	61.985	16 μ L	56.8535
18μL	64.2815	18 μ L	63.3295	18 μ L	58.103
20μL	66.9005	20 μ L	64.132	20 μ L	58.94

Tabla 23 Promedio de la medición del ángulo derecho e izquierdo pega-solo LDPE. (Elaboración propia)

El ángulo de contacto con agua destilada para LDPE se muestra en la figura 61 el ángulo de la muestra sin tratamiento se encuentra en un intervalo de 56° a 67° , se observa que al aplicarle el tratamiento a 20 W el promedio del ángulo disminuye hasta alcanzar el intervalo de 55° a 64° , mientras que el tratamiento a 40 W da como resultado el intervalo de 50° a 59° , es decir que el tratamiento si está provocando que la interacción entre el agua destilada y el material incremente.

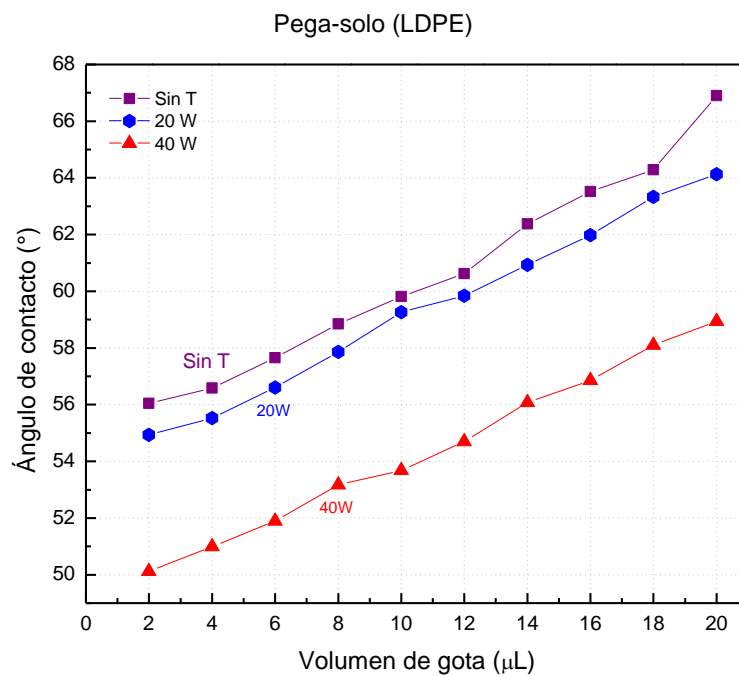


Ilustración 61 Comparación de promedios si tratamiento y con tratamiento a 20W y 40W para LDPE. (Elaboración propia)

Conclusiones

Se evaluaron los cambios tanto morfológicos como estructurales de los polímeros seleccionados antes y después del tratamiento por plasma de resplandor a 20 y 40 W. Se analizaron los resultados e identificaron las diferencias y el efecto del tratamiento en el polímero.

Los tipos de residuos que se utilizaron para el tratamiento fueron: una botella de refresco para PET, plato de unicel para PS, cuchara de plástico para PSE, tapa de detergente para HDPE y pega-solo para LDPE.

Las características morfológicas de los materiales antes de realizarles el tratamiento por plasma de resplandor. Se observó que las muestras presentaban ciertos aglomerados, levantamientos o una superficie lisa con levantamientos o con irregularidades.

Para la estructura del material se realizó el análisis EDS se pudo observar que las muestras solo contenían Carbono (C) y oxígeno (O), en el análisis de Espectroscopia Infrarroja (IR-ATR) se observaron los grupos funcionales del material. En Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS) se observó que la estructura superficial de las muestras muestra Carbono y Oxígeno y en algunos casos Nitrógeno.

Los análisis de las muestras después del tratamiento a las dos potencias se observan que en las muestras con el tratamiento a 40W presentan más cambios en su morfología, por ejemplo: los levantamientos eran más pronunciados y abarcaban toda la superficie, también se pudo observar la formaron de aglomerados, la textura se observó rugosa, la superficie erosionada.

En el análisis EDS mostró para todos los polímeros: carbono con el porcentaje mayoritario y oxígeno, pero también se agregaron otros elementos como Nitrógeno y Calcio en un porcentaje pequeño en porcentaje mínimo.

En el análisis de Espectroscopia Infrarroja (IR-ATR) después del tratamiento con potencia de 20 W y 40 W los grupos funcionales permanecieron iguales a los identificados antes del tratamiento sin importar el aumento de potencia.

En Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS) después del tratamiento se notó un aumento en el porcentaje de carbono, así como una disminución en el porcentaje de oxígeno y de nitrógeno.

El análisis con ángulo de contacto se realizó con agua destilada en un volumen de gota (2 a 20 μ L). En este se realizó los promedios del ángulo externo derecho e izquierdo de una gota de agua destilada en la muestra sin tratamiento y con tratamiento a 20 y 40 W.

En la muestra sin tratamiento los promedios comenzaban entre 55° y 65°, con tratamiento a potencia de 20W el promedio se encontraba entre 54° y 63° y para el caso de 40 W el promedio se encontraba entre 51° y 61°

De acuerdo con todos los análisis realizados se concluye que el tratamiento por plasma de resplandor si tiene un efecto en los residuos ya que se observó que la superficie se modifica y debido a esto el ángulo de contacto disminuye facilitando la interacción con el agua. Esto sugiere que el residuo polimérico pueda degradarse a menor tiempo.

Competencias aplicadas

Fundamentos de Investigación	<ul style="list-style-type: none"> • Aplica herramientas metodológicas de investigación en la elaboración de escritos académicos, producto del desarrollo de la investigación documental en temáticas de su área, que lo habilitan para ser autónomo en la adquisición y construcción de conocimientos que fortalecen su desarrollo profesional.
Propiedad de los Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Conoce y aplica los materiales adecuados en los diferentes procesos industriales de acuerdo con sus características y propiedades para obtener productos de calidad y bajo costo con conciencia de protección del medio ambiente.
Taller de Investigación I	<ul style="list-style-type: none"> • Elabora un protocolo de investigación en el área de su formación profesional • Busca y clasificar los diferentes tipos de investigación en el ámbito científico y tecnológico dentro y fuera de la institución. Desarrolla los elementos del protocolo en un documento en forma estructurada.

	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta en forma oral y escrita el protocolo de investigación. • Presenta en plenaria el prototipo del proyecto de investigación
Taller de Investigación II	<ul style="list-style-type: none"> • Conoce los diferentes tipos de informes de investigación para desarrollar el escrito de al menos uno de ellos. • Elabora artículos científicos destinados a publicación a partir del proyecto de investigación realizado previamente. • Desarrolla sus habilidades para realizar una presentación de impacto con la meta de participación en ponencia externa
Probabilidad y estadística	<ul style="list-style-type: none"> • Considera los fenómenos aleatorios presentes en todo proceso logístico, como • Planear, organizar, manejar, controlar y mejorar sistemas de procesos, abastecimiento y distribución de bienes y servicios de manera sustentable. <p>Dirige las actividades logísticas e Industriales de manufactura, carga,</p>

	<p>tráfico y seguridad interna y externa de servicios y productos de las empresas en forma eficaz y eficiente.</p> <ul style="list-style-type: none">• Administra los sistemas de producción, flujo y manejo de materiales en las organizaciones en forma eficaz y eficiente.• Usa el software disponible para el modelado, diseño, operación y control eficiente de sistemas logísticos e industriales.• Desarrolla proyectos de investigación relacionados con la Industria y la logística aplicando la metodología más adecuada.
Química	<ul style="list-style-type: none">• Adquiere conocimientos básicos sobre la estructura de los compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, así como su nomenclatura, propiedades físicas, reactividad, energía y equilibrio, considerando los impactos económicos y al medio ambiente.• Toma decisiones con base en los

	<p>conocimientos adquiridos que permitan seleccionar materiales industriales y asegura las condiciones de sustentabilidad, higiene y seguridad industrial y la responsabilidad social.</p>
--	--

Referencias

- Alhunaim, A., Kirdponpattara, S., & Newby, B. M. Z. (2016). Techniques for determining contact angle and wettability of powders. *Powder Technology*, 287, 201–215.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.002>
- Bogaerts, A. (1999). The glow discharge: an exciting plasma! *Journal of analytical atomic spectrometry*, 14(9), 1375–1384.
- Crist, B. V. (1998). Advanced peak-fitting of monochromatic XPS spectra. *Journal of Surface Analysis*, 4(3), 428-434.
- CSIC. (2010). *Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid Laboratorio de microscopía*. 3.
[https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/posters/FOTON-Materiales opticos1.pdf](https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/posters/FOTON-Materiales%20opticos1.pdf)
- Dai, K., Deng, Z., Liu, G., Wu, Y., Xu, W., & Hu, Y. (2020). Effects of a reactive phosphorus-sulfur containing flame-retardant monomer on the flame retardancy and thermal and mechanical properties of unsaturated polyester resin. *Polymers*, 12(7), 1–15.
<https://doi.org/10.3390/polym12071441>
- Dos Santos Pereira, A. P., Da Silva, M. H. P., Lima, É. P., Dos Santos Paula, A., & Tommasini, F. J. (2017). Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste. *Materials Research*, 20, 411–420.
- Effects of a Reactive Phosphorus–Sulfur Containing Flame-Retardant Monomer on the Flame Retardancy and Thermal and Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin

Espinoza, E. a. (2009). Modelo de gestión de residuos plásticos. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 1–42.

[http://www.redisa.uji.es/artSim2009/GestionYPoliticaAmbiental/Modelo de gesti3n de residuos pl3sticos.pdf](http://www.redisa.uji.es/artSim2009/GestionYPoliticaAmbiental/Modelo%20de%20gesti3n%20de%20residuos%20pl3sticos.pdf)

Fitz (Sina Mohseniana, 2015)Patrick, E. . (2011). *introducci3n a La Ciencia De Los Suelos*. November, 288.

G, E. O. P. (s/f). *EL PLASMA*.

G. L3pez Osvaldo, J. Cruz Guillermo, Olayo Guadalupe, G3mez Lidia Ma., Gonz3lez-Torres Maribel, G3mez Rosa Ma., G.-R. G. (2013). *Irradiaci3n gamma para modificar propiedades en polipirrol sintetizados por plasma*.

Ge, Z., Sun, R., Zhang, K., Gao, Z., & Li, P. (2013). Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 44, 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.073>

Giridhar, G., Manepalli, R. K. N. R., & Apparao, G. (2017). Contact Angle Measurement Techniques for Nanomaterials. In *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* (Vol. 3). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46139-9.00008-6>

Gonz3lez-Torres, M., Olayo, M. G., Cruz, G. J., G3mez, L. M., S3nchez-Mendieta, V., & Gonz3lez-Salgado, F. (2014). XPS Study of the Chemical Structure of Plasma

- Biocopolymers of Pyrrole and Ethylene Glycol. *Advances in Chemistry*, 2014, 1–8.
<https://doi.org/10.1155/2014/965920>
- Koji Nakanishi, P. H. S. (1977). *Infrared Absorption Spectroscopy* (second ed.).
- Liaw, D. - J. (1995). Synthesis and characterization of sulfone- containing polyesters derived from 4,4'- dicarboxydiphenyl sulfone by direct polycondensation. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 33(4), 605–613.
<https://doi.org/10.1002/pola.1995.080330401>
- López Serrano Ramos Francisco, Mendizábal Mijares Eduardo, O. G. (2015). *introducción a la ciencia de los polímeros* (Primera ee).
- Mohsenian, S., Esmaili, M. S., Shokri, B., & Ghorbanalilu, M. (2015). Physical characteristics of twin DC thermal plasma torch applied to polymer waste treatment. *Journal of Electrostatics*, 76, 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2015.06.004>
- Mondragón, P. (2015). Espectroscopia de infrarrojo para todos. In *Neural Regeneration Research*. https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf
- Nascimento Neto, E., Salles Lambert, C., Bittencourt, E., & Jova, Z. (2007). XPS and goniometric analysis to study removal of superficial oil on aluminium using cold plasma. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 41, 108–119.
- Nationalgeographic. (2019). Plasma: el cuarto estado de la materia. *Nationalgeographic*, 1.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/plasma-cuarto-estado-materia_14421

Os, M. T. Van. (2000). Surface modification by plasma polymerization: film deposition, tailoring of surface properties and biocompatibility. *Film*, 1–146.

<http://doc.utwente.nl/9575/1/t0000021.pdf>

Sarker, M., Rashid, M. M., & Molla, M. (2011). Abundant High-Density Polyethylene (HDPE-2) Turns into Fuel by Using of HZSM-5 Catalyst. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 1(May 2014), 1–12. <https://doi.org/10.4303/jfrea/r110201>

<https://doi.org/10.4303/jfrea/r110201>

SEMARNAT, & INECC. (2020). *Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo*. 156.

Sherwood, P. M. (1976). Analysis of the X-ray photoelectron spectra of transition metal compounds using approximate molecular orbital theories. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics*, 72, 1791-1804.

Stassi, J. P. (2014). *Desarrollo de Catalizadores de Metales Nobles Soportados para Hidrogenaciones Selectivas en Química Fina*. 333.

Tsai, G., Montero, J., Calle, W., Quinde, M., & Sarmiento, P. (2010). Plasma: una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia. *Ingenius*, 4, 66–72.

<https://doi.org/10.17163/ings.n4.2010.07>

Vázquez Morillas, A., Velasco Pérez, M., Beltrán Villavicencio, M., & Espinosa Valdemar, R. M. (2014). *El reciclaje de los plásticos*. 1–12.

Watts, J. F., & Wolstenholme, J. (2003). *An introduction to surface analysis by XPS and AES.*, (John Wiley & Sons: Chichester, UK).

Realizar el análisis mediante ángulo de contacto, para esto se debe colocar la muestra en una superficie plana, con una micropipeta ir colocando gotas de agua destilada comenzando por 2 microlitros, hasta llegar a 20. En cada gota colocada capturar una fotografía con buena resolución para así medir el ángulo en el software Image J