

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERIA INDUSTRIAL

“Tratamiento de residuos urbanos poliméricos mediante plasma y radiación UV para favorecer su degradación”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

“Eduardo Martínez González”

DIRIGIDA POR:

“Dra. Maribel González Torres”

“Dr. Guillermo Jesús Cruz Cruz”

Tianguistenco, Estado de México, *marzo 2022.*

Agradecimiento.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por permitir la realización de este trabajo en sus instalaciones y por el apoyo otorgado.

A mi asesor de tesis, la Dra. Maribel González Torres por toda la orientación y ayuda que me brindo para realizar esta tesis, por el gran apoyo, comprensión y amistad que me permitieron aprender mucho para este proyecto, de corazón le doy las gracias por darme la oportunidad y tenerme toda la paciencia ya que el esfuerzo fue demasiado y saber comprender la situación en que pasaba y poder obtener esta sueño que se haga realidad siempre la tendré presente en mi vida, nunca se van acabar los agradecimiento hacia ella, ¡Gracias!.

En otra instancia a todos los docentes que me acompañaron durante este proceso, gracias por el apoyo.

A mis padres, me han heredado el tesoro más valioso que pueden darme que es el amor, sin escatimar esfuerzos algunos han dedicado parte de su vida para formarme y educarme. A ustedes quienes su ilusión en la vida ha sido forjarme como una persona de provecho, nunca podré pagarles todos sus desvelos, angustia y preocupaciones, todo lo que han hecho por mi lo llevo en mi corazón ¡Gracias, papá y mamá!

Gracias a mi esposa por entenderme en todo, gracias porque en todo instante fue una compañía incondicional en mi vida, es la alegría de mi vida es el amor hecho persona, te agradezco por tantas ayudas y muchas aportaciones que hiciste en mi vida desde el primer momento que estuviste conmigo; eres mi inspiración y mi razón de ser ¡Gracias!

Resumen

Con el objetivo de simular el envejecimiento acelerado de algunos polímeros expuestos a la atmósfera, se sometieron algunos polímeros a tratamientos con plasmas de aire y por exposición a luz ultravioleta (UV) analizando su superficie antes y después del tratamiento. Se usó Polietilentereftalato (PET), Poliestireno expandido (Unicel) y Polietileno de baja densidad (pégasolo), a los que se estudió su estructura química, morfológica y ángulo de contacto.

Los materiales seleccionados fueron cortados en pequeñas muestras y se colocaron dentro de un reactor para someterlas a descargas eléctricas de resplandor durante 10 min con potencias de 20, 40 y 60 W. Adicionalmente se expusieron a luz UV por medio de una lámpara, con la finalidad de observar la reacción del material ante este tipo de radiación.

Se realizaron análisis mediante Espectroscopia Infrarroja (IR-ATR) y espectroscopia de Energía Dispersiva para obtener información sobre la estructura química y el contenido elemental de las muestras. Para las características morfológicas se usaron Microscopía óptica y Electrónica de Barrido en las muestras antes y después del tratamiento, y para evaluar la hidrofiliidad de las muestras se midió el ángulo de contacto.

Se realizaron comparaciones de las características de las muestras antes y después de los tratamientos. Se observa que después del tratamiento por plasma, las muestras presentan cambios morfológicos y su ángulo de contacto disminuye, mientras que su estructura química permanece sin cambios significativos.

Abstract

In order to simulate the accelerated aging of some polymers exposed to the atmosphere, some polymers were subjected to treatments with air plasmas and by exposure to ultraviolet (UV) light, analyzing their surface before and after treatment. Polyethylene terephthalate (PET), expanded polystyrene (Unicel) and low-density polyethylene (pegasolo) were used, and their chemical and morphological structure and contact angle were studied.

The selected materials were cut into small samples and placed inside a reactor to be subjected to electric glow discharges for 10 min with powers of 20, 40 and 60 W. Additionally, they were exposed to UV light by means of a lamp, with the purpose to observe the reaction of the material to this type of radiation.

Infrared Spectroscopy (IR-ATR) and Energy Dispersive Spectroscopy analyzes were performed to obtain information on the chemical structure and elemental content of the samples. For the morphological characteristics, Optical and Scanning Electron Microscopy were used in the samples before and after treatment, and to evaluate the hydrophilicity of the samples, the contact angle was measured.

Comparisons of the characteristics of the samples before and after the treatments were made. It is observed that after plasma treatment, the samples present morphological changes and their contact angle decreases, while their chemical structure remains without significant changes.

Índice.

Agradecimiento.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Índice.....	4
Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.	11
CAPÍTULO 1.....	12
Introducción.	13
Planteamiento del problema.....	14
Justificación.	15
Hipótesis	17
Objetivos.....	17
General.	17
Específicos.	17
CAPITULO 2.....	18
2 Marco Teórico.....	19
2.1 Plasma	19
2.2 Tipos de plasma.....	20
2.3 Descargas de resplandor (plasma luminiscente).	20
2.4 Descargas de resplandor Resistivas.....	21
2.5 Polímeros.....	23
2.6 Tipos de polímeros	23
2.7 Residuos poliméricos	26
2.8 Degradación.	28
2.9 Tratamientos de residuos.....	29
2.10 Tratamientos por radiación UV	32
2.11 Técnicas de caracterización.....	34
2.11.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	34
2.11.3 Hidrofilicidad	35
CAPITULO 3.....	37
3. Metodología.....	38
3.1 Selección de muestras	39
3.2 Búsqueda de material	39

3.3 Seccionar material (cortar)	40
3.4 Evaluar características antes del tratamiento	42
3.5 Tratamiento por plasma.....	43
3.6 Evaluar las características después del tratamiento por plasma.....	45
3.7 Realizar tratamiento por UV.	45
3.8 Volver a evaluar las características después del tratamiento UV.....	46
CAPITULO 4.....	47
4.1 Composición.....	48
4.1.1 PET	48
4.1.2 Poliestireno expandido	49
4.1.3 Polietileno.....	49
4.2 Morfología.....	50
4.2.1 Microscopía Óptica.....	50
4.2.2 Microscopía Electrónica de Barrido	53
4.2.3 Estructura Química	55
4.2.4 Tratamiento a 20W, 10 min.....	56
4.2.5 Tratamiento a 40W, 10 min.....	58
4.2.6 Tratamiento a 60 W, 10 min.....	62
4.2.7 Estructura química.....	64
4.3 Hidrofilicidad	69
4.4 Ángulo de contacto de PET	69
4.5 Ángulo de contacto LDPE	70
4.6 Ángulo de contacto de PS	71
4.7 Tratamiento UV.....	72
4.8 Morfología	74
Microscopía Óptica después del tratamiento por luz UV durante 1 hora	74
4.9 Ángulo de contacto	79
4.10 Angulo de contacto PET	80
4.11 Ángulo de contacto de LDPE	81
4.12 Ángulo de contacto de PS	82
4.13 Comparación de ángulo de contacto después del tratamiento UV	83
4.14 Ángulo de contacto PET, sin tratamiento, 20 W con plasma y tratamiento UV	84
4.15 Ángulo de contacto de LDPE, sin tratamiento, 20 W con plasma y tratamiento UV.....	85
4.16 Ángulo de contacto de PS, sin tratamiento, 20 W con plasma y tratamiento UV	86

4.17 Ángulo de contacto PET, sin tratamiento, 40 W con plasma y tratamiento UV	87
4.18 Ángulo de contacto de LDPE, sin tratamiento, 40 W con plasma y tratamiento UV.....	87
4.19 Ángulo de contacto de PS, sin tratamiento, 40 W con plasma y tratamiento UV.	88
4.20 Ángulo de contacto PET, sin tratamiento, 60 W con plasma y tratamiento UV	89
4.21 Ángulo de contacto de LDPE, sin tratamiento, 60 W con plasma y tratamiento UV.....	90
4.22 Ángulo de contacto de PS, sin tratamiento, 60 W con plasma y tratamiento UV	91
CAPITULO 5.....	93
5.1 Conclusiones.....	94
Referencias.....	96

Índice de figuras.

Ilustración 1 Los cuatro estados de la materia (creación propia).....	19
Ilustración 2 Tipos de plasma (creación propia).....	20
Ilustración 3. Ejemplo de plasma de resplandor (creación propia).....	21
Ilustración 4 Tipos de acoplamiento (creación propia).....	22
Ilustración 5. Descargas de resplandor resistivas. (creación propia)	22
Ilustración 6. Polímero lineal con forma de espagueti sin ramificación (creación propia)	23
Ilustración 7 Polímero ramificado (creación propia)	24
Ilustración 8 PET, ((creación propia).....	25
Ilustración 9 Estructura química de estireno (creación propia)	26
Ilustración 10 Estructura química de etano (creación propia)	26
Ilustración 11 Productos hecho con los polímeros (La ciencia de cada día, octubre 22 2012)	27
Ilustración 12 Acumulación de los polímeros (plástico) Salvador García Liñán julio 21, 2015..	28
Ilustración 13 Reciclaje mecánico (Okan, M., Aydin, HM y Barsbay, M. (2019)).....	31
Ilustración 14 Reciclado químico Schlummer, M., (2007).....	31
Ilustración 15 Recuperación de energía (Márialigeti, K. (2015)).....	32
Ilustración 16 Exposición de plástico al sol (Ripa Jaime 11 Ago 2016)	33
Ilustración 17 Microscopio electrónico de barrido (SEM) (Expresiones UDLAP Córdova Lozano Felipe, (2017)).....	34
Ilustración 18 Microscopio óptico (MO) (Smith Yolanda, B.Pharm (2011)).....	35
Ilustración 19 Angulo de adherencia menor a 90° (creación propia).	36
Ilustración 20 Angulo de adherencia mayor a 90° (creación propia).	36
Ilustración 21 Diagrama de proceso (creación propia).	38
Ilustración 22 LDPE (bolsas de plástico) (creación propia).	39
Ilustración 23 PS (unicel) (creación propia).	40
Ilustración 24 PET (botellas) (creación propia).....	40
Ilustración 25 Material PET cortado en pequeñas muestras (creación propia).	41
Ilustración 26 Material PS cortado en pequeñas muestras (creación propia).	41
Ilustración 27 Material LDPE cortado en pequeñas muestras (creación propia).....	42
Ilustración 28 Reactor con el material pegado (creación propia).	42
Ilustración 29 Reactor (creación propia).....	43
Ilustración 30 Se pegan las muestras a las paredes del reactor (creación propia).	43
Ilustración 31 Reactor (creación propia).....	44
Ilustración 32 Reacción del monómero con el campo eléctrico (creación propia).....	45

Ilustración 33 Diagrama de espectro electromagnético (Zeus Industrial Products, Inc).	46
Ilustración 34 Estructura química del PET	48
Ilustración 35 Datos técnicos del PET (Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgard.)	49
Ilustración 36 Micrografía de PET (creación propia)	50
Ilustración 37 Micrografía de LDPE (creación propia)	51
Ilustración 38 Micrografía PS (creación propia).	51
Ilustración 39 Micrografía PET ante luz azul (creación propia).....	52
Ilustración 40 Micrografía plato de PS ante luz azul (creación propia)	52
Ilustración 41 Micrografía de LDPE ante luz azul (creación propia).....	53
Ilustración 42 Micrografía de PET antes del tratamiento (creación propia).....	54
.....	54
Ilustración 43 Micrografía de PS antes del tratamiento (creación propia).	54
Ilustración 44 Micrografía de LDPE antes del tratamiento (creación propia).....	55
Ilustración 45 Micrografía de PET A) Antes del tratamiento, B) Tratamiento 20 W (creación propia).....	57
Ilustración 46 Morfología de PS A) Antes del tratamiento, B) Tratamiento 20 W (creación propia).....	57
Ilustración 47 Micrografía de LDPE A) Antes del tratamiento, B) Tratamiento 20 W (creación propia).....	58
Ilustración 48 Micrografía de PET tratamiento 40 W (creación propia).....	59
Ilustración 49 Micrografía de PS tratamiento 40 W (creación propia).....	60
Ilustración 50 Micrografía de LDPE tratamiento 40 W (creación propia).	61
Ilustración 51 Micrografía de PET tratamiento 60 W (creación propia).....	63
Ilustración 52 Micrografía de PS tratamiento 60 W (creación propia).....	63
Ilustración 53 Espectro IR PET sin tratamiento (creación propia)	64
Ilustración 54 Espectro IR LDPE sin tratamiento (creación propia)	65
Ilustración 55 Espectro IR de PS sin tratamiento (creación propia).....	66
Ilustración 56 Espectro IR de PET sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).....	67
Ilustración 57 Espectro IR del LDPE sin tratamiento, tratamiento de 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).....	68
Ilustración 58 Espectro IR de PS antes y con tratamiento de 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).....	69
Ilustración 59 Angulo de contacto de PET sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).	70

Ilustración 60 Angulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).	71
Ilustración 61 Angulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).	72
Ilustración 62 Lampara UVL-312 (creación propia).	73
Ilustración 63 Colocación de muestras en Petri por debajo de lampara (creación propia).	73
Ilustración 64 Angulo de contacto después del tratamiento UV (creación propia)	74
Ilustración 65 Micrografía de PET con tratamiento de plasma a 20 W con tratamiento de luz UV (creación propia)	75
Ilustración 66 Micrografía de PET con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia)	75
Ilustración 67 Micrografía de PET con tratamiento de plasma a 60 W con tratamiento de luz UV (creación propia).	76
Ilustración 68 Micrografía de LDPE con tratamiento de plasma a 20 W con tratamiento de luz UV (creación propia).	76
Ilustración 69 Micrografía de LDPE con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia)	77
Ilustración 70 Micrografía de LDPE con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia).	77
Ilustración 71 Micrografía del PS con tratamiento de plasma a 20 W con tratamiento de luz UV (creación propia).	78
Ilustración 72 Micrografía del PS con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia).	78
Ilustración 73 Micrografía del PS con tratamiento de plasma a 60 W con tratamiento de luz UV (creación propia).	79
Ilustración 74 Ángulo de contacto a 20 W por 10 min. después del tratamiento UV PS.	79
Ilustración 75 Ángulo de contacto a 40 W por 10 min. Después del tratamiento UV LDPE.	80
Ilustración 76 Ángulo de contacto a 40 W por 10 min. después del tratamiento UV PET.	80
Ilustración 77 Angulo de contacto PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W, 40 W y 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	81
Ilustración 78 Angulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W, 40 W y 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	82
Ilustración 79 Angulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W, 40 W y 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	83
Ilustración 80 Ángulo de contacto PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	84
Ilustración 81 Ángulo de contacto de PE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	85

Ilustración 82 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	86
Ilustración 83 Ángulo de contacto de PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 40 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	87
Ilustración 84 Ángulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 40 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	88
Ilustración 85 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 40 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	89
Ilustración 86 Ángulo de contacto de PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	90
Ilustración 87 Ángulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	91
Ilustración 88 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).	92

Índice de tablas.

Tabla 1 Tipos de plástico (creación propia).....	30
Tabla 2 Estructura química de PET (creación propia).....	55
Tabla 3 Componente atómico de LDPE (creación propia).....	56
Tabla 4 Componente atómico de PS (creación propia)	56

CAPÍTULO 1

Introducción.

Se considera basura todo aquello que ya no sirve. Cuando se termina una compra, las bolsas y los empaques son desechados a la basura. La basura es un problema, debido a que provoca el agotamiento de los recursos naturales, multiplicación de insectos, roedores y microorganismos patógenos (enfermedades). Y si a eso se le agrega un mal sistema de gestión de desechos, el resultado es el deterioro y depreciación del entorno debido a la contaminación de aire, agua y suelo.

La influencia de los medios de comunicación con las distorsiones que causa la publicidad agudiza el consumismo. La penetración de los medios es muy alta, situación que determina gran parte de los hábitos de consumo de la población con todos los aspectos negativos que esto implica: la compra de productos que rápidamente dejan de ser útiles, pasados de moda, inservibles, obsoletos, además de los “alimentos chatarra” y productos “desechables” que generan una gran cantidad de basura y la desnutrición en la población.

Es por todo lo anterior que es necesario buscar alternativas para acelerar la descomposición y reutilización de este tipo de desechos. Una de las posibles soluciones es el tratamiento por medio de tecnología que permita acelerar la descomposición y/o reutilización de estos desechos, se han estudiado diversas técnicas para lograr lo anterior. En este trabajo se estudia el tratamiento por plasma de este tipo de residuos para modificar su superficie, posteriormente se expondrán a tratamiento UV y se evaluarán los cambios superficiales en cada etapa.

Planteamiento del problema.

La palabra basura significa para mucha gente algo despectivo, algo que carece de valor y de lo que hay que deshacerse lo más pronto posible. De esta manera lo útil, que no siempre necesario, se convierte en un estorbo. La basura está conformada por los desperdicios que a diario se desechan, la basura resultante al barrer el frente e interior de la vivienda, donde por lógica se cuelean los desperdicios de todo género: del baño, envases, papeles y con todos aquellos desperdicios que salen del hogar, la oficina, la calle y la industria. Por ende, la basura sugiere suciedad, falta de higiene, mal olor, contaminación, fecalismo, turbiedad e impureza.

En el medio rural, la basura jamás representó un verdadero problema, ya que los residuos orgánicos continuaban el ciclo de la vida sirviendo de abono o de alimento para animales. En las ciudades la basura termina en rellenos sanitarios que rápidamente son saturados. Por estas razones, es necesario encontrar una solución que ayude a resolver el problema de la sobre saturación de los rellenos sanitarios, así como de la basura que queda en las calles y en el ambiente.

Justificación.

El desmesurado crecimiento en el volumen de los residuos en la sociedad actual está poniendo en peligro la capacidad de la naturaleza para mantener las necesidades actuales y las de futuras generaciones. La basura se considera uno de los problemas ambientales más grandes de la sociedad. La población y el consumo per cápita crece, y por ende la basura; pero el espacio no y además su tratamiento no es el adecuado.

Hasta el día de hoy la gestión de los residuos se ha centrado principalmente en un único aspecto, la eliminación de estos a través de basurales, rellenos sanitarios y en algunos casos, de incineradores. Estas soluciones de final de tubería, como se las denomina, no tienen en cuenta la necesidad de reducir el consumo de materias primas y de energía, y plantean serios riesgos para el medio ambiente y la salud de las personas.

La población en general no presenta una cultura de interés en el destino de los residuos, la mayor preocupación es la necesidad de contar con un servicio de recolección de estos. No hay interés en efectuar una reducción importante en la generación, como base para un manejo sustentable, para lograr la preservación de los recursos naturales y tampoco interés en los mecanismos de disposición final, salvo que ellos representen una amenaza para la salud en los casos de poblaciones circundantes.

En México la mala gestión de desechos no solo afecta la salud pública, sino que amenaza la biodiversidad, se estima que cada habitante arroja aproximadamente 1.2 kg de basura por día, cifra que aumenta a causa de los desechos provenientes de cubrebocas, guantes y equipo de protección médico a causa de la pandemia de Covid-19. Del 17 de marzo de 2020 al 7 de enero de 2021, cada día se están depositando cerca de 14 a 15 millones de toneladas de residuos Covid-19.

En este proyecto se estudian los principales cambios fisicoquímicos que suceden en los polímeros más usuales encontrados en la basura, polietileno y poliestireno, a los que se les induce

degradación acelerada mediante tratamiento por plasma obtenido por descargas eléctricas de resplandor en aire y radiación UV.

Hipótesis

Al aplicar descargas de resplandor y radiación UV en la superficie de residuos poliméricos estos presentarán cambios en la superficie.

Objetivos**General.**

Evaluar la composición de los polímeros (PET, PS y LDPE), cambios y transformaciones al realizar un tratamiento por plasma y posterior radiación UV antes y después de los tratamientos.

Específicos.

- A. Revisar conceptos de plasma, polímeros, tratamientos mediante plasma, radiación UV.
- B. Clasificar los residuos a utilizar en el tratamiento
- C. Analizar la morfología, estructura y características de mojabilidad de los materiales.
- D. Realizar el tratamiento a las muestras por medio de plasmas de resplandor.
- E. Analizar cambios en morfología, estructura y mojabilidad después del tratamiento por plasma.
- F. Realizar tratamiento por radiación UV.
- G. Analizar las características del material después del tratamiento.

CAPITULO 2

2 Marco Teórico

2.1 Plasma

El plasma es considerado el cuarto estado de la materia, es un gas caliente, brillante y altamente ionizado, hasta un punto donde cobra propiedades únicas que lo diferencia del estado gaseoso o de cualquier otro gas. en la ilustración 1 se muestra los estados de materia.

Una forma de cambiar la materia de un estado a otro es aumentando sus niveles de energía, si una materia se encuentra en estado sólido y se adiciona energía, esta pasa del estado sólido al líquido, si se continúa aumentando los niveles de energía, pasa del líquido al gaseoso y si el nivel de energía es aún mayor, pasa del gaseoso al plasma. (Adema, KN, Makki, H., Peters, EA, Laven, J., Van der Ven, LG, van Benthem, RA y de With, G. (2016))

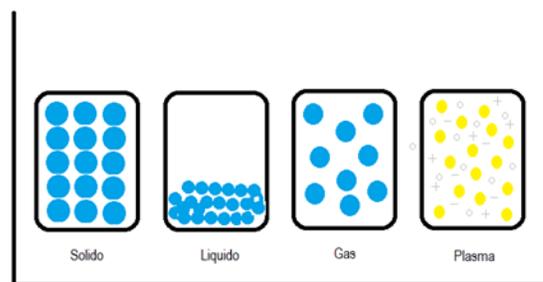


Ilustración 1 Los cuatro estados de la materia (creación propia)

Al existir un número interminable de estrellas en el universo, así como de nebulosas y de otras entidades celestes, se le considera como el estado de la materia más abundante. El sol es el ejemplo más cercano donde se puede apreciar las características del plasma. Por otra parte, en la tierra ocurren fenómenos naturales en los cuales se desencadena una momentánea aparición del plasma, tales como el fuego y los rayos en las tormentas.

El plasma se asocia a altas temperaturas, pero también a grandes potencias eléctricas a luces incandescentes y a una alta conductividad eléctrica. (Whitten, D. Peck & Stanley. 2008)

2.2 Tipos de plasma.

Una primera clasificación de los tipos de plasma se realiza de acuerdo a su equilibrio térmico, esto depende si la temperatura o energía de las partículas que lo conforman son la mismas para todas, como se muestra en la ilustración 2.

Los plasmas térmicos son aquellos en que la temperatura de sus electrones, átomos, iones y moléculas son las mismas, un ejemplo de los plasmas térmicos es el interior de las estrellas. Los plasmas no térmicos se caracterizan por el hecho de que las energías de los electrones libres y la de los átomos, iones y moléculas son muy distintas por lo que el plasma no térmico no se encuentra en equilibrio. (Chrissafis, K. (2009))

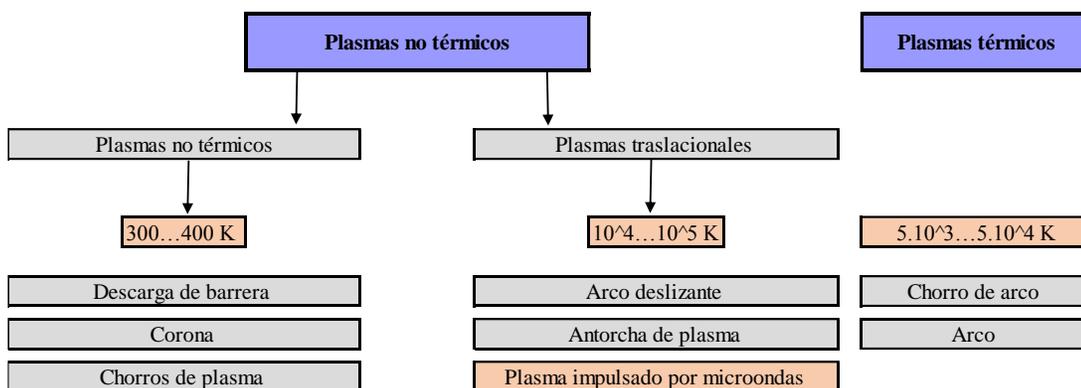


Ilustración 2 Tipos de plasma (creación propia)

2.3 Descargas de resplandor (plasma luminiscente).

La descarga luminiscente se genera en una atmosfera de gas y a bajas presiones, debido a la continua radiación, existen pares de electrones iones que se pueden presentar en el aire ambiente a temperatura normal y presión atmosférica. Su principio de funcionamiento consiste en que cuando un gas (aire, Ar) se somete a un potencial eléctrico aplicado entre dos electrodos, o bien en un campo electromagnético externo, los electrones libres se aceleran, mucho más que los iones, notablemente más pesados.

La desexcitación espontánea de estas partículas proporciona una de las características más distintivas, que resulta apreciable como emisión de luz visible y de radiación en todo el intervalo electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas, ver Ilustración 3. (Molina, N. F., Mendoza, K. J., Añez, R. O., & Marulanda, W. U. (2021))



Ilustración 3. Ejemplo de plasma de resplandor (creación propia)

2.4 Descargas de resplandor Resistivas.

Las descargas de resplandor son resultado de los electrones desprendidos de sus órbitas o liberados durante las colisiones de los átomos. En la generación de plasmas, el campo eléctrico generador puede aplicarse a través de acoplamiento resistivo, capacitivo, inductivo o sus combinaciones.

En acoplamiento resistivos, los electrodos que están en contacto con el gas generan un campo eléctrico por la aplicación externa de una diferencia de potencial. El gas actúa como resistencia eléctrica al paso de la corriente, observar ilustración 4A. En acoplamientos capacitivos el dieléctrico lo forma el gas de trabajo junto con otros elementos, los electrodos se colocan en el exterior formado una especie de capacitor, observar ilustración 4B. En acoplamiento inductivo, las descargas eléctricas se inducen por medio de bobinas colocadas en el

exterior del rector, que generan un campo electromagnético en el interior debido al flujo de electrones que pasa por la bobina, observar ilustración 4 C.

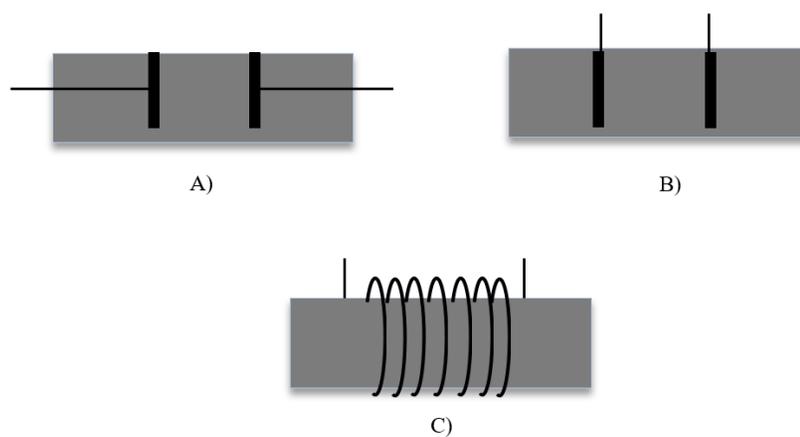


Ilustración 4 Tipos de acoplamiento (creación propia)

Cuando se tiene una descarga de resplandor en un tubo se puede observar entre los electrodos una serie alternada de zonas luminosas y oscuras, ver ilustración 5. (Molina, N. F., Mendoza, K. J., Añez, R. O., & Marulanda, W. U. (2021))



Ilustración 5. Descargas de resplandor resistivas. (creación propia)

2.5 Polímeros

La palabra polímero viene del griego, poli =muchos, mero = unidad, los polímeros se definen como macromoléculas que se obtienen por la unión de varias moléculas pequeñas y repetidas a lo largo de toda una cadena, la reacción por la que se forman es la polimerización.

Los polímeros son moléculas de gran tamaño hechas por enlaces covalentes y eslabones hechos principalmente por átomos de carbono. Los polímeros más comunes son de materiales ligeros resistentes a la corrosión de baja resistencia y rigidez y no son adecuados para usarse a altas temperaturas. (Quagliano, J. C. (1998)).

2.6 Tipos de polímeros

Los polímeros se clasifican de diferente manera por su forma, moléculas, estructura o familia química; Una clasificación de los polímeros es si son lineales o ramificados. Los polímeros lineales están formados por cadenas de moléculas con forma de espagueti sin tener alguna rama en ella, en la siguiente ilustración 6 se muestra un ejemplo de ello. (Zapata, D., Pujol, R., & Coda, F. (2012)).

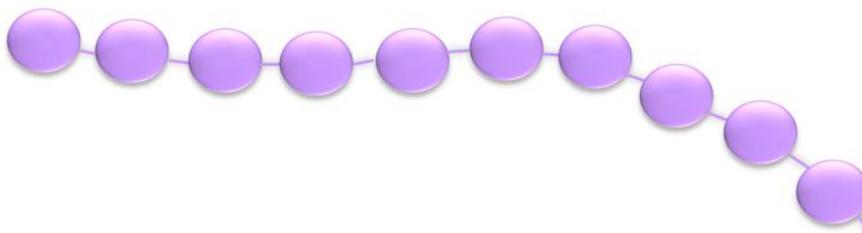


Ilustración 6. Polímero lineal con forma de espagueti sin ramificación (creación propia)

En los polímeros ramificados hay una cadena principal y en ella salen ramas pequeñas, como se puede observar en la ilustración 7.

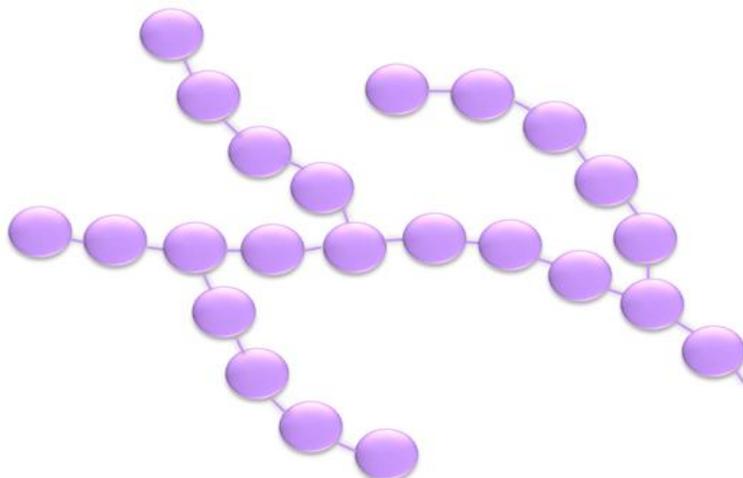


Ilustración 7 Polímero ramificado (creación propia)

2.6.1 PET (polietileno tereftalato)

Es un polímero que se obtiene a partir del etileno, puede ser transformado mediante procesos de inyección y termoformado. Es un material lineal con una gran transparencia y dureza muy resistente tanto al desgaste, es reciclable varias veces.

El reciclaje de PET tiene varias ventajas:

- Conservación de la materia ya que por su fácil reciclaje puede ser utilizado varias veces sin necesidad de estar sacando materia prima constantemente.
- Es un material impermeable a las sustancias.
- Es adaptable al medio ambiente.

En la ilustración 8 se muestra cómo está la unidad de repetición del PET y sus aplicaciones son películas fotográficas, cintas para grabación, bolsas para hervir recipientes para bebidas. (Nevoralová, M., Koutný, M., Ujčič, A., Horák, P., Kredatusová, J., Šerá, J. & Kruliš, Z. (2019)).

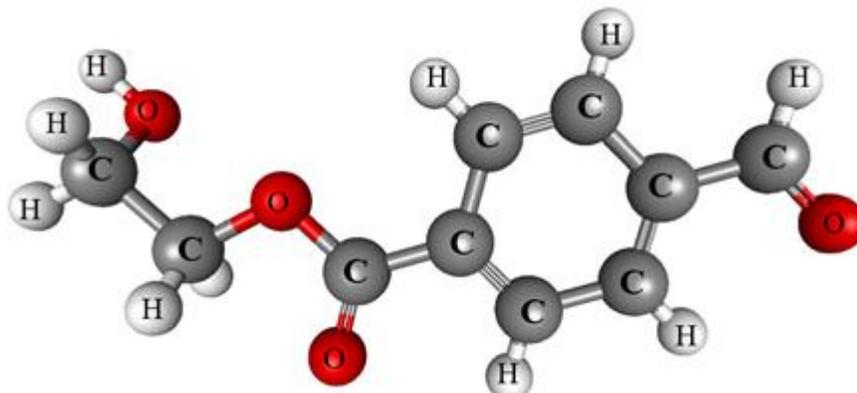


Ilustración 8 PET, ((creación propia).

2.6.2 PS (Poliestireno)

El poliestireno se usa para hacer electrodomésticos, repuestos automotrices, juguetes incluso para la industria alimenticia, se puede encontrar en diferentes presentaciones para la traspotación de bebidas como alimentos. Hay dos tipos el expandido y el extruido.

La característica principal del poliestireno expandido o espumoso es su peso ya que es muy ligero y resistente a la humedad, este material actualmente es el más utilizado para realizar envases de alimentos ya que no se echa a perder ni se descompone, este tipo de material se puede encontrar en vasos o platos para los alimentos. Otra característica es su capacidad de aguantar los golpes.

El poliestireno extruido o duro es un buen material para la elaboración de productos como juguetes electrodomésticos y otros que necesiten una alta resistencia, otra de sus virtudes es que no se puede mezclar con otros compuestos químicos fácilmente. En la ilustración 9 se muestra la estructura del estireno. (Nevoralová, M., Koutný, M., Ujčic, A., Horák, P., Kredatusová, J., Šerá, J.& Kruliš, Z. (2019)).

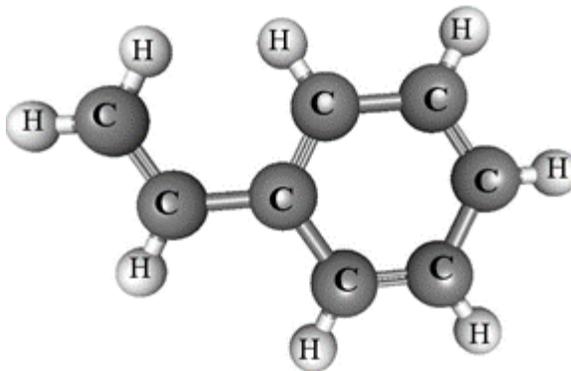


Ilustración 9 Estructura química de estireno (creación propia)

2.63 LDPE (Polietileno de baja densidad)

El polietileno es probablemente el polímero más utilizado en la vida diaria de cada persona. En la ilustración 10 se muestra la estructura química del etano. (Nevoralová, M., Koutný, M., Ujčič, A., Horák, P., Kredatusová, J., Šerá, J. & Kruliš, Z. (2019))

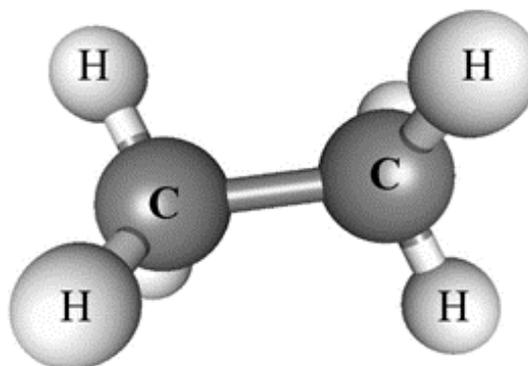


Ilustración 10 Estructura química de etano (creación propia)

2.7 Residuos poliméricos

La problemática de los residuos poliméricos crece y se encuentra ligada directamente con la producción y las costumbres del consumo que se tiene en la vida cotidiana de los seres humanos, aunque se han realizado varios intentos para que esto disminuya y se concientice a las personas no se ha podido corregir este mal hábito. Por un lado, cada día se produce más plástico

y por el otro lado se desecha más y en mucho menos tiempo, quitando el valor del material y no tomando en cuenta las consecuencias para el medio ambiente que se pueden generar en el abuso de este material. En la siguiente ilustración 11 se muestra algunos de los productos que se usan frecuentemente. (Zapata, D., Pujol, R., & Coda, F. (2012)).



Ilustración 11 Productos hecho con los polímeros (La ciencia de cada día, octubre 22 2012)

Los polímeros son materiales versátiles y accesibles económicamente por lo que representan una opción significativamente viable para fabricar diversos productos, el impacto en la industria ha sido tan maravilloso que puede decirse que se está viviendo en una era de polímeros. Sin embargo, este panorama no es del todo positivo, ya que todo este desarrollo e innovación también pone en evidencia su poder de contaminación al medio ambiente ya que afecta cada rincón del planeta. (Gubanova, E., Kupinets, L., Deforz, H., Koval, V. y Gaska, K. (2019)). Al final de la vida útil de los polímeros estos pasan a ser los residuos más contaminantes y de mayor volumen que los residuos orgánicos.

Por lo tanto, la constante demanda de estos polímeros (plástico) ha provocado la acumulación de residuos no biodegradables lo cual consume mucho espacio y contribuye a los

peligros ambientales, en la ilustración 12 se muestra un claro ejemplo de la acumulación de los polímeros que esto se genera. (C. Singh, N., Singh, R. y Ahuja, IPS (2018)).



Ilustración 12 Acumulación de los polímeros (plástico) Salvador García Liñán julio 21, 2015

2.8 Degradación.

La degradación se define como un cambio en las propiedades o cualquier cambio indeseable, bajo la influencia de uno o varios factores ambientales como el calor, la luz o químicos, que esto puede ayudar a su degradación. Los principales mecanismos de degradación son:

- Foto degradación: es una reacción química que se produce bajo la influencia de la luz puede tener lugar en la atmósfera, en el suelo y el agua, uno de los factores que condicionan este proceso es la intensidad de la radiación UV a la que se exponga el polímero.
- Degradación mecánica: Es causada por esfuerzos o vibraciones a los que se exponga el material y a esto le dé un cambio considerable a la estructura física como química.

- Degradación térmica: Ocurre cuando el polímero es expuesto a altas temperaturas y esto provoca cambios químicos sin que se utilice otro componente o sustancias, solo energía térmica (calor).
- Degradación química: Esto se refiere al uso de sustancias químicas que reaccionan al tipo de polímero que se quiere degradar.
- Degradación mediante microorganismos (bacterias, hongos o algas): Dichos microorganismos ya sean naturales o sintéticos producen el crecimiento de enzimas que promueven la descomposición por lo tanto la degradación de los polímeros. (Rojas, A. F., & Osswald, T. (2016)).

2.9 Tratamientos de residuos

Los tratamientos de residuos tienen como objetivo principal modificar las características físicas, químicas o biológicas de los residuos que tienen como fin:

- Reducir o neutralizar las sustancias peligrosas provocadas por los residuos.
- Recuperar materias que se puedan volver a utilizar.

Con estos procesos fundamentales se quiere dar una segunda vida a los residuos minimizando de esta manera la contaminación del entorno y la extracción de la materia prima que viene de la naturaleza. Una gran cantidad de residuos plásticos provienen de envases desechables de bebidas y líquidos de uso doméstico y esto genera un problema ambiental sin que tenga una forma de resolver la situación. Estos en su mayor parte no son reciclados y no son apropiados para la reutilización. (Nones Faria, C. E. (2019))

Un porcentaje importante de envases son fabricados con PET que puede ser reciclado. Los envases obtenidos a partir de PET no alteran las propiedades del contenido y no son tóxicos. La mayoría de los fabricantes de productos plásticos colocan un número a sus productos con un

código internacional, que facilita su identificación para la separación y el reciclaje. La identificación que consta de un número de 1 a 7 según el tipo de plástico en la siguiente tabla se muestra la identificación de los plásticos:

Codigo		Material	Usos comunes
1	PET	Polietileno Tereftalato	Bebidas carbonatadas
2	PEAD	Polietileno de Alta densidad	Envases de detergentes y shampoo, laminas, bolsas, bidones, etc.
3	PVC	Policloruro de Vinilo	Tuberías, cables, cortinas de ducha, juguetes, pisos, etc.
4	PEBD	Polietileno Baja Densidad	Envases de películas finas y envoltorios, pañales, laminas
5	PP	Polipropileno	Tapas, etiquetas, baterías, etc
6	PS	Poliestireno	Envases de espuma, vasos y cubiertos descartables, etc
7	Otros	Plásticos no seleccionados	Varios

Tabla 1 Tipos de plástico (creación propia)

Para el reciclado de plástico existen tres modos una vez que terminó su vida útil, someterlo a un reciclado mecánico, a un reciclado químico o utilizarlo como fuente de energía. (Arandes, J. M., Bilbao, J., & López, D. (2004)).

El reciclaje mecánico se realiza por medio de la presión y del calor con el objetivo de producir otros objetos, es el más utilizado donde los plásticos se lavan y se muelen para obtener un producto en forma de finas tiras para que se pueda reutilizar, en la siguiente ilustración 13 se muestra el proceso de reciclado.

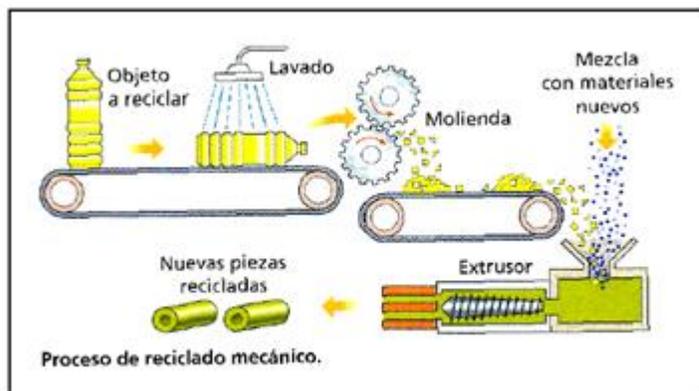


Ilustración 13 Reciclaje mecánico (Okan, M., Aydin, HM y Barsbay, M. (2019))

El objetivo del **reciclado químico** es la descomposición de los plásticos usando reactivos químicos estos se pueden utilizar otra vez como materia prima. Existen diferentes procesos para realizar el reciclaje químico: pirólisis, hidrogenación, gasificación o tratamiento con disolventes, en la ilustración 14 se muestra el proceso de reciclado químico.

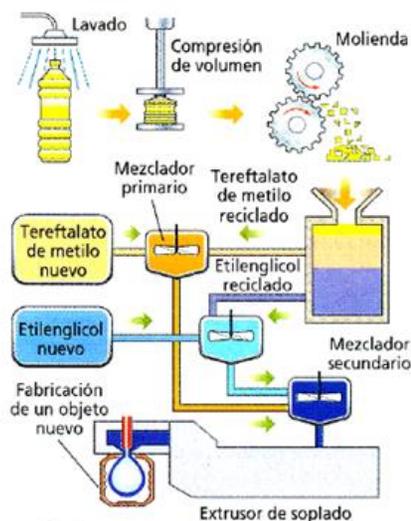


Ilustración 14 Reciclado químico Schlummer, M., (2007)

La tercera alternativa es la **recuperación de energía** lo cual los plásticos se producen a base de petróleo y tienen un valor de calor elevado. Como fuente de energía debido a que en su

fabricación no se utiliza ningún complemento y se puede obtener una fuente de energía de calor, en la siguiente ilustración 15 se muestra el proceso de reciclado. (Řezníčková, A., Kolská, Z., Hnatowicz, V., Stopka, P. y Švorčík, V. (2011)).

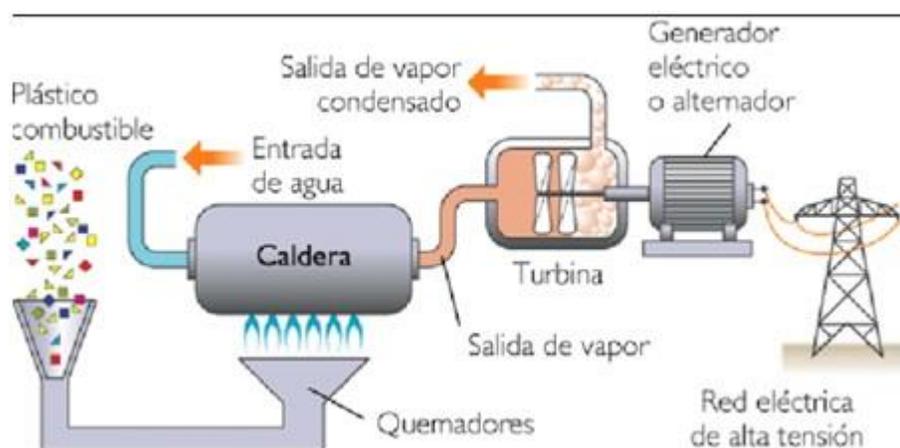


Ilustración 15 Recuperación de energía (Márialigeti, K. (2015)).

2.10 Tratamientos por radiación UV

Los plásticos que se utilizan para el uso común están expuestos a duras condiciones de clima ya que no se sabe dónde se almacena o como se transporta después de que sale de las plantas que producen dicho plástico. Uno de los principales problemas al considerar el efecto de los rayos UV en los polímeros es la intensidad del ozono, las nubes, y la posición en la altura que se tiene al contacto con el sol, también es importante recordar que la temperatura del ambiente y la humedad acelerarán cualquier efecto que pueda tener el polímero y todo esto depende la intensidad que se tenga expuesta a dichos rayos. (Rauh, B., Kreling, S., Kolb, M., Geistbeck, M., Boujenfa, S., Suess, M. y Dilger, K. (2018)).

Todos los tipos de UV pueden tener efectos fotoquímicos en la estructura de los polímeros, el cual puede tener un beneficio aceptable o le puede ocasionar algún tipo de degradación. Los principales efectos visibles que se tiene al ser expuesto a la radiación UV es el cambio del color original en la superficie del plástico, que además se vuelve quebradiza. En la

ilustración 16 se muestra un claro ejemplo de cómo se transforma una botella de plástico expuesta al medio ambiente y a los rayos del sol (Gómez, E., Rani, DA, Cheeseman, CR, Deegan, D., Wise, M. y Boccaccini, AR (2009)).



Ilustración 16 Exposición de plástico al sol (Ripa Jaime 11 Ago 2016)

Los efectos anteriores ocurren principalmente en la superficie del material y es poco probable que se extiendan a profundidades mayores a 0.5 mm, pero todo esto depende del grosor ya que si se compara una botella de plástico con una silla de plástico se tiene por lógica que la descomposición o la alteración será mayor en la botella durante la exposición de la radiación UV.

La energía UV absorbida por los plásticos puede excitar a los fotones y esto genera la alteración de la estructura, esta alteración lleva bastante tiempo en que suceda, mientras que muchos plásticos puros no pueden absorber la radiación UV, la presencia de residuos de catalizadores y otras impurezas actúan como receptores de la radiación y causan su degradación. Los tipos de plásticos no modificados cuya resistencia a la radiación UV se considera como inaceptable son por ejemplo: POM (acetal), PC, ABS y PA6 / 6 mientras que otros plásticos como PET, PP, HDPE, PA12, PA11, PA6, PES, PPO, PBT y PPO se consideran aceptables- hay que poner los nombres de los polímeros-. (Guddeti, RR, Knight, R. y Grossmann, ED (2000)).

Una interacción que es útil entre la radiación UV y los plásticos son con agentes fluorescentes blanqueadores (FWA). Los plásticos expuestos a la luz natural pueden tener un aspecto amarillento, pero al agregar un FWA, la luz UV absorbida se vuelve a un color azul visible (longitud de onda entre 400 y 500 nm),

El desgaste de los componentes a menudo está relacionado con los productos que se utilizan al aire libre, pero también puede haber radiación UV en los interiores que provienen de iluminación fluorescente. El envejecimiento acelerado es una técnica común para evaluar el daño a largo plazo con el producto expuesto a la luz artificial de diferentes formas. (Hassanzadeh-Khayyat, M., Lai, E. P., Kollu, K., & Ormeci, B. (2011)).

2.11 Técnicas de caracterización

2.11.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen, este produce imágenes de alta resolución el equipo cuenta con un dispositivo que genera electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados por la interacción con la superficie para crear una imagen que refleja las características superficiales, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química que lo forma. En la ilustración 17 se muestra un microscopio electrónico de barrido. Quintana Olivares, C. (2016)



Ilustración 17 Microscopio electrónico de barrido (SEM) (Expresiones UDLAP Córdoba Lozano Felipe, (2017))

La microscopía óptica es la técnica utilizada para hacer visible los objetos que por su tamaño están fuera de la visibilidad del ojo humano, los lentes se colocan entre la muestra y el ojo del espectador para engrandecer la imagen, esto permite conocer las células y las estructuras de los tejidos, en la ilustración 18 se muestra un microscopio óptico. Nisol, B. y Reniers, F. (2015).



Ilustración 18 Microscopio óptico (MO) (Smith Yolanda, B.Pharm (2011))

2.11.3 Hidrofilicidad

La caracterización de los materiales estudia las propiedades físicas, químicas y estructurales, bajo ciertas condiciones, este estudio consiste en la obtención de información acerca de las propiedades superficiales del material al interactuar con otros materiales o líquidos ajenos al material. Chrissafis, K. (2009).

Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es la medida de la capacidad de un líquido para mojar la superficie de un sólido, la forma que toma una gota en una superficie depende de la fuerza de atracción de la superficie hacia ella. Cuando el ángulo de contacto es menor de 90° la atracción de la superficie es muy alta, mayor que la fuerza de cohesión de la gota, pero cuando el ángulo es

mayor de 90° la fuerza de cohesión de la gota es mayor que la atracción de la superficie. En las siguientes ilustraciones 19 y 20 se muestra los ángulos de contacto mencionados. Márialigeti, K. (2015).

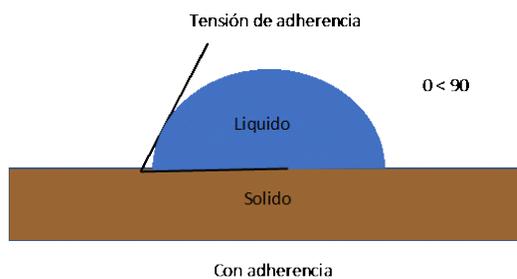


Ilustración 19 Angulo de adherencia menor a 90° (creación propia).

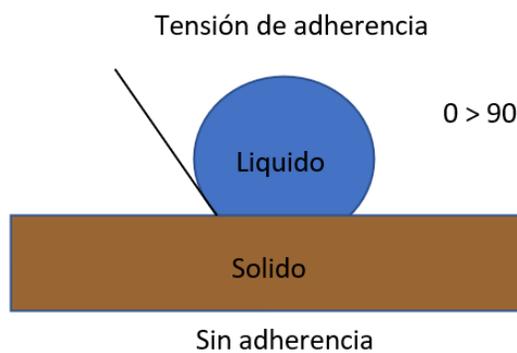


Ilustración 20 Angulo de adherencia mayor a 90° (creación propia).

CAPITULO 3

3. Metodología.

En la siguiente ilustración 21 se muestra el diagrama del proceso de cómo se empezó a realizar dicho trabajo, tomando en cuenta los tratamientos realizados a dichos materiales.

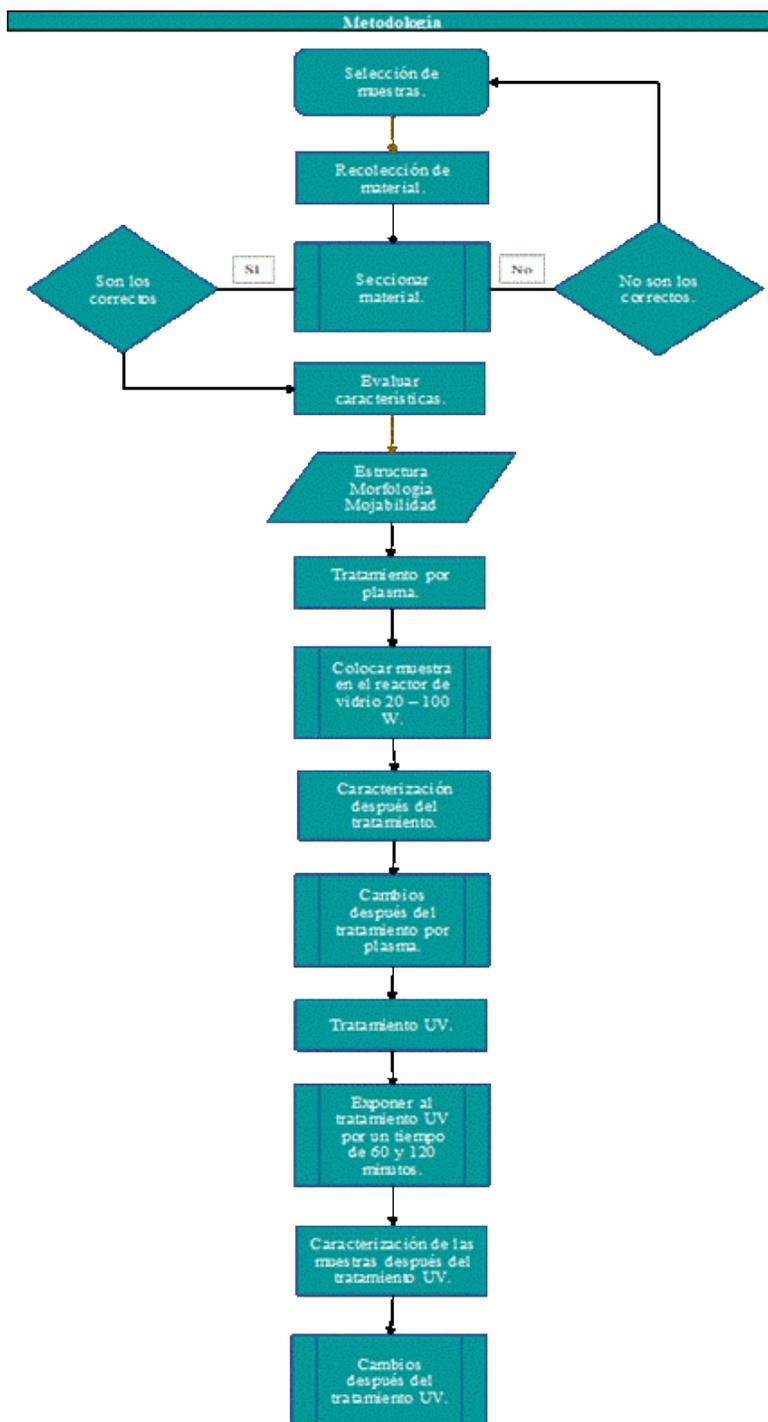


Ilustración 21 Diagrama de proceso (creación propia).

3.1 Selección de muestras

Los materiales que se utilizaron en este estudio fueron:

- PET (botellas).
- PS (Unicel).
- LDPE (Polietileno, bolsas de plástico)

3.2 Búsqueda de material

Los tres materiales se pueden encontrar muy fácilmente en cualquier basurero, de ahí se tomaron, puesto que su vida útil es muy corta y son fáciles de conseguir, como se observa en las ilustraciones 22, 23 y 24 se muestran los materiales a usar.



Ilustración 22 LDPE (bolsas de plástico) (creación propia).



Ilustración 23 PS (unicel) (creación propia).



Ilustración 24 PET (botellas) (creación propia).

3.3 Seccionar material (cortar)

El material recolectado proveniente del contenedor de basura se corta en muestras pequeñas al tamaño que puedan ser fáciles de introducir y pegados en el reactor, porque si no se realiza el pegado del material se moverá y no se mantendrá fijo a la hora de realizar el

tratamiento, como se muestra en las ilustraciones 25, 26, 27 y 28 para realizarle el tratamiento de plasma.



Ilustración 25 Material PET cortado en pequeñas muestras (creación propia).



Ilustración 26 Material PS cortado en pequeñas muestras (creación propia).



Ilustración 27 Material LDPE cortado en pequeñas muestras (creación propia).

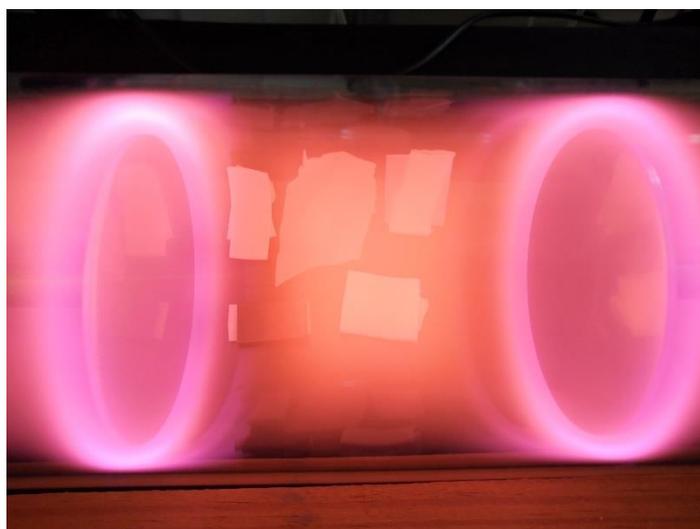


Ilustración 28 Reactor con el material pegado (creación propia).

3.4 Evaluar características antes del tratamiento

Como se observa, el material antes de ser tratado no presenta alguna modificación. El PET fue cortado en pequeños rectángulos, se presenta el material de forma lisa, cuenta con un elevado brillo y gran transparencia sin alguna contaminación visible al ojo humano. El PS a simple vista presenta superficie lisa, la estructura del plato con puntos y poros muy pequeños y se siente un poco áspero. El LDPE presenta superficie lisa y la bolsa se siente delgada al tacto.

3.5 Tratamiento por plasma

El tratamiento por plasma de resplandor se realizó dentro de un reactor tubular de vidrio con 9 cm de diámetro y 29 cm aproximadamente de longitud. Para bajar la presión dentro del tubo debe de ser sellado, esto se logra utilizando dos bridas de acero inoxidable, las cuales tienen una entrada central por donde se le acopla un electrodo de acero inoxidable, por medio de una varilla metálica de 15 cm, el electrodo cuenta con un diámetro aproximado de 6 cm, entre los dos electrodos teniendo una separación de 7 cm, en la siguiente ilustración 29 se muestra el reactor y lo componentes que se explican.



Ilustración 29 Reactor (creación propia).

En las paredes del reactor se pegan las secciones de las muestras a tratar, estas se colocan entre el espacio existente en los electrodos, como se muestra en la ilustración 30.

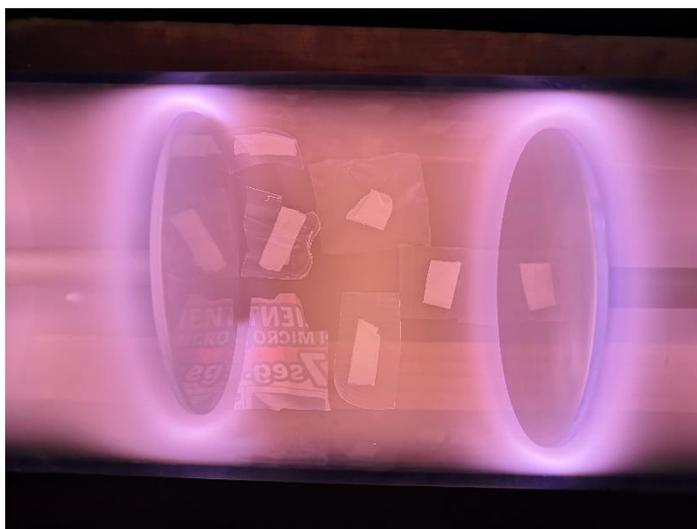


Ilustración 30 Se pegan las muestras a las paredes del reactor (creación propia).

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 la presión, ver ilustración 31.

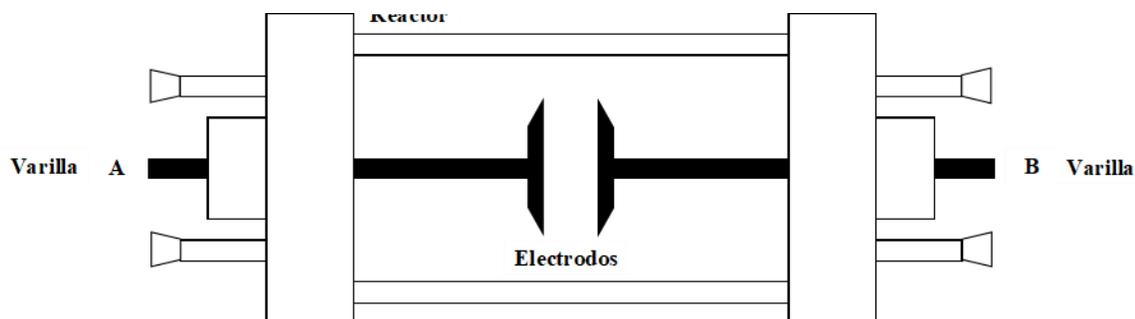


Ilustración 31 Reactor (creación propia)

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 $(2-5) \times 10^{-2}$ 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 puede observar en la siguiente imagen.

Una vez que la presión y las descargas se estabilizan, se deja que el plasma interactúe con la superficie de las muestras (observar la ilustración 32) se utilizaron potencias de 20 a 100 W con aumentos de 20 W durante un lapso de 10 min. Una vez concluidos los 10 min, se para el tratamiento por plasma, se abre el reactor y las muestras son extraídas para su análisis.

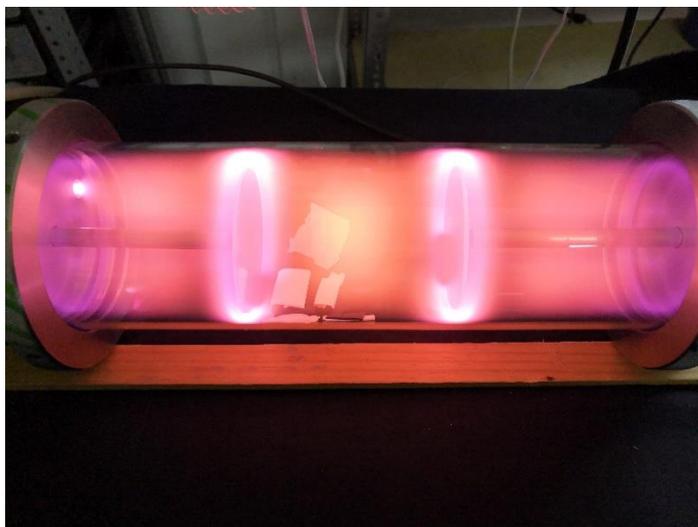


Ilustración 32 Reacción del monómero con el campo eléctrico (creación propia).

3.6 Evaluar las características después del tratamiento por plasma.

El material después de ser tratado puede presentar alguna modificación, es por ello que es necesario volver a evaluar las características del material después de su tratamiento por plasma para verificar los cambios obtenidos.

3.7 Realizar tratamiento por UV.

Una vez evaluados los materiales después de tratamiento por plasma, se procede a realizar un tratamiento adicional-

Los materiales PET, LDPE y PS fueron expuestos a radiación ultravioleta a 400 nm (nanómetros) de longitud de onda, en la ilustración 33 se puede observar el espectro electromagnético. El tratamiento por UV se realizó durante 60 min y 90 min.

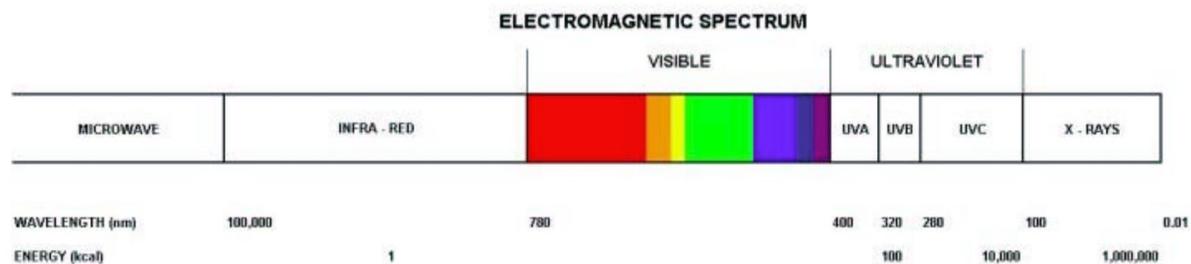


Ilustración 33 Diagrama de espectro electromagnético (Zeus Industrial Products, Inc).

3.8 Volver a evaluar las características después del tratamiento UV.

Se evaluarán las características de los polímeros después del tratamiento por radiación UV en cuanto a: morfología, estructura e hidrofiliidad.

CAPITULO 4

4.1 Composición.

4.1.1 PET

El PET o polietileno Tereftalato, es un plástico muy usado en envases de bebidas y en el sector alimenticio, en la siguiente ilustración 34 se muestra la estructura química del PET.

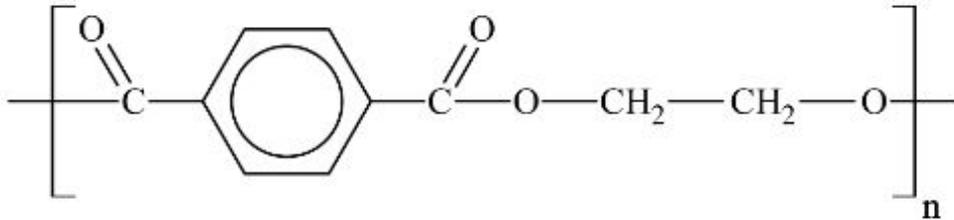


Ilustración 34 Estructura química del PET

En la ilustración 35 se muestran algunas características y datos técnicos del PET.

Las principales son:

- Es un material impermeable.
- Resistente al desgaste.
- Es transparente y cristalino, aceptando colorantes cuando se fabrica.
- Aunque los envases PET son poco biodegradables si es totalmente reciclable.
- Es un material liviano.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1,34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	--	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	--	Excelente
Calidad óptica	--	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 - 254

Ilustración 35 Datos técnicos del PET (Industria del Plástico. Plástico Industrial. Richardson & Lokensgard.)

4.1.2 Poliestireno expandido

El PS es un material plástico derivado del petróleo, cuando se combina con algunos gases su nombre cambia a poliestireno expandido cuyo nombre comercial es Unicel. El unicel es ligero pero resistente, su color es blanco, tiene capacidad de aislamiento al calor.

4.1.3 Polietileno

Las bolsas hechas de polietileno son un tipo de bolsa muy utilizada para guardar diversos productos, por lo tanto, podemos destacar las siguientes características:

- Es flexible.
- Resiste a los golpes.
- No tiene olor.

Una persona usa alrededor de 250 bolsas plásticas al año, lo cual representa un promedio de uso cada 12 min, ocasionando un impacto ecológico que alcanza los 1000 años para su completa degradación.

4.2 Morfología

4.2.1 Microscopía Óptica

En las siguientes ilustraciones se muestra la morfología obtenida por medio de Microscopía óptica, realizada por medio de un microscopio óptico digital comercial. En la ilustración 36 correspondiente al PET se puede observar superficie lisa con rayaduras posiblemente debido al uso que se le ha dado.

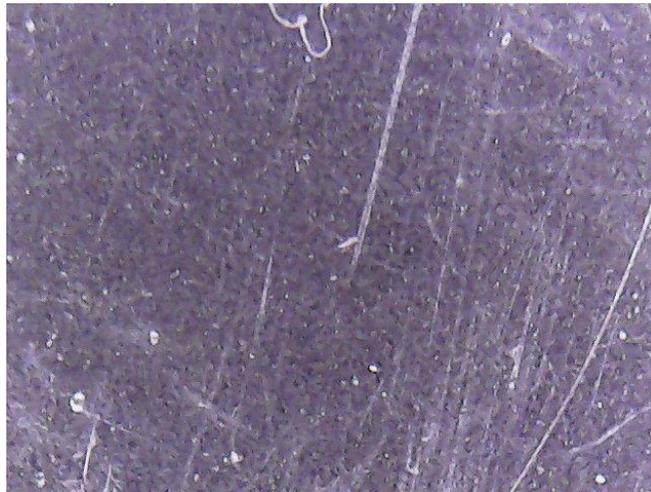


Ilustración 36 Micrografía de PET (creación propia)

La ilustración 37 corresponde a LDPE, se puede observar que la muestra cuenta con superficie lisa, pero con puntos de pliegue que se han hecho por el uso del material, también se observa que hay pequeños desgastes y huecos.



Ilustración 37 Micrografía de LDPE (creación propia)

En la ilustración 38 correspondiente al PS, cuenta con una superficie irregular que simula burbujas unidas, corrugado, no presenta fisuras o protuberancias.

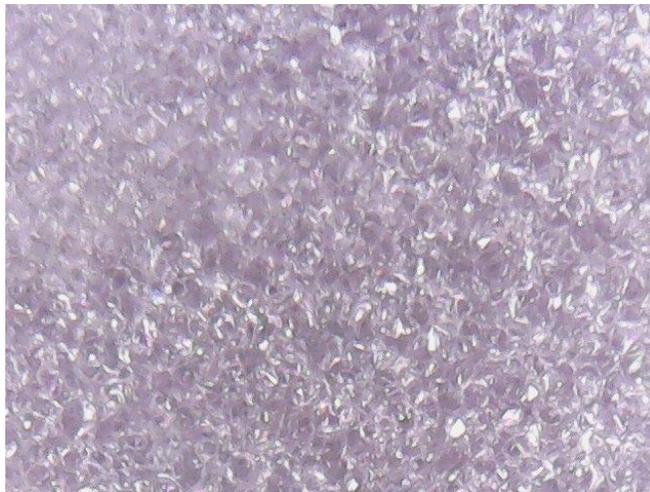


Ilustración 38 Micrografía PS (creación propia).

La morfología de las muestras fue estudiada por medio de microscopia óptica iluminando el material con luz azul (longitud de onda 405 nm). El material puede absorber o reflejar la luz azul incidente dependiendo las características del material.

PET

En la ilustración 39 se muestra el material al irradiarlo con el láser de color azul, con este tipo de iluminación se observa una muestra homogénea con algunas rayaduras en forma diagonal en toda la superficie.

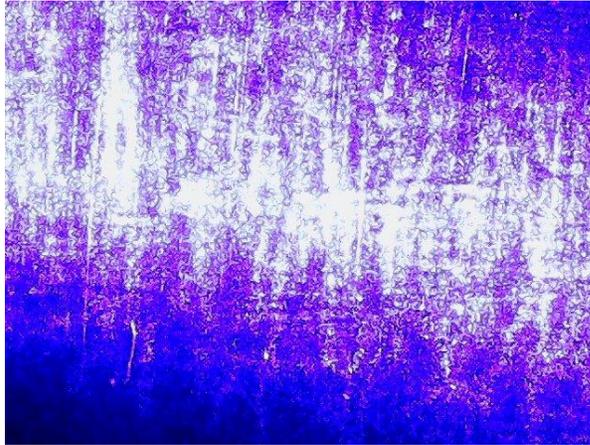


Ilustración 39 Micrografía PET ante luz azul (creación propia)

PS

En la ilustración 40 se observa que la superficie es regular con pequeños puntos en toda la muestra, también se nota como se encuentra corrugados en la parte central.

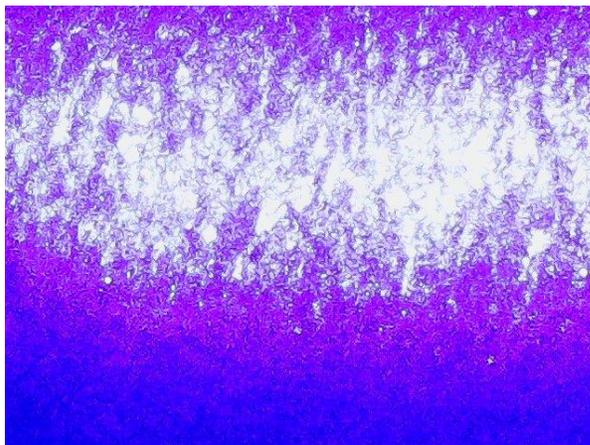


Ilustración 40 Micrografía plato de PS ante luz azul (creación propia)

LDPE con láser.

En la ilustración 41 se observa la superficie iluminada, hay zonas en donde se refleja la luz, en general la muestra es homogénea.

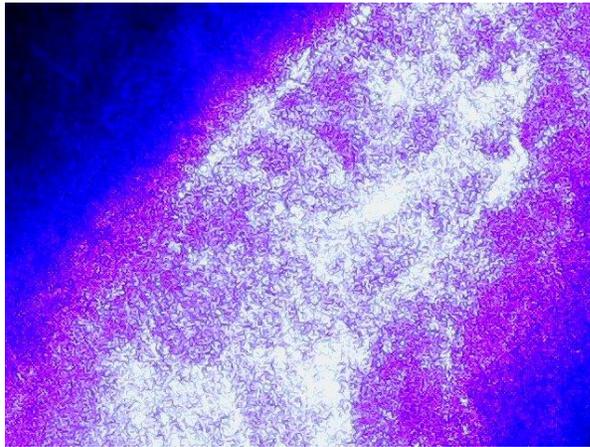


Ilustración 41 Micrografía de LDPE ante luz azul (creación propia)

4.2.2 Microscopía Electrónica de Barrido

Se presentan en las siguientes imágenes el análisis morfológico realizado por medio de Microscopía Electrónica de Barrido a 5000X aumentos.

PET

En la ilustración 42 se puede observar la morfología de la Botella de plástico (PET). la superficie de la muestra es lisa con algunas irregularidades y bordes.

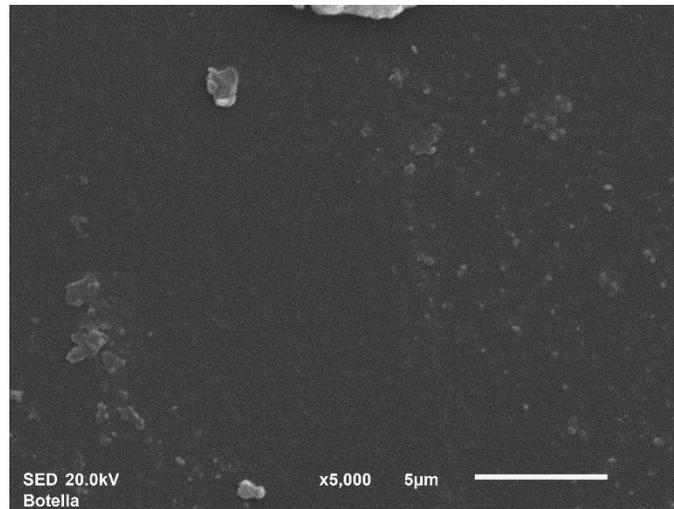


Ilustración 42 Micrografía de PET antes del tratamiento (creación propia)

PS

Como se puede observar en la ilustración 43, la superficie del plato de Unigel (PS) tiene bordes e irregularidades, se observan partes desgastadas, sin embargo, la mayor parte de la superficie es lisa.

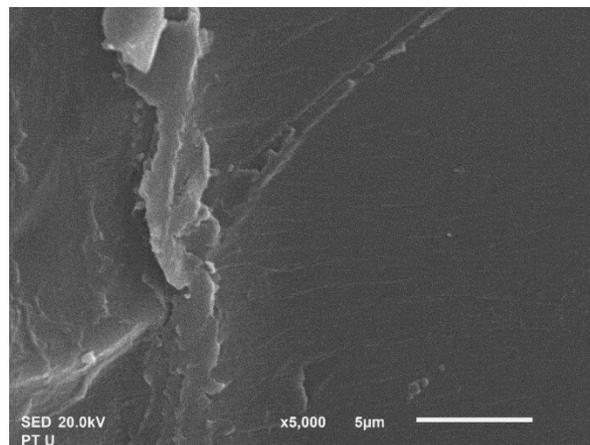


Ilustración 43 Micrografía de PS antes del tratamiento (creación propia).

LDPE

Como se muestra en la ilustración 44 la superficie de la bolsa es lisa con pequeñas irregularidades.

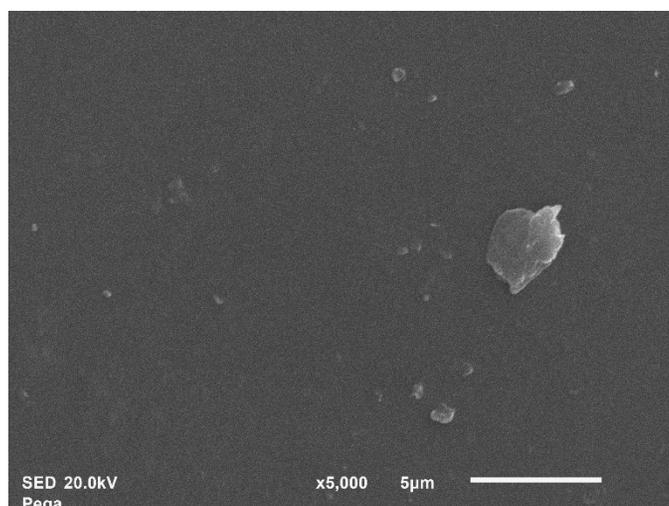


Ilustración 44 Micrografía de LDPE antes del tratamiento (creación propia).

4.2.3 Estructura Química

Las siguientes tablas muestran los resultados del análisis realizado por medio de espectroscopia de energía dispersiva. Se presenta la composición química resultante del promedio de 6 diferentes zonas de la muestra.

En la tabla 2 se muestra la composición química de PET, se observa que está compuesta de Carbono (C) y Oxígeno (O).

Elemento	% Atómico
C	63.63
O	36.37
Total	100

Tabla 2 Estructura química de PET (creación propia)

En la tabla 3 se muestra la composición química de LDPE, se observa que la muestra está constituida de C.

Elemento	% Atómico
C	100
Total	100

Tabla 3 Componente atómico de LDPE (creación propia)

En la tabla 4 se muestra la composición química del PS, se observa que la muestra está constituida de C.

Elemento	% Atómico
C	100
Total	100

Tabla 4 Componente atómico de PS (creación propia)

4.2.4 Tratamiento a 20W, 10 min.

Se presentan en las siguientes imágenes el análisis morfológico realizado por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a 5000X aumentos, después del tratamiento por plasma de resplandor a 20 W durante 10 min.

4.2.4.1 PET

En la ilustración 45 se puede observar la morfología de PET, la ilustración 42 (A) muestra la superficie que es lisa con algunas irregularidades como pequeños puntos como si fueran burbujas esto se encuentra antes del tratamiento. En la ilustración 45 (B) se puede observar como la primera capa se desprende con desgaste después del tratamiento a 20 W.

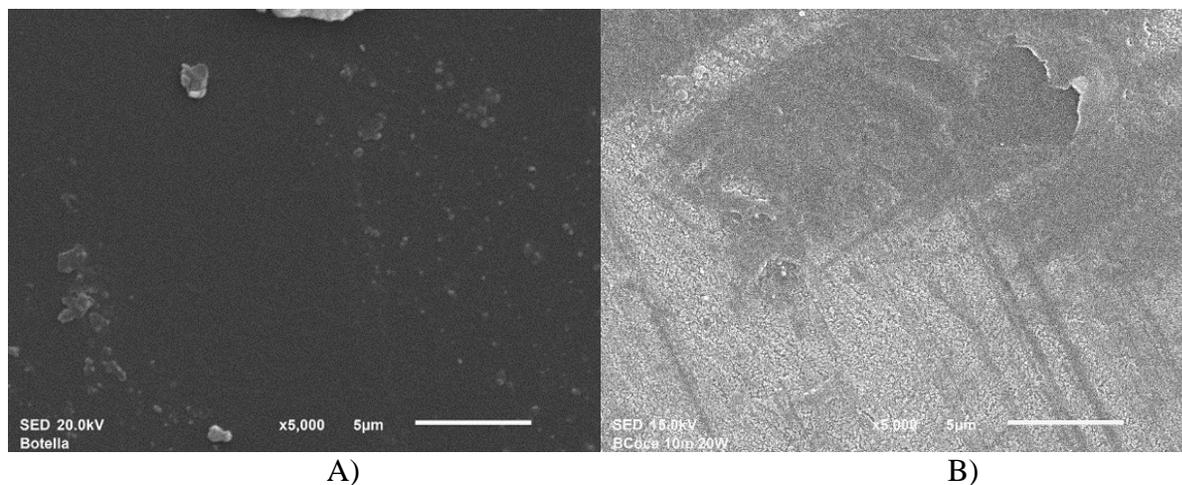


Ilustración 45 Micrografía de PET A) Antes del tratamiento, B) Tratamiento 20 W (creación propia).

4.2.4.2 PS

En la ilustración 46 se puede observar la morfología del PS, en la ilustración 43 (A) antes del tratamiento se observan bordes. En la ilustración 46 (B) con el tratamiento de 20 W se observan desprendimientos, se ven ligeros bordes en la mayor parte de la muestra y esto provoca que se vea arrugado.

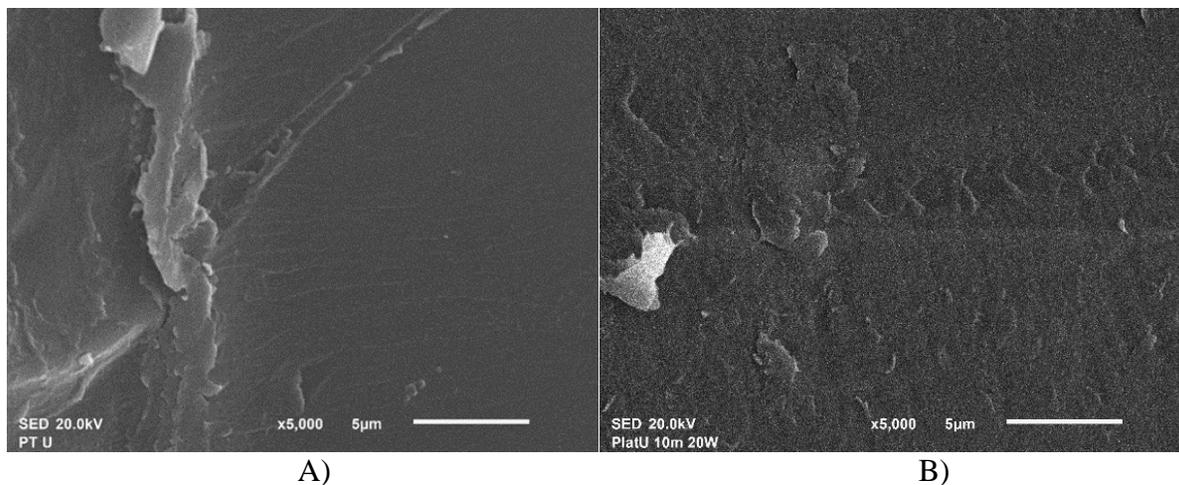


Ilustración 46 Morfología de PS A) Antes del tratamiento, B) Tratamiento 20 W (creación propia).

4.2.4.3 LDPE

En la ilustración 47 se puede observar la morfología de la bolsa de plástico, en la ilustración 44 (A) antes del tratamiento se puede observar que tiene superficie lisa con irregularidades. En la ilustración 47 (B) se puede observar cómo se formó una línea diagonal de desgaste y algunos puntos en la muestra.

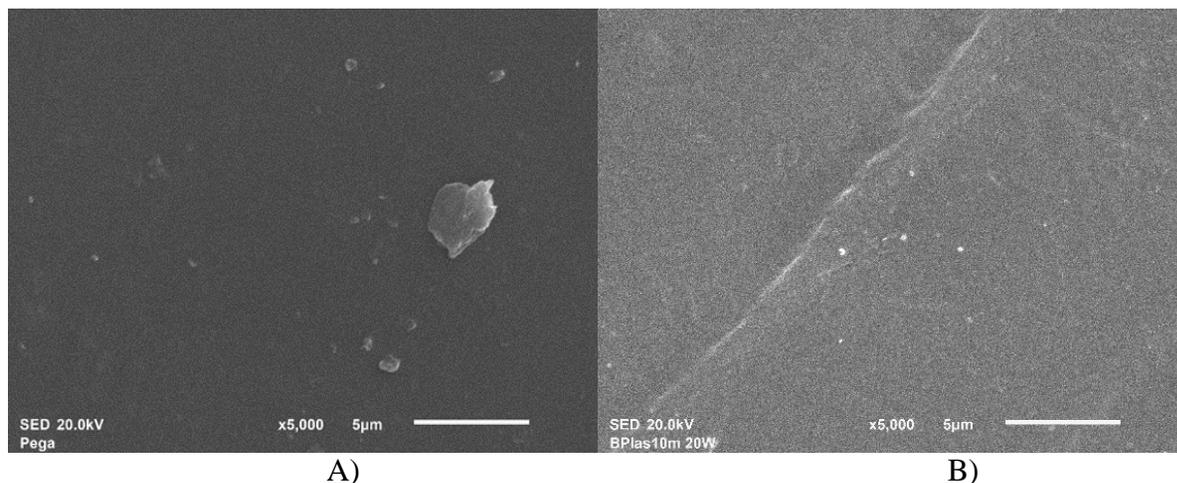


Ilustración 47 Micrografía de LDPE A) Antes del tratamiento, B) Tratamiento 20 W (creación propia).

4.2.5 Tratamiento a 40W, 10 min.

Se presentan el análisis morfológico realizado por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a 5000X aumentos, después del tratamiento por plasma de resplandor a 40 W durante 10 min.

4.2.5.1 PET

En la ilustración 48 se puede observar la morfología de PET, 42 (A) antes del tratamiento, 45 (B) tratada a 20 W, 10 min y (C) después del tratamiento a 40W se observa como en varias partes de la muestra se levanta la primera capa, incluso se ve cómo se hicieron unos pequeños huecos donde se levantó a comparación del tratamiento de 20 W, en donde solo se observan ligeros levantamientos.

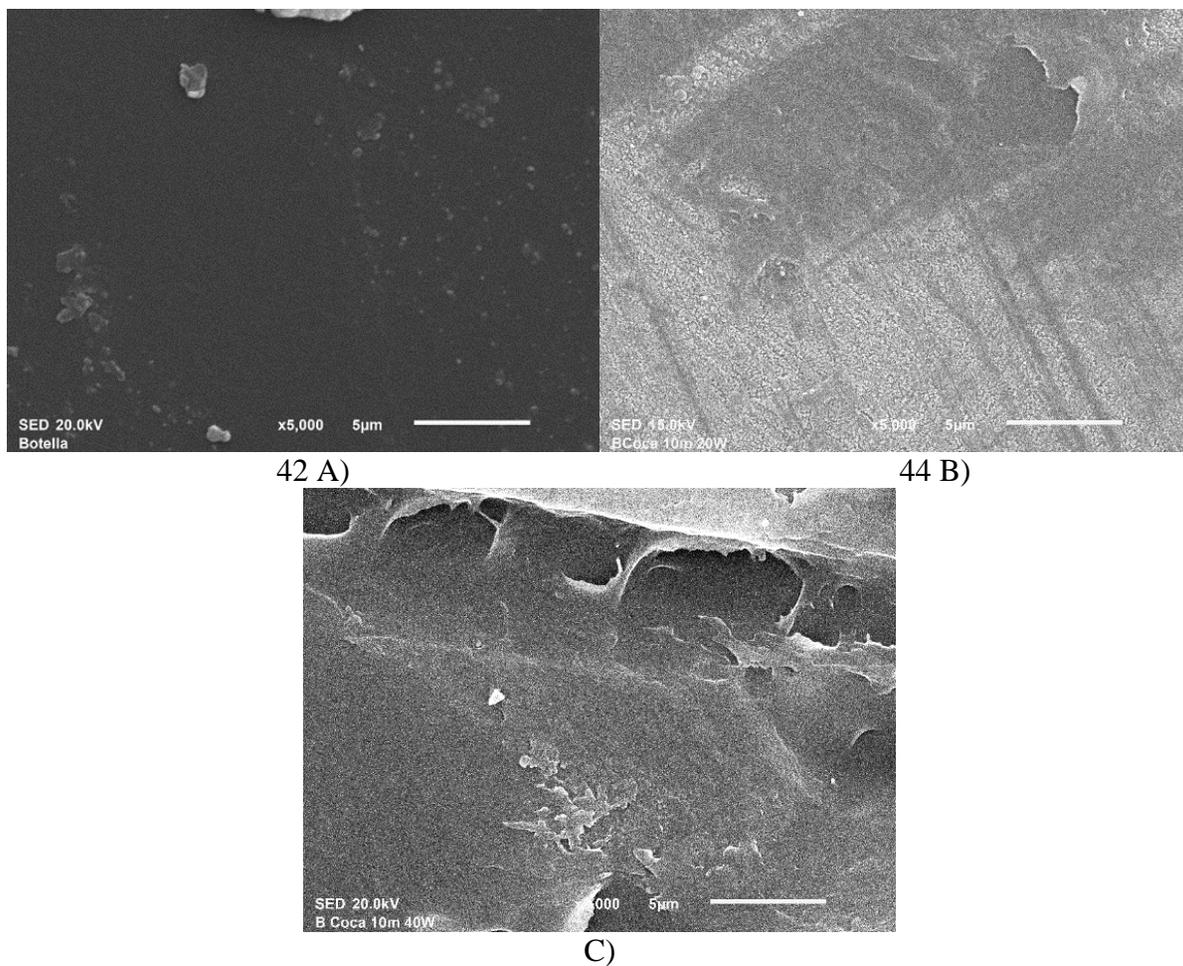
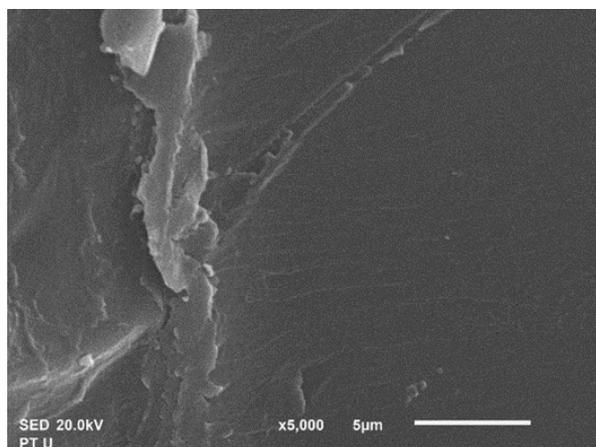


Ilustración 48 Micrografía de PET tratamiento 40 W (creación propia).

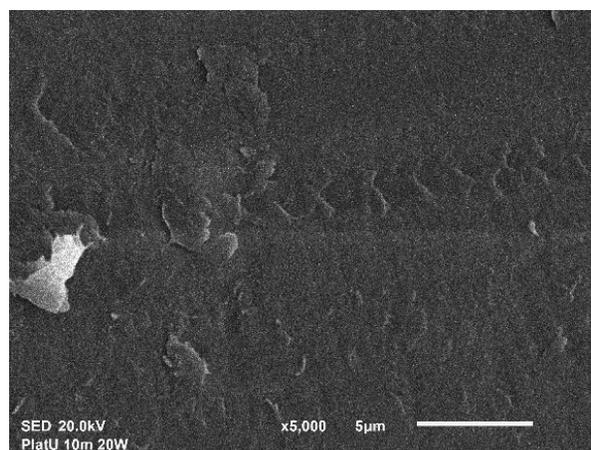
4.2.5.2 PS

En la ilustración 49 se puede observar la morfología de PS, 43 (A) antes del tratamiento, 46 (B) tratada a 20 W, 10 min y (C) después del tratamiento a 40 W se puede observar que la

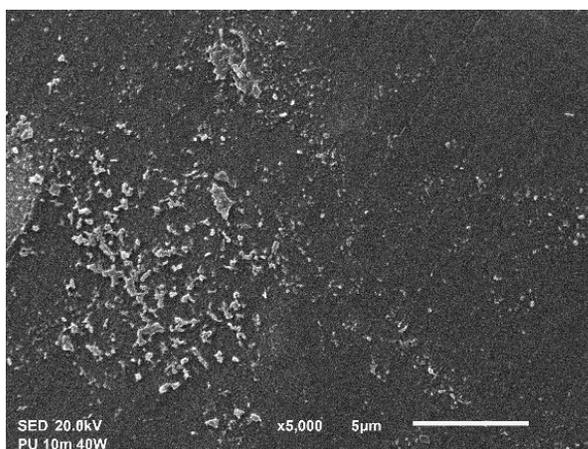
muestra tiene desprendimientos pequeños de la primera capa, también se ve la parte lisa con desgaste de la capa.



43 A)



46 B)



C)

Ilustración 49 Micrografía de PS tratamiento 40 W (creación propia).

4.2.5.3 LDPE

En la ilustración 50 se puede observar la morfología del LDPE, 43 (A) antes del tratamiento, 47 (B) tratada a 20 W, 10 min y (C) después del tratamiento a 40 W notoriamente se ve como en la parte central de la muestra bordes como si estuvieran a punto de desprenderse, pero ya en los costados la muestra cuenta con zonas de desprendimiento y grietas en la primera capa.

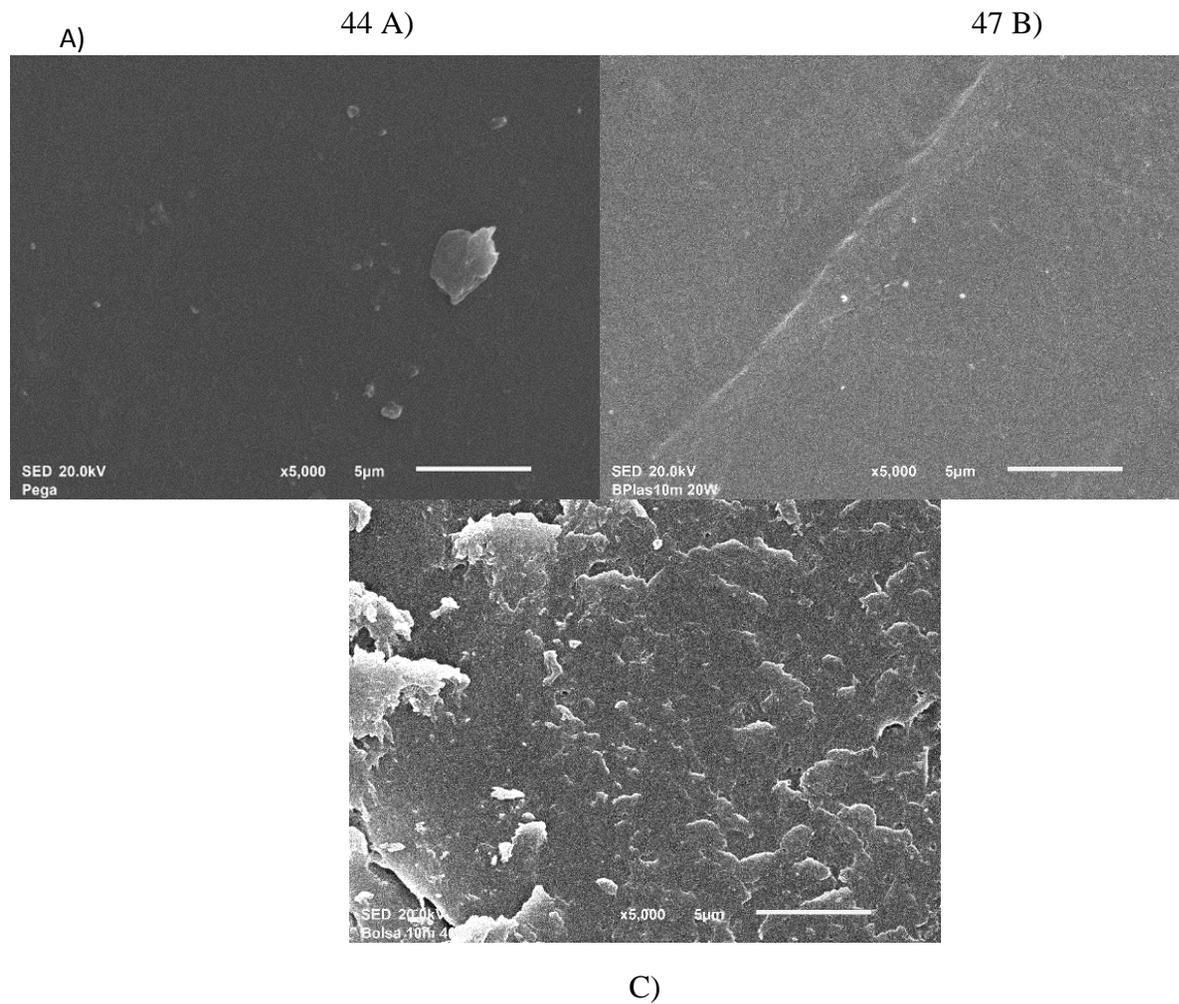


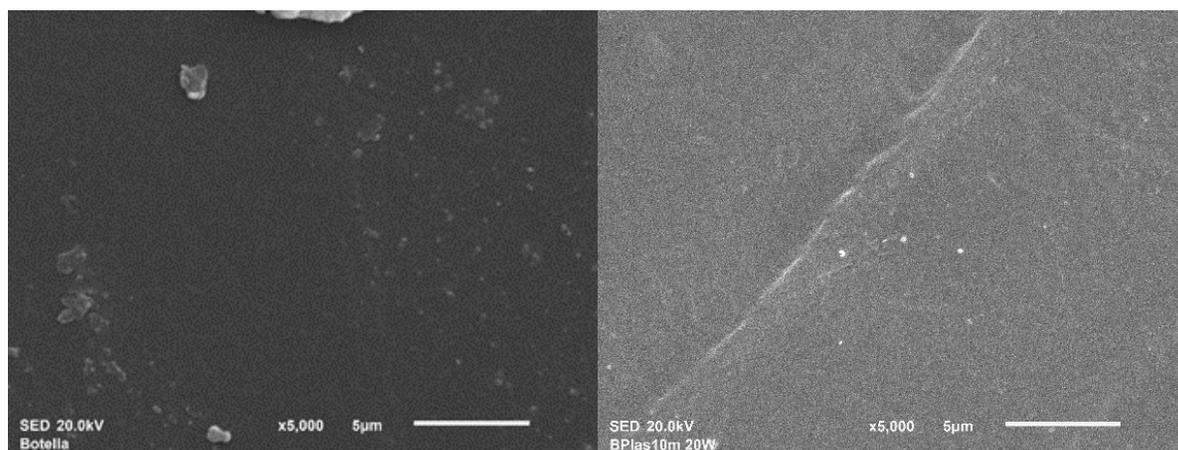
Ilustración 50 Micrografía de LDPE tratamiento 40 W (creación propia).

4.2.6 Tratamiento a 60 W, 10 min.

Se presentan el análisis morfológico realizado por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a 5000X aumentos, después del tratamiento por plasma de resplandor a 60 W durante 10 min.

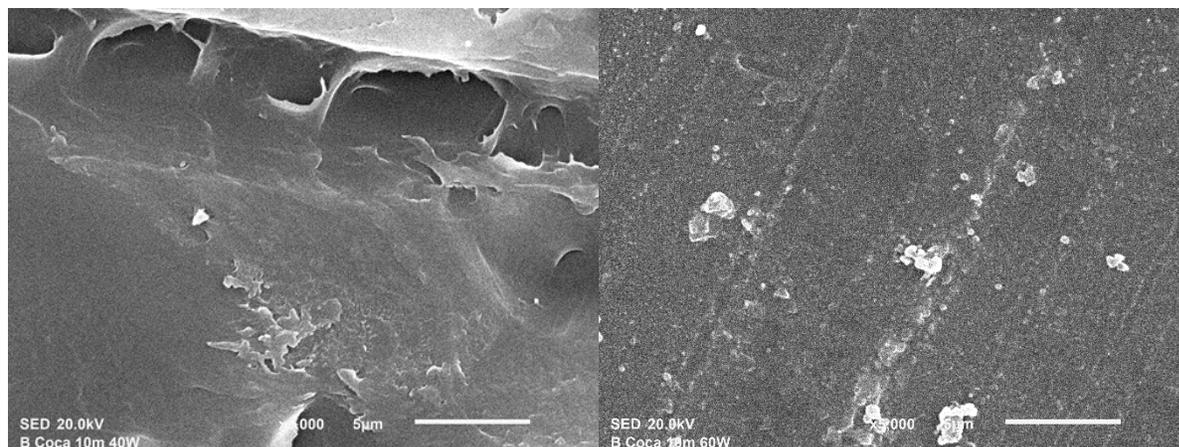
4.2.6.1 PET

En la ilustración 51 se puede observar la morfología de la PET, 42 (A) antes del tratamiento, 45 (B) tratada a 20 W, 48 (C) tratada a 40 W, y (D) después del tratamiento a 60 W, se formaron rayaduras y grietas en forma diagonal con desprendimientos de la capa y además se observa grietas en ella.



42 A)

45 B)



48 C)

49 D)

48 C) D)

Ilustración 51 Micrografía de PET tratamiento 60 W (creación propia).

4.2.6.2 PS

En la ilustración 52 se puede observar la morfología de PS, 43 (A) antes del tratamiento, 46 (B) tratada a 20 W, 49 (C) tratada a 40 W, y (D) después del tratamiento a 60 W todos durante 10 min, se observan en la muestra grietas junto con rayaduras en forma diagonal con desprendimientos de la primera capa junto con cuarteaduras.

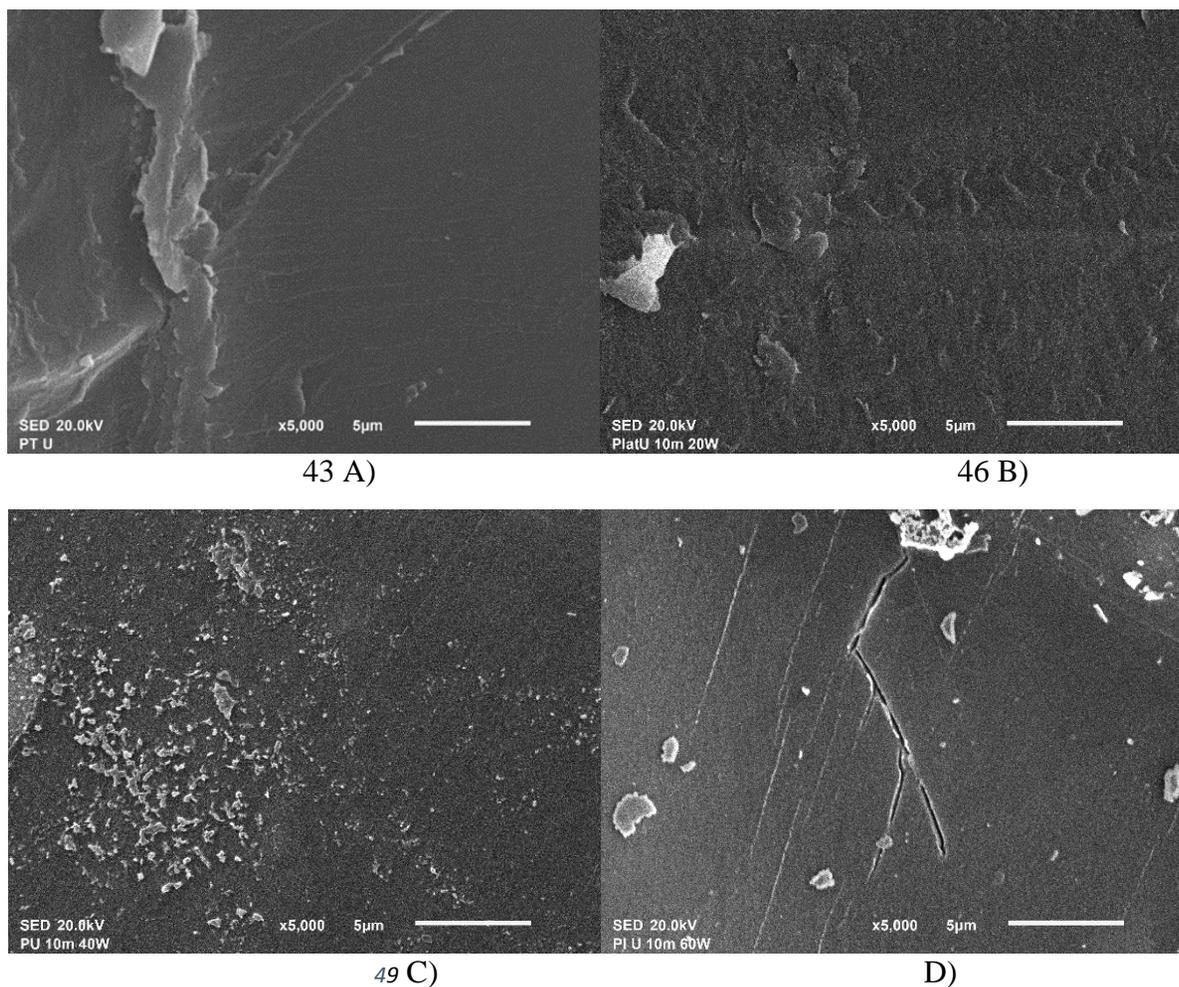


Ilustración 52 Micrografía de PS tratamiento 60 W (creación propia).

4.2.7 Estructura química

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.

En la ilustración 53 se muestra el espectro infrarrojo de PET, para la absorción centrada en 2967 cm^{-1} se tiene el grupo -C-H, en la absorción centrada en 2358 cm^{-1} se tiene el grupo =C=O, para los picos centrados en 1713 y 1407 cm^{-1} se encuentra el grupo funcional C=O, en 1338, 1243, 1096 y en 1016 cm^{-1} se encuentra el grupo C-O, en otra parte la absorción centrada 871 y en 723 cm^{-1} se tiene una estructura C-H. (Pereira, APDS, Silva, MHPD, Lima, ÉP, Paula, ADS y Tommasini, FJ (2017)).

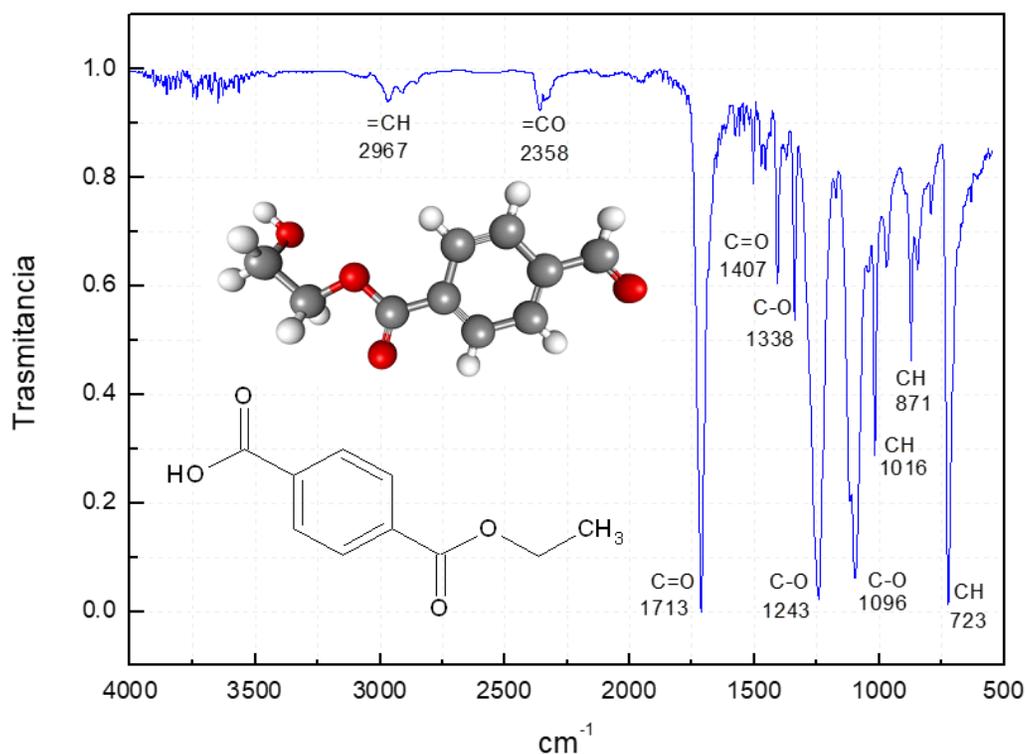


Ilustración 53 Espectro IR PET sin tratamiento (creación propia)

En la ilustración 54 se puede observar el espectro infrarrojo de LDPE antes del tratamiento, el primer pico centrado en 2914 cm^{-1} se tiene el grupo funcional -C-H, para la absorción centrada 2847 cm^{-1} se localizan los enlaces -C-H, 1462 cm^{-1} , correspondientes al grupo funcional de C-H. Por último, la absorción centrada en 717 cm^{-1} , es característica del grupos C-H. (Dai, K., Deng, Z., Liu, G., Wu, Y., Xu, W. y Hu, Y. (2020)).

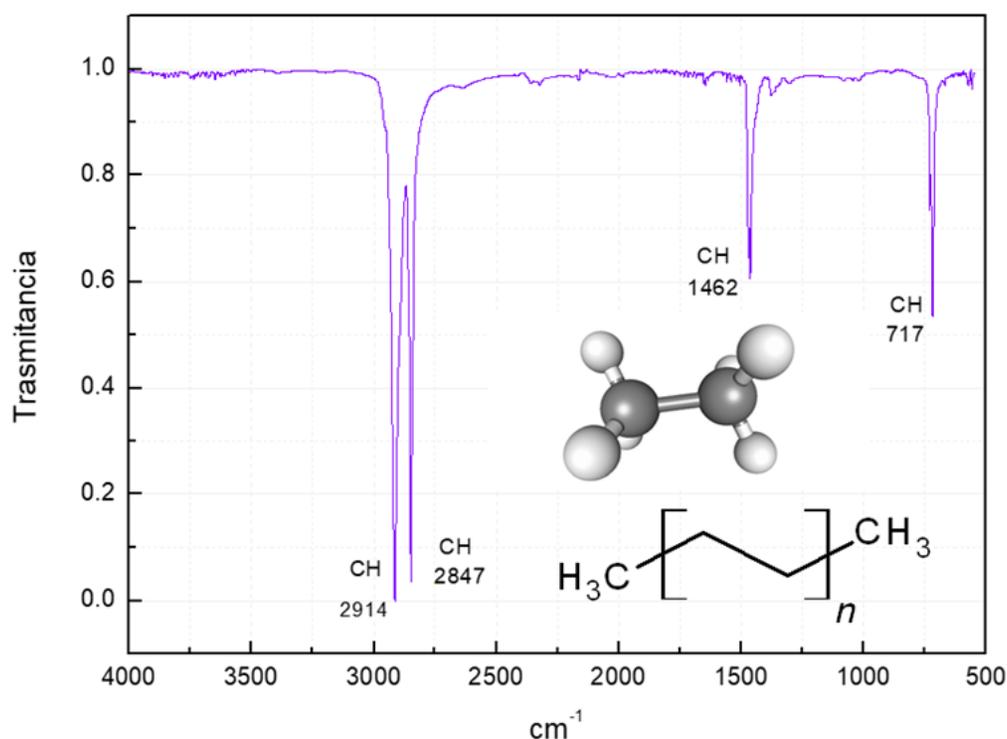


Ilustración 54 Espectro IR LDPE sin tratamiento (creación propia)

El espectro Infrarrojo del plato de PS se presenta en la ilustración 55, la primera absorción centrada en 3024 cm^{-1} se asigna los enlaces =C-H, para la el pico centrado en 2919 cm^{-1} se le asigna un grupo funcional -C-H, el pico con absorción central de 1600 cm^{-1} se encuentra el enlace C=C, para la absorción centrada en 1491 cm^{-1} se encuentra el grupo funcional =C-H, en la absorción 1451 cm^{-1} se tienen los enlaces C-H, para el pico centrado en 1026 cm^{-1} es característico de los grupos funcionales =C-H, para la absorción 753 cm^{-1} se

encuentran los enlaces C-H, para el pico de absorción centrado en 696 cm^{-1} , correspondiente a los grupos funcionales C-H. (Ge, Z., Sun, R., Zhang, K., Gao, Z. y Li, P. (2013)).

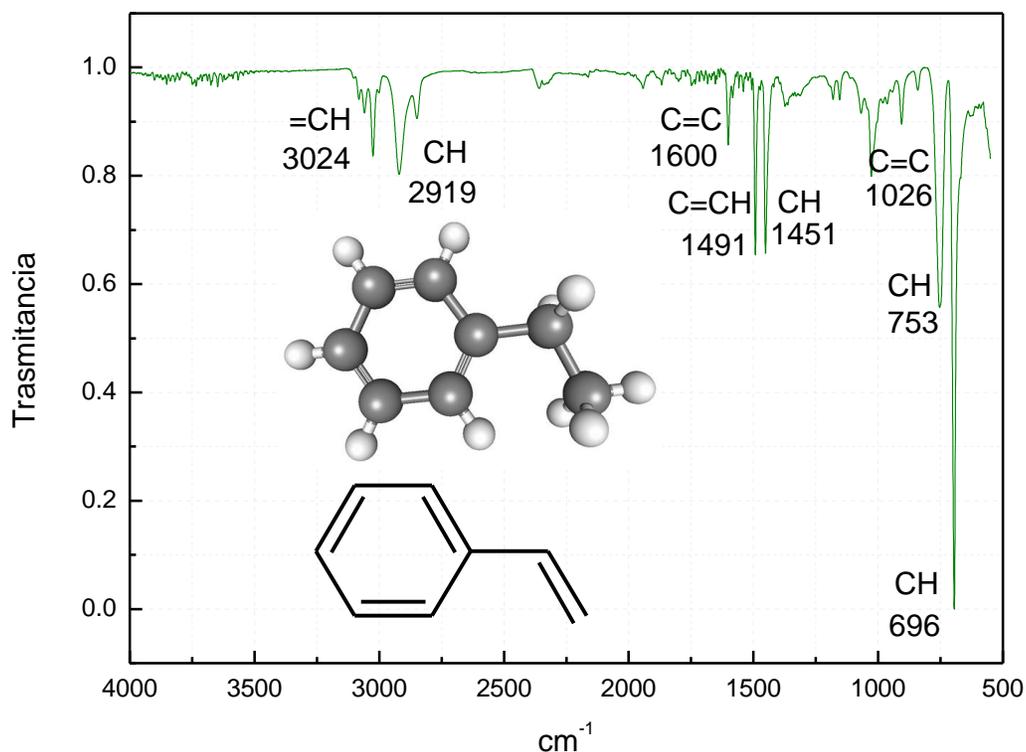


Ilustración 55 Espectro IR de PS sin tratamiento (creación propia).

En la ilustración 56 se puede observar la comparación de las muestras antes y después del tratamiento a 20 W, 40 W, y 60 W con un periodo de exposición de 10 min en cada potencia, comenzando de abajo hacia arriba, la primera línea es la muestra sin tratamiento, la segunda es la de 20 W, la tercera es de 40 W y la cuarta es la de 60 W. Se puede observar que los picos característicos de los principales grupos funcionales de la muestra se conservan, es decir el tratamiento no realizó modificaciones en la estructura del material.

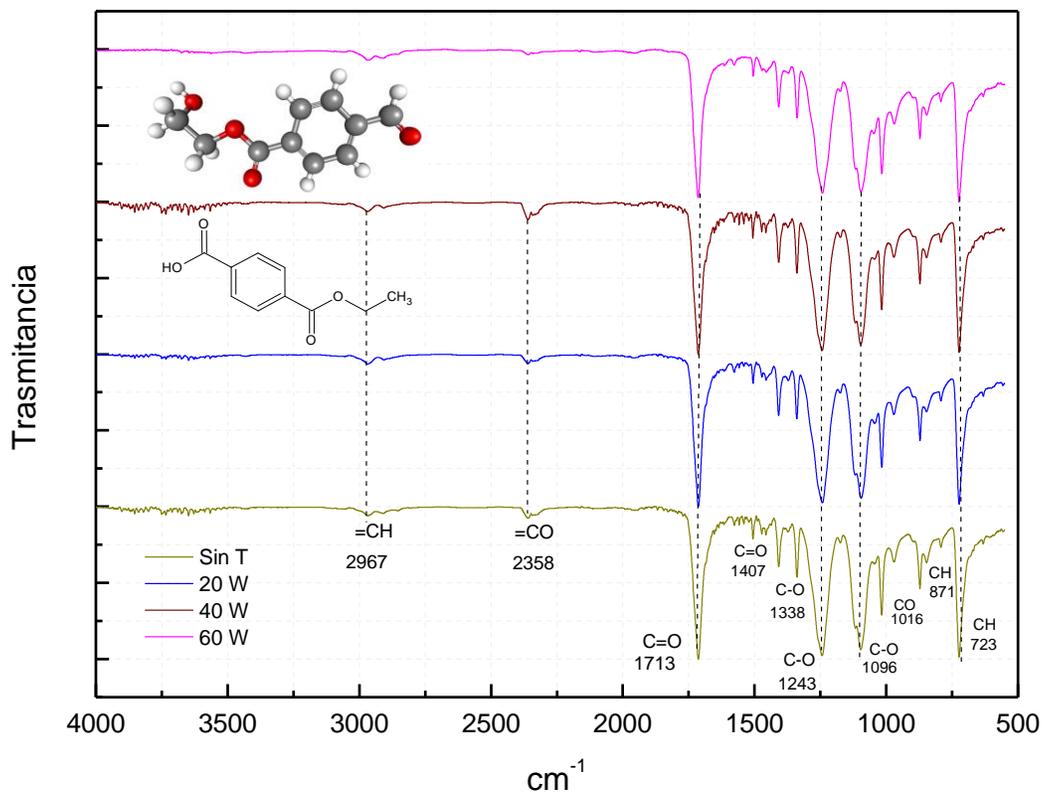


Ilustración 56 Espectro IR de PET sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).

En la ilustración 57 se puede observar la comparación de las muestras antes y después del tratamiento a 20 W, 40 W, y 60 W con tiempo de exposición de 10 min en cada potencia. El orden de abajo hacia arriba: sin tratamiento, 20 W, 40 W y la cuarta es la de 60 W. Se observa que las muestras no presentan cambios en los picos característicos, esto sugiere que el tratamiento no provoca cambios estructurales en las muestras sometidos a tratamiento por plasma.

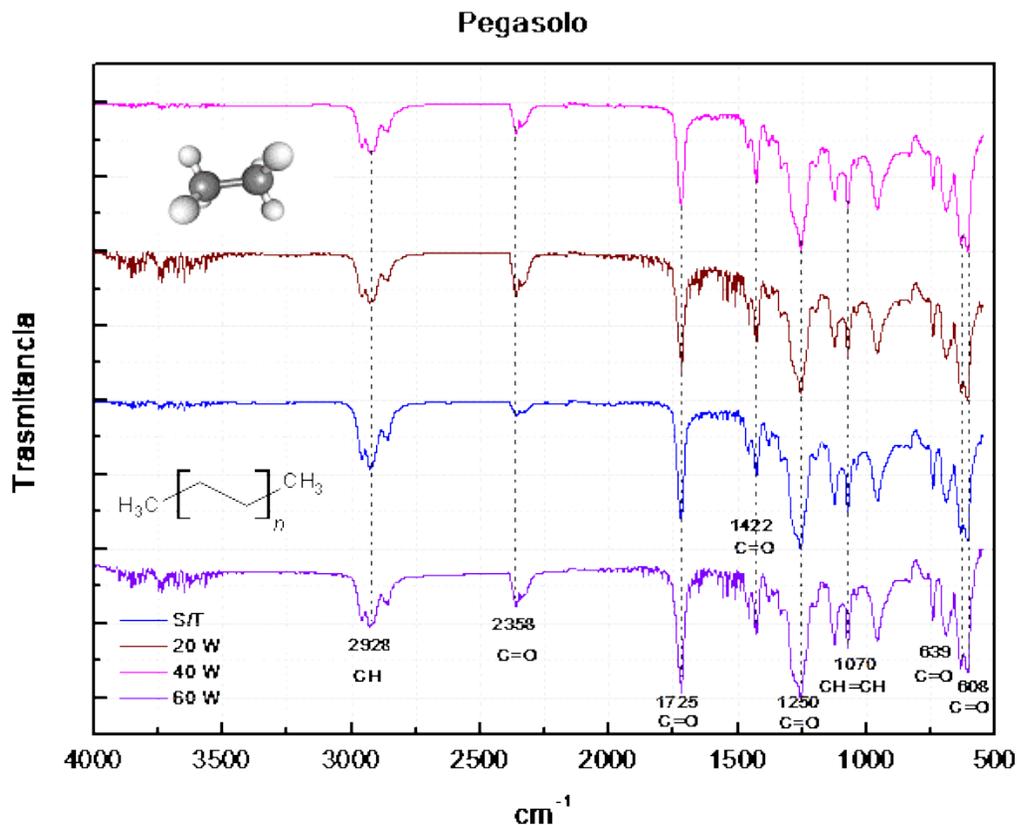


Ilustración 57 Espectro IR del LDPE sin tratamiento, tratamiento de 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).

En la ilustración 58 se puede observar la comparación de las muestras antes y después del tratamiento a 20 W, 40 W, y 60 W con un periodo de exposición de 10 min en cada potencia del PS. Listando de abajo hacia arriba: sin tratamiento, 20 W, 40 W y 60 W.

Como se observa en la ilustración antes y después del tratamiento los picos característicos se mantuvieron en todas las muestras, sin embargo, en el tratamiento a 40 W se presenta un nuevo pico centrado en 2360 cm^{-1} , correspondiente a $=\text{C}=\text{O}$, este pico es característico del tratamiento por plasma, consecuencia de la interacción del plasma con el aire dentro del reactor al iniciar y finalizar el tratamiento por plasma.

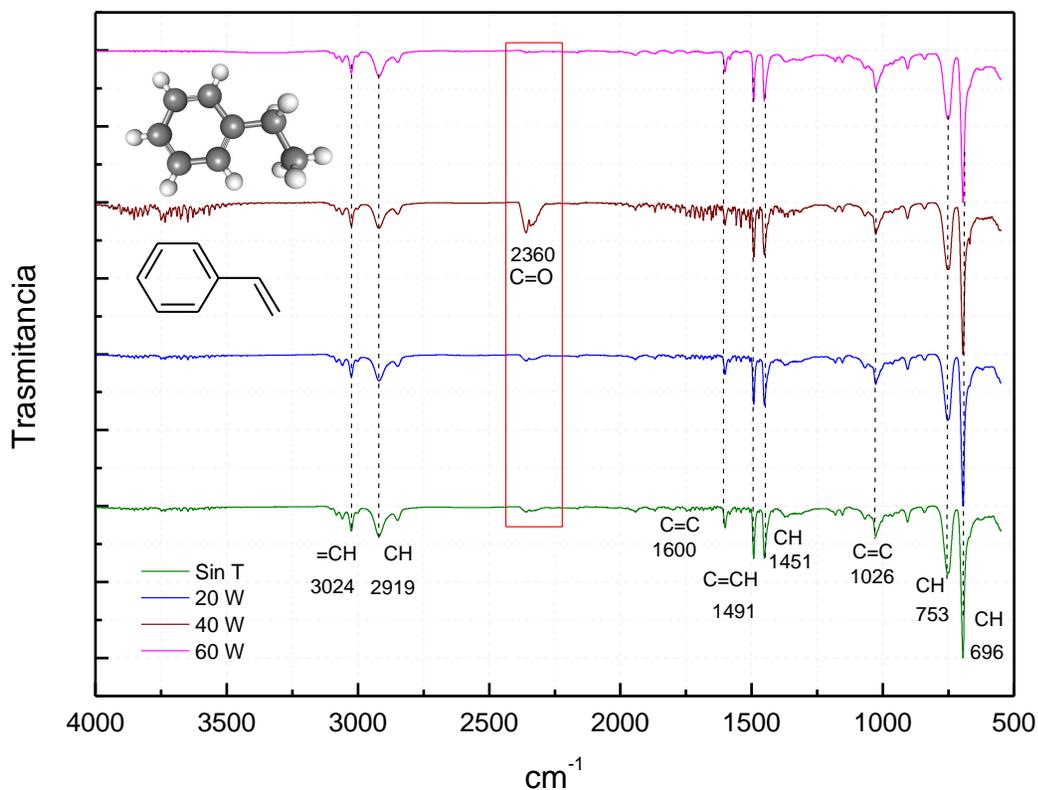


Ilustración 58 Espectro IR de PS antes y con tratamiento de 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).

4.3 Hidrofilicidad

El ángulo de contacto es función de la energía superficial y de la morfología de la superficie. La evolución del ángulo de contacto de las muestras antes y después del tratamiento se observa en las siguientes figuras, se analiza la evolución del ángulo de contacto estático de avance sobre los residuos seleccionados y caracterizados previamente, este análisis se hace en función del volumen de gota (2 a 30 μL) con incrementos de 2 μL (15 mediciones diferentes) usando agua destilada.

4.4 Ángulo de contacto de PET

Como se puede observar en la ilustración 59 se encuentra la gráfica de ángulo de contacto del PET, antes y después del tratamiento que se le dio mediante plasma. La línea azul pertenece

al ángulo de contacto sin tratamiento de dicho material (PET), su ángulo de contacto oscila entre 61° y 64° . La línea verde representa al tratamiento de 20 W expuesta por 10 min bajo el tratamiento de plasma, el ángulo de contacto obtenido se encuentra en el intervalo de 58° - 55° . La línea rosa representa al tratamiento de 40 W el ángulo de contacto obtenido está entre 57° y 53° . La línea naranja representa al tratamiento de 60 W el ángulo de contacto obtenido fue se encuentra entre 54° y 51° .

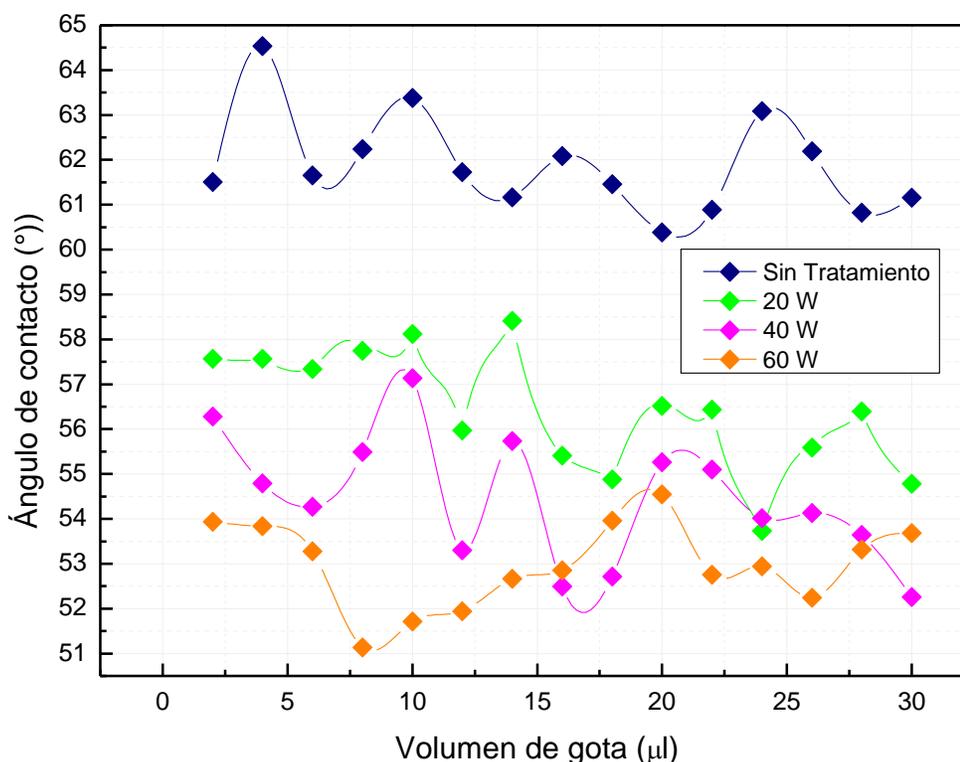


Ilustración 59 Ángulo de contacto de PET sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).

4.5 Ángulo de contacto LDPE

Como se puede observar en la ilustración 60 se encuentra la gráfica de ángulo de contacto del LDPE, antes y después del tratamiento por plasma. La línea azul pertenece al ángulo sin tratamiento, oscila entre 62° y 58° . Los tratamientos correspondientes a 20, 40 y 60 W presentan ángulos similares que oscilan entre 55° y 50° .

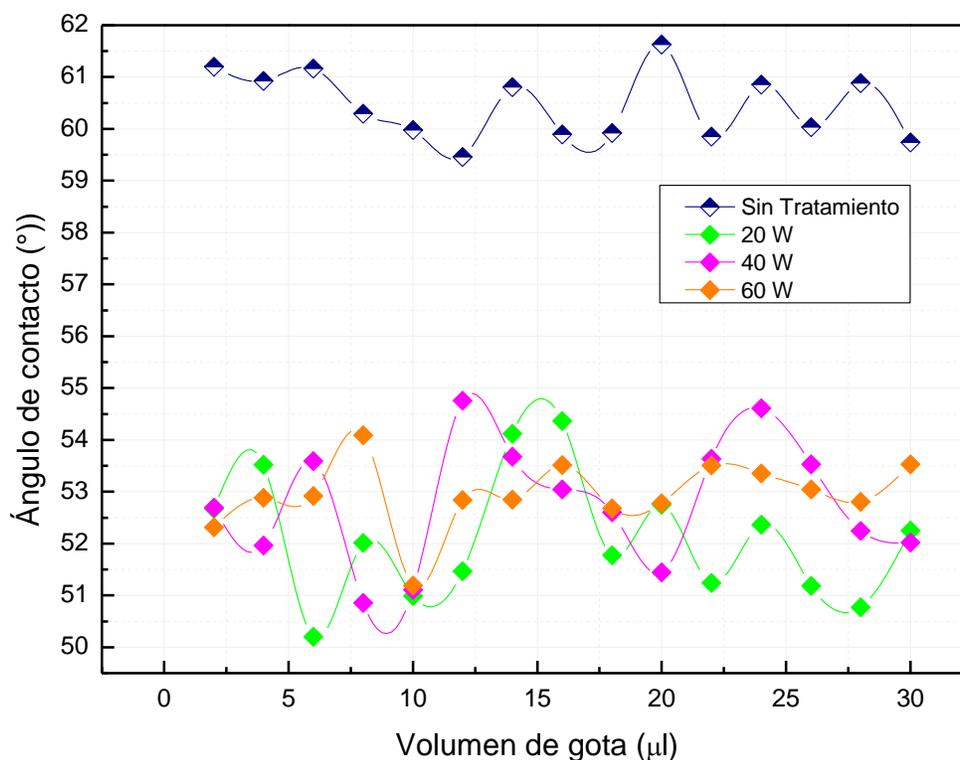


Ilustración 60 Ángulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).

4.6 Ángulo de contacto de PS

Como se puede observar en la ilustración 61 se encuentra la gráfica de ángulo de contacto del PS antes y después del tratamiento mediante plasma. El ángulo de contacto de la muestra sin tratamiento varía de 62° a 65°, para la muestra tratada con 20 W se observa que ángulo disminuye a valores entre 58° y 61°. Con el tratamiento de 40 W, el ángulo nuevamente disminuye a valores entre 56° a 54° y por último a 60 W el ángulo queda entre el intervalo de 51° y 53°

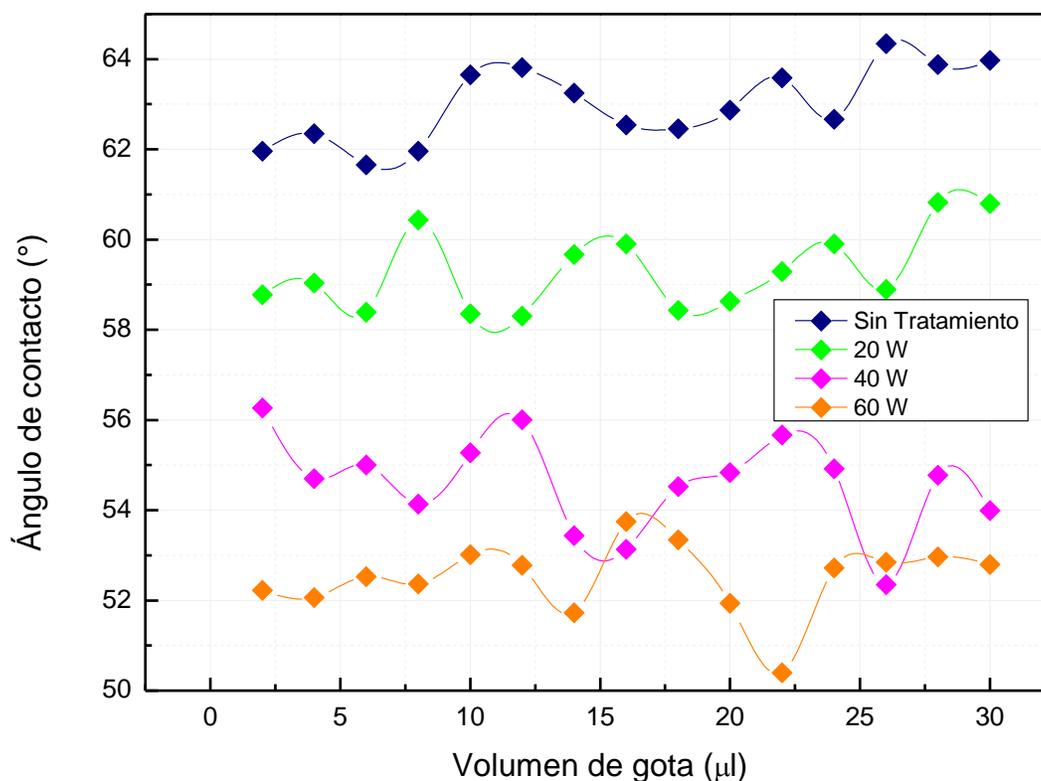


Ilustración 61 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento a 20 W, 40 W y 60 W (creación propia).

De acuerdo con las gráficas anteriores, se observa que a mayor potencia del tratamiento disminuye el ángulo de contacto. Se identificaron varios factores que influyen en los ángulos, como fuerzas de adhesión del material que se estaba analizando y la exposición de plasma que se le dio a cada material, ya que esto dio como resultado un ángulo más pequeño a como se inició la toma de ángulos.

4.7 Tratamiento UV

Posteriormente al tratamiento de plasma se le dio también un tratamiento de rayos UV con una lámpara portátil con carcasa plástica que se complementa con fuentes de luz UV de 2 longitudes de onda diferentes (254 nm y 365 nm) (observar ilustración 62).



Ilustración 62 Lámpara UVL-312 (creación propia).

Se expusieron las muestras de PET, PS y LDPE correspondientes a 20, 40 y 60 W del tratamiento de plasma a esta luz UV a un tiempo de 1 hora, las muestras se colocaron en una caja Petri. Cada muestra se colocó por debajo de la lámpara a una distancia de 5 cm por un lapso de 1 hora observar ilustración 63. Una vez terminado el tratamiento UV, se evaluó la morfología por microscopía óptica y la hidrofiliidad por medio de ángulo de contacto (observar ilustración 64).



Ilustración 63 Colocación de muestras en Petri por debajo de lámpara (creación propia).



Ilustración 64 Angulo de contacto después del tratamiento UV (creación propia)

4.8 Morfología

Microscopía Óptica después del tratamiento por luz UV durante 1 hora

En las siguientes ilustraciones se muestra la morfología obtenida por medio de Microscopía óptica, después de aplicarle un tratamiento de luz UV durante 1 hora, con 2 longitudes de onda diferentes (254 nm y 365 nm), cada muestra se colocó por debajo de la lampara a una distancia de 5 cm.

En la ilustración 65 correspondiente al PET con tratamiento de plasma a 20 W y con exposición a luz UV se pudo observar mediante el microscopio óptico que la superficie es lisa y con rayaduras, se pueden observar puntos blancos en la muestra como si fueran impurezas del material.

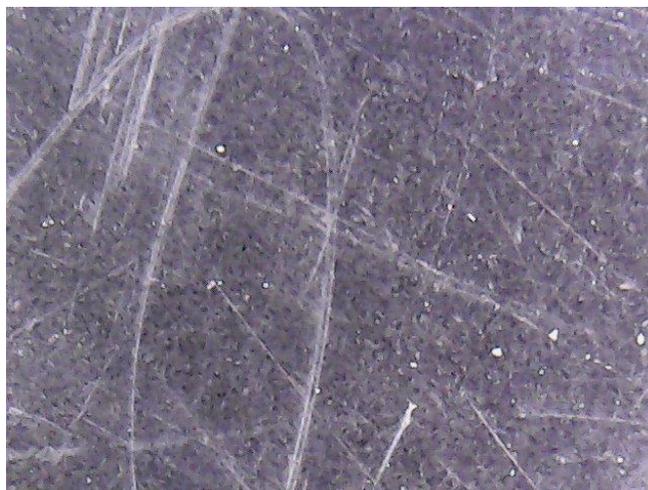


Ilustración 65 Micrografía de PET con tratamiento de plasma a 20 W con tratamiento de luz UV (creación propia)

En la ilustración 66 correspondiente al PET con tratamiento de plasma a 40 W y con exposición a luz UV se puede observar mediante el microscopio óptico que la superficie ya no se encuentra lisa sino que presenta pequeñas porosidades en toda la muestra.



Ilustración 66 Micrografía de PET con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia)

En la ilustración 67 correspondiente al PET con tratamiento de plasma a 60 W y con exposición a luz UV se puede observar que la superficie ya presenta porosidad en la muestra y las rayaduras ya son más marcadas, aun se muestran los puntos blancos.



Ilustración 67 Micrografía de PET con tratamiento de plasma a 60 W con tratamiento de luz UV (creación propia).

En la ilustración 68 correspondiente al pegasolo (LDPE) con tratamiento de plasma a 20 W y con exposición a luz UV se observa superficie lisa, pero con protuberancias de material como si se estuviera erosionando.

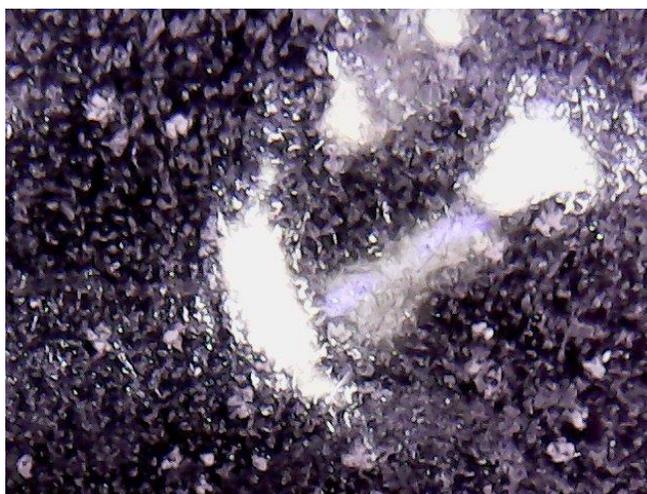


Ilustración 68 Micrografía de LDPE con tratamiento de plasma a 20 W con tratamiento de luz UV (creación propia).

En la ilustración 69 correspondiente al pegasolo (LDPE) con tratamiento de plasma a 40 W y con exposición a luz UV se pueden observar huecos en la muestra, se nota arrugada la superficie.



Ilustración 69 Micrografía de LDPE con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia)

En la ilustración 70 correspondiente al LDPE con tratamiento de plasma a 60 W y con exposición a luz UV se pueden observar poros en la superficie con observa pequeñas burbujas y desprendimiento parcial de una capa de LDPE.

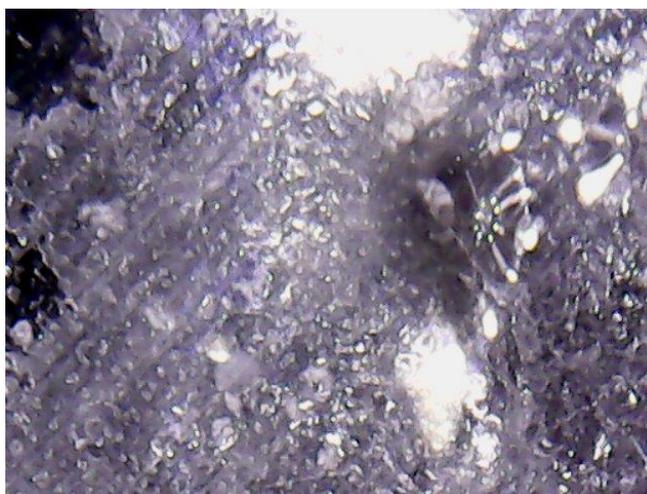


Ilustración 70 Micrografía de LDPE con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia).

En la ilustración 71 correspondiente al PS con tratamiento de plasma a 20 W y con exposición a luz UV por una hora cuenta con una superficie irregular que simula burbujas unidas, pero las aberturas de las burbujas ya no son muy pronunciadas, más bien se puede interpretar como bordes de material en la superficie con arrugas.

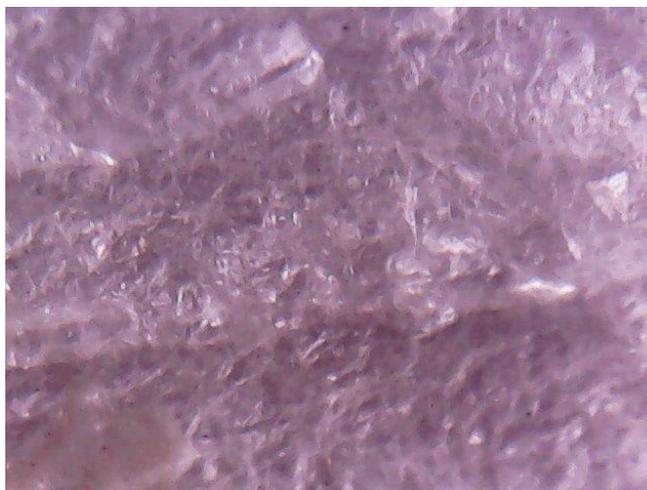


Ilustración 71 Micrografía del PS con tratamiento de plasma a 20 W con tratamiento de luz UV (creación propia).

En la ilustración 72 correspondiente al PS con tratamiento de plasma a 40 W y con exposición a luz UV, se pueden observar burbujas colapsadas y poros en la superficie.

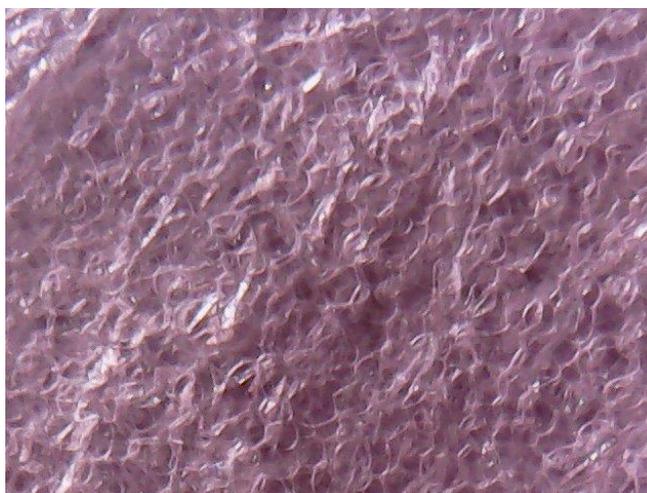


Ilustración 72 Micrografía del PS con tratamiento de plasma a 40 W con tratamiento de luz UV (creación propia).

En la ilustración 73 correspondiente al PS con tratamiento de plasma a 60 W y con exposición a luz UV se puede observar que la superficie aun presenta burbujas un poco más delgadas.

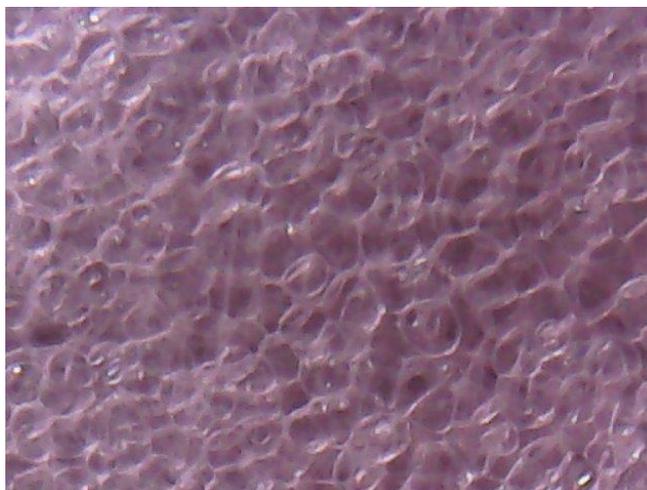


Ilustración 73 Micrografía del PS con tratamiento de plasma a 60 W con tratamiento de luz UV (creación propia).

4.9 Ángulo de contacto

La evolución del ángulo de contacto de las muestras antes y después del tratamiento se observa en las siguientes ilustraciones.



Ilustración 74 Ángulo de contacto a 20 W por 10 min. después del tratamiento UV PS.



Ilustración 75 Ángulo de contacto a 40 W por 10 min. Después del tratamiento UV LDPE.



Ilustración 76 Ángulo de contacto a 40 W por 10 min. después del tratamiento UV PET.

Se analizó la evolución del ángulo de contacto estático de avance sobre los residuos seleccionados y caracterizados previamente, este análisis se hace en función del volumen de gota (2 a 30 μL) con incrementos de 2 μL (15 mediciones diferentes) usando agua destilada.

4.10 Ángulo de contacto PET

Como se puede observar en la siguiente ilustración 77 se encuentra la gráfica de ángulo de contacto de PET con un tratamiento de plasma a una exposición de 20, 40 y 60 W por 10 min, después de ello se le realizó un tratamiento por lámpara UV por 1 hora.

La línea naranja pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con un rango de 68° a 71° . La línea violeta pertenece a la muestra posterior al tratamiento UV con tratamiento de plasma a 20 W, presenta valores en el rango de 60.7° a 63.4° , con una reducción de 8° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea azul pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 40 W, los valores del ángulo se encuentran en el intervalo de 62° a 63.6° . La línea negra pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 60 W, presenta ángulos en el intervalo de 59.2° a 61.2° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de 3° .

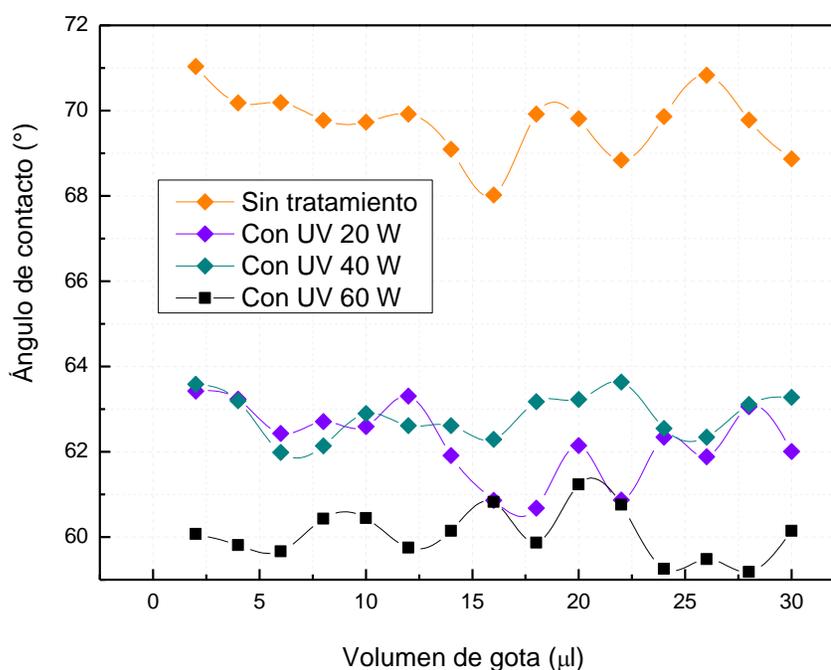


Ilustración 77 Ángulo de contacto PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W, 40 W y 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.11 Ángulo de contacto de LDPE

La ilustración 78 presenta la gráfica de ángulo de contacto del LDPE, con tratamiento de plasma a 20, 40 y 60 W por 10 min, después de ello se le realizó un tratamiento por lámpara UV por 1 hora. La línea rosa pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, de 69.4° a 70.9° . La

línea violeta pertenece al ángulo de contacto después del tratamiento UV con tratamiento de plasma a 20 W, con ángulos de 61.6° a 64.9°, con reducción de 8° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea azul pertenece al ángulo de contacto con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 40 W, de 61.5° a 62.9°. La línea negra pertenece al ángulo de contacto con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 60 W, de 60.1° a 61.7°, con este tratamiento se obtuvo una reducción de 1°.

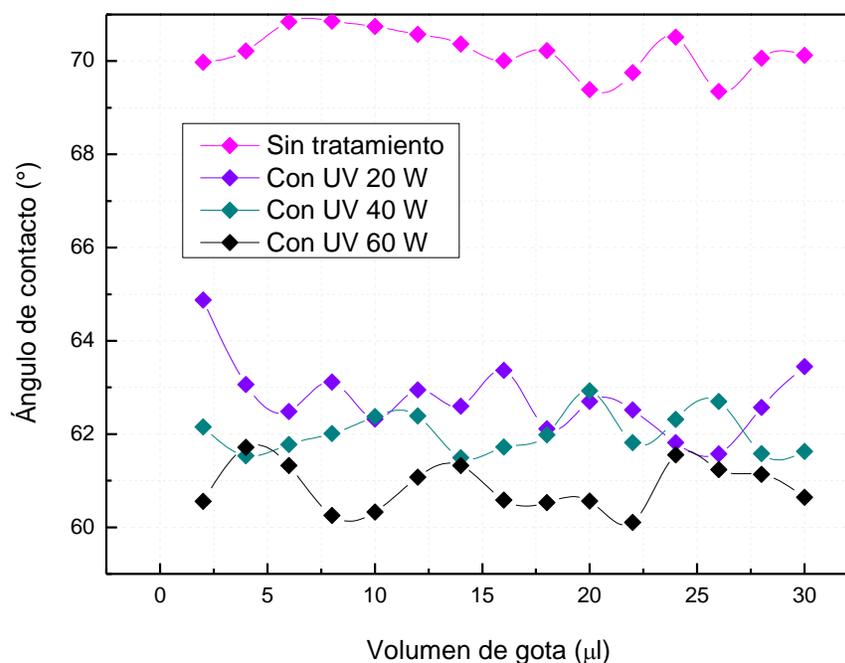


Ilustración 78 Ángulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W, 40 W y 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.12 Ángulo de contacto de PS

En la ilustración 79 se encuentra la gráfica de ángulo de contacto del PS con tratamiento de plasma a 20, 40 y 60 W por 10 min, después de ello se le realizó un tratamiento por lámpara UV por 1 hora.

La línea café pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, de 73.0° a 74.6°. La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 20 W,

de 62.1° a 63.9° , con reducción de 11° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea azul pertenece al ángulo de contacto con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 40 W, de 61.1° a 62.7° , con reducción de 1° . La línea negra pertenece a la muestra con tratamiento UV con tratamiento de plasma a 60 W, de 59.1° a 60.6° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de 2° .

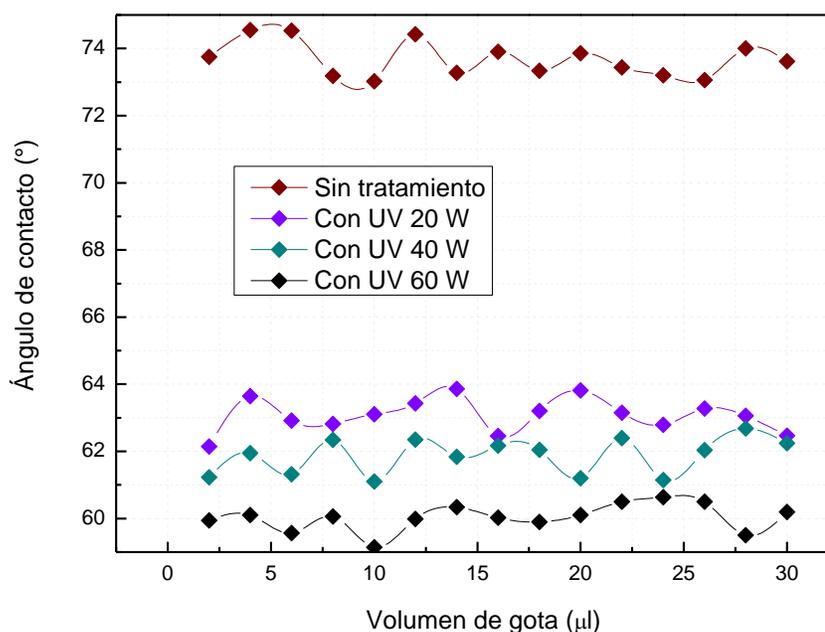


Ilustración 79 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W, 40 W y 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.13 Comparación de ángulo de contacto después del tratamiento UV

Como se puede observar en las siguientes ilustraciones se encuentran las gráficas de ángulo de contacto con y sin tratamiento de plasma a 20, 40 y 60 W durante 10 min y la exposición con luz UV por 1 hora.

4.14 Ángulo de contacto PET, sin tratamiento, 20 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 80 se pueden observar las comparaciones de los tratamientos que se realizaron sobre las muestras. La línea naranja pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con un rango de 68° a 71° . La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 20 W, con valores de 63.8° a 67.8° , con una reducción de 5° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea negra pertenece a la muestra con irradiación UV tratamiento de plasma a 20 W. Los resultados se encuentran en el intervalo de 60.7° a 63.4° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de 3° .

Comparando estos dos tratamientos, se obtuvo reducción de ángulo de contacto de 5° con solo el tratamiento de plasma, si se le añade el tratamiento de luz UV se reduce 8° , todo esto con base al ángulo de contacto “sin tratamiento”.

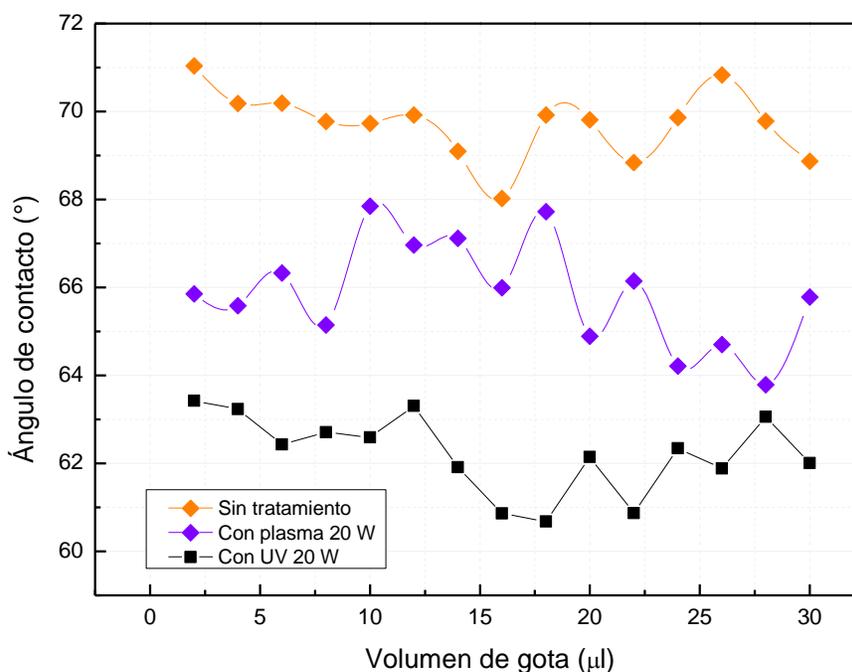


Ilustración 80 Ángulo de contacto PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.15 Ángulo de contacto de LDPE, sin tratamiento, 20 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 81 se puede observar las comparaciones de los tratamientos que se realizaron en la muestra de LDPE. Como se observa la línea rosa pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con valores de 69.4° a 70.9° . La línea violeta pertenece a los resultados de ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 20 W, de 63.0° a 65.6° , con reducción de 6° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea negra pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV y tratamiento de plasma a 20 W, los valores encontrados están en un rango de 61.6° a 64.9° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de aproximadamente 2° .

Al comparar estos dos tratamientos, se observa que se obtiene una reducción de ángulo de contacto ya que se reduce 6° con solo el tratamiento de plasma, si se le añade el tratamiento de luz UV se reduce hasta 8° , todo esto con base al ángulo de contacto de la muestra “sin tratamiento”.

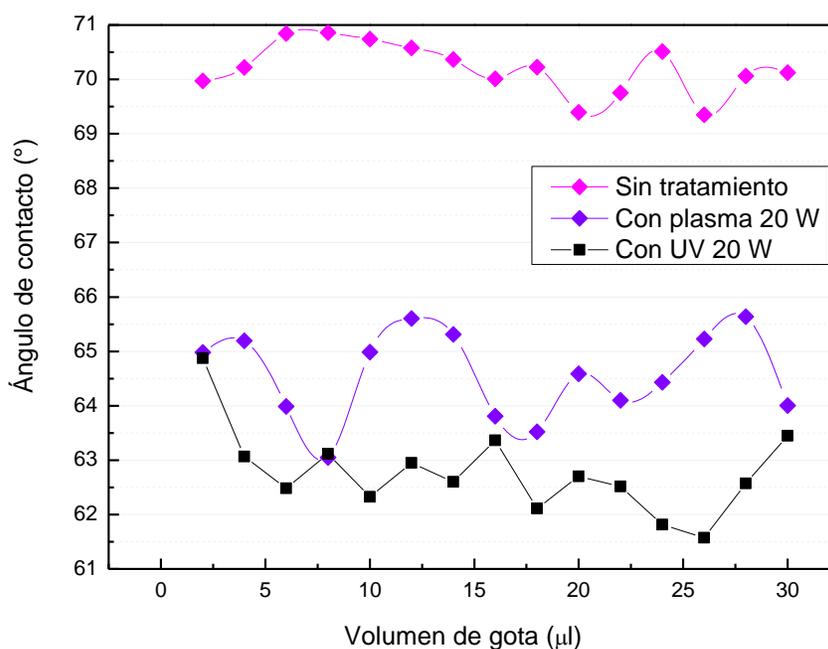


Ilustración 81 Ángulo de contacto de PE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.16 Ángulo de contacto de PS, sin tratamiento, 20 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 82 se presentan las comparaciones de los tratamientos que se realizaron. La línea café pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con ángulos de 73.0° a 74.6° . La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 20 W, tiene valores de 69.2° a 72.2° , con reducción de 4° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea negra pertenece a la muestra con irradiación UV y tratamiento de plasma a 20 W, presenta ángulos de 62.1° a 63.9° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de 7° .

Si se comparan los resultados de ambos tratamientos, se puede decir que se obtiene una reducción de 4° con el tratamiento de plasma, además si se le añade el tratamiento de luz UV se reduce alrededor de 11° , todo esto con base al ángulo de contacto de la muestra “sin tratamiento”.

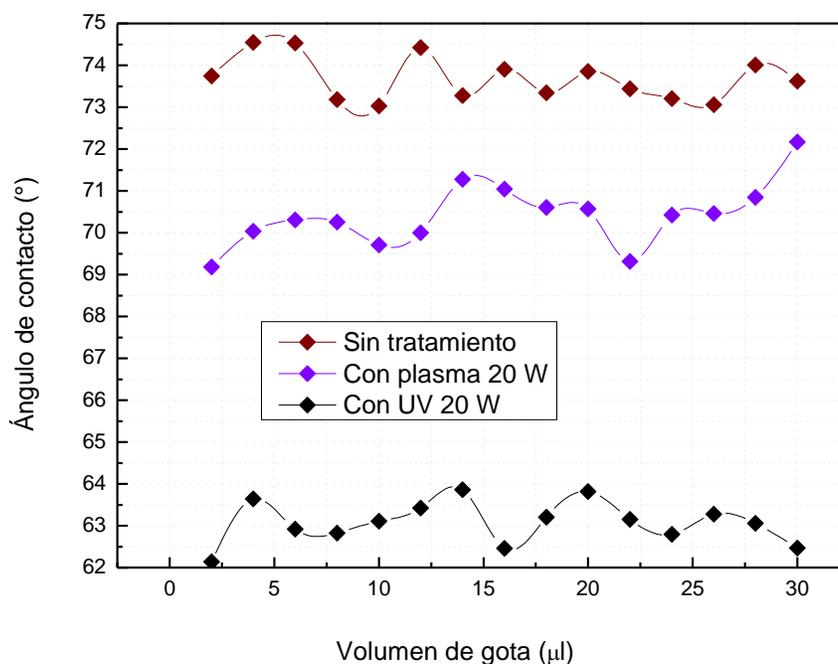


Ilustración 82 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 20 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.17 Ángulo de contacto PET, sin tratamiento, 40 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 83 se puede observar las comparaciones de los tratamientos que se realizaron. La línea naranja pertenece al ángulo de contacto de la muestra sin tratamiento, con un rango de 68° a 71° . La línea violeta pertenece a la muestra con tratamiento de plasma a 40 W, con ángulos de 64.4° a 67.0° , presentó una reducción de 4° . La línea negra pertenece al ángulo de contacto resultante del tratamiento UV y tratamiento de plasma a 40 W, con ángulos de 62.0° a 63.6° , para este tratamiento se obtuvo una reducción de 2° . Ahora si se comparan estos dos tratamientos, se obtiene una reducción de ángulo de contacto de 4° con el tratamiento de plasma, y si se le añade el tratamiento UV se reduce 6° .

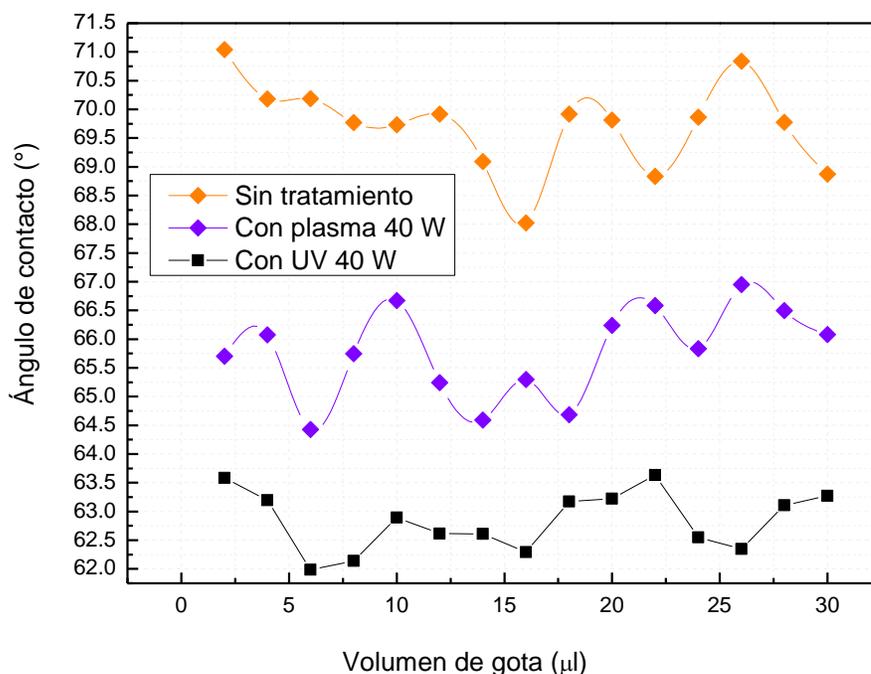


Ilustración 83 Ángulo de contacto de PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 40 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.18 Ángulo de contacto de LDPE, sin tratamiento, 40 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 84 se presentan las comparaciones de los tratamientos que realizados. La línea rosa pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con ángulos de 69.4° a 70.9° . La línea

violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 40 W, de 62.6° a 66.4° , presenta una reducción de 7° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea negra pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV y con tratamiento de plasma a 40 W, el ángulo de contacto se encuentra entre 61.5° y 62.9° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de 1° . Al comparar ambos tratamientos, se obtiene una reducción de 7° con el tratamiento de plasma, si se le añade el tratamiento UV se alcanza una reducción 8° , todo esto con base al ángulo de contacto “sin tratamiento”.

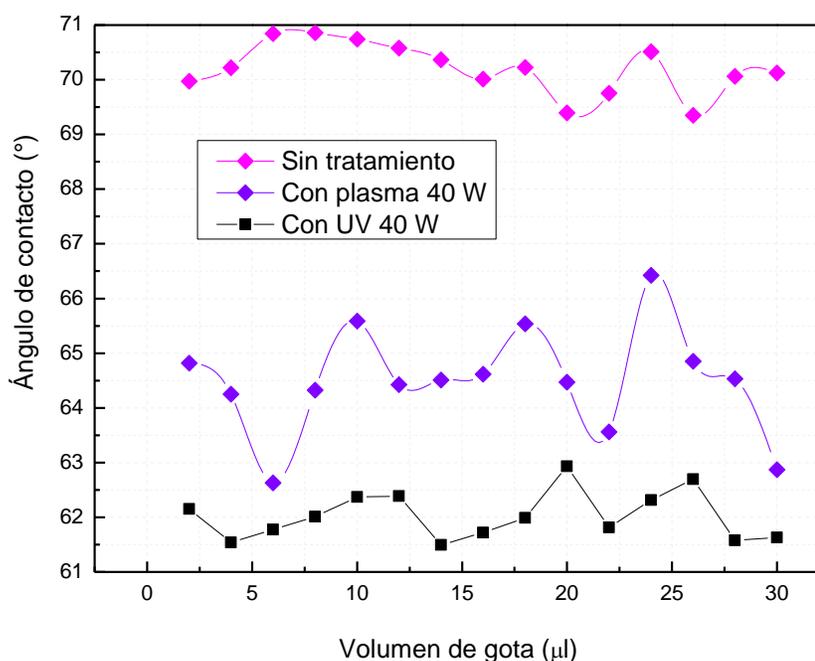


Ilustración 84 Ángulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 40 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.19 Ángulo de contacto de PS, sin tratamiento, 40 W con plasma y tratamiento UV.

En la ilustración 85 se pueden observar las comparaciones de los tratamientos realizados. La línea de color café pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, de 73.0° a 74.6° . La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 40 W, presenta valores en el intervalo de 63.7° a 68.2° , esto indica reducción de 10° en comparación al que no tenía

tratamiento. La línea negra pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV y con tratamiento de plasma a 40 W, tiene valores de 61.1° a 62.7°, con reducción de 2°. Al comparar estos dos tratamientos, se obtiene una reducción de ángulo de contacto de 10° con el tratamiento de plasma, si se le añade el tratamiento de UV se reduce hasta 12°, con base al ángulo de contacto “sin tratamiento”.

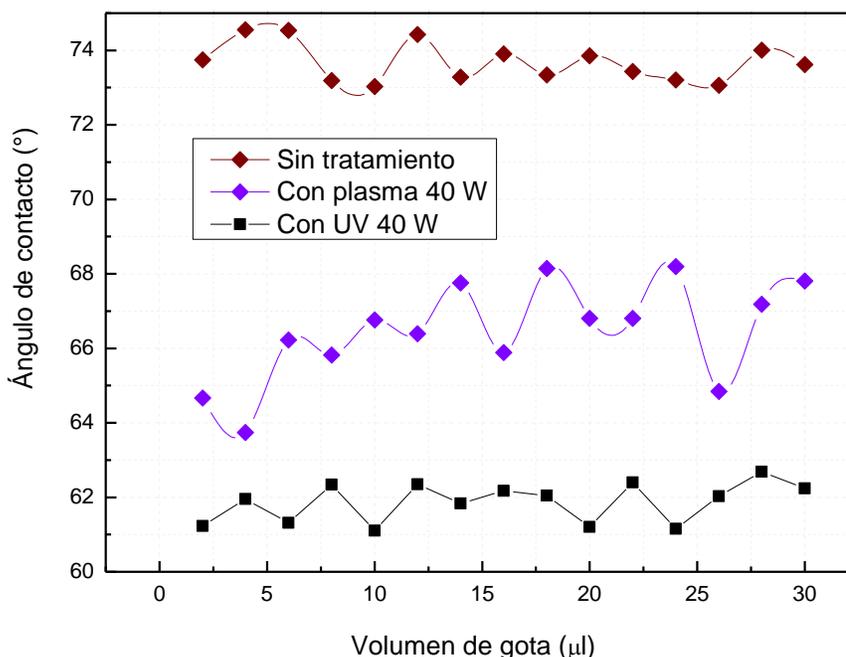


Ilustración 85 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 40 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.20 Ángulo de contacto PET, sin tratamiento, 60 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 86 se puede observar las comparaciones de los tratamientos de plasma 60 W y posterior irradiación UV. La línea naranja pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con un rango de 68° a 71°. La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 60 W, presenta valores de 63.9° a 68.2°, con una reducción de 5° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea negra pertenece al ángulo de contacto con tratamiento UV y con tratamiento de plasma a 60 W, presenta valores entre 59.2° y 61.2°, con

este tratamiento se obtuvo una reducción de 4° . Al evaluar ambos tratamientos, se obtiene una reducción de ángulo de contacto 5° con el tratamiento de plasma, si se le añade el tratamiento de UV se reduce 9° .

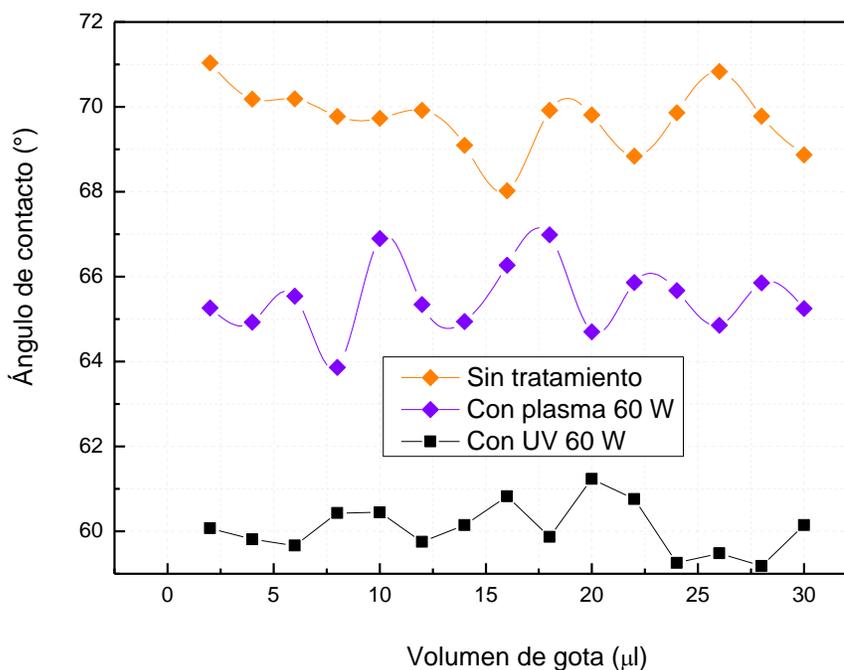


Ilustración 86 Ángulo de contacto de PET sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.21 Ángulo de contacto de LDPE, sin tratamiento, 60 W con plasma y tratamiento UV

En la ilustración 87 se pueden observar las comparaciones de ángulos de contacto de los tratamientos realizados. La línea rosa pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, con valores de 69.4° a 70.9° . La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 60 W, de 63.3° a 68.7° , con una reducción de 6° en comparación al que no tenía tratamiento. La línea negra pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV y con tratamiento de plasma a 60 W, de 60.1° a 61.7° , con este tratamiento se obtuvo una reducción de 3° . Comparando ambos tratamientos, se puede decir que, se obtiene una reducción

de ángulo de 6° con el tratamiento de plasma, si se le añade el tratamiento UV se reduce hasta 9° , todo esto con base al ángulo de contacto “sin tratamiento”.

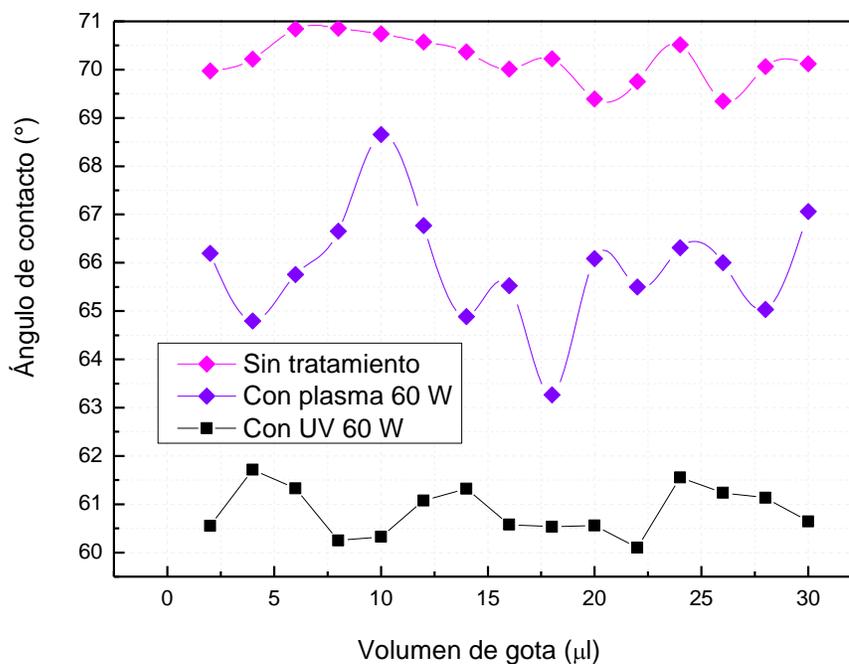


Ilustración 87 Ángulo de contacto de LDPE sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

4.22 Ángulo de contacto de PS, sin tratamiento, 60 W con plasma y tratamiento UV

La ilustración 88 muestra las comparaciones de los ángulos de contacto de los tratamientos que se realizaron. La línea café pertenece al ángulo de contacto sin tratamiento, de 73.0° a 74.6° . La línea violeta pertenece al ángulo de contacto con tratamiento de plasma a 60 W, se obtienen ángulos en el intervalo de 63.9° a 67.7° , con una reducción de 10° en comparación al que no tenía tratamiento. En el caso de la línea negra que pertenece al ángulo de contacto de la muestra con tratamiento UV y con tratamiento de plasma a 60 W, se obtiene un rango de 59.1° a 60.6° de ángulo, con este tratamiento se obtuvo una reducción de 4° .

Al analizar ambos tratamientos, se obtiene una reducción de ángulo de de 10° con solo el tratamiento de plasma y si se le añade el tratamiento de UV se reduce hasta 14° , todo esto con base al ángulo de contacto obtenido de la muestra “sin tratamiento”.

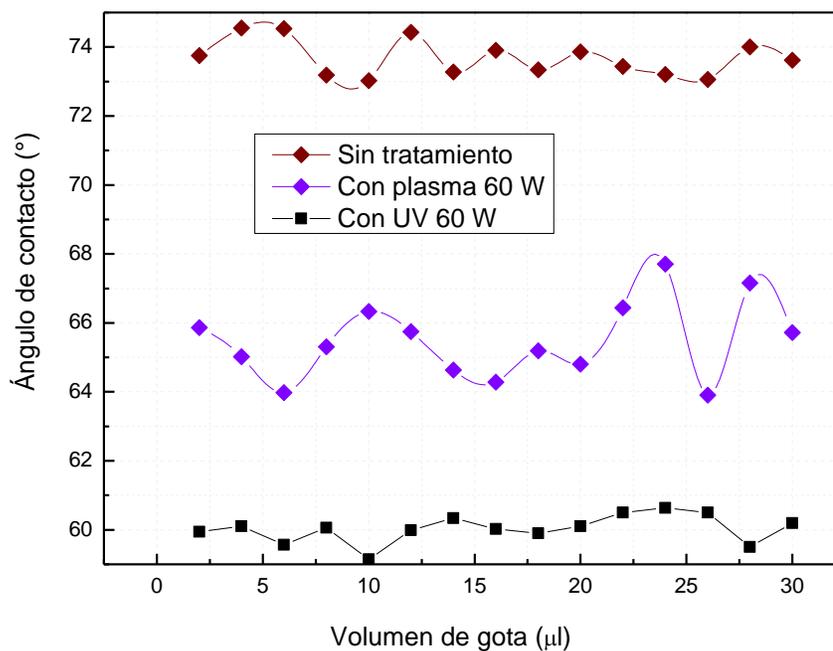


Ilustración 88 Ángulo de contacto de PS sin tratamiento y con tratamiento de plasma a 60 W y con tratamiento por luz UV (creación propia).

CAPITULO 5

5.1 Conclusiones

Se revisaron los conceptos de plasma, polímeros, tratamiento mediante plasma, y radiación UV. Se clasificaron los residuos que se utilizaron en el tratamiento que fueron botella de plástico para PET, plato de unicel (PS) y pegasolo (LDPE).

Una vez seleccionadas las muestras se seccionaron y se analizó la morfología, estructura y características de la mojabilidad de los materiales antes de que se les realizara el tratamiento.

Se evaluaron las composiciones de los polímeros (PET, PS y LDPE), sus cambios químicos y morfológicos, así como las transformaciones que se tuvieron al realizarle el tratamiento por plasma y posteriormente también se le realizó un tratamiento de radiación UV.

Se realizó el tratamiento a las muestras por medio de plasma de resplandor durante 10 minutos, con potencia de 20, 40 y 60 W. Una vez extraídas las muestras se observan los cambios estructurales, morfológicos y de mojabilidad.

Los cambios morfológicos presentados después del tratamiento por plasma muestran que a mayor potencia las muestras tienen a erosionarse y presentar irregularidades en la superficie en mayor grado.

En la parte estructural los análisis muestran que los grupos funcionales y los elementos encontrados en la estructura no presentan cambios significativos, esto sugiere que el tratamiento por plasma no afecta directamente a la estructura inicial de los polímeros.

En el caso de la mojabilidad del material se observa que a mayor potencia del tratamiento menor es el ángulo de contacto obtenido en la muestra, esto puede significar que el tratamiento por plasma está promoviendo la interacción del polímero con el agua; Y al agregarle el tratamiento por radiación UV se observa mayor reducción en el ángulo de contacto y podría ayudar a disminuir el tiempo de degradación de este tipo de materiales.

Competencias

Materia	Competencia
Fundamentos de Investigación	Aplica elementos de la investigación para poder elaborar escritos académicos de forma correcta.
Taller de Investigación I	Manejar herramientas metodológicas de investigación, desarrollando habilidades de comprensión de lectura.
Taller de Investigación II	Profundizar en la investigación y el diseño del método con actitud crítica y constructiva para poder desarrollar adecuadamente la investigación.
Química	Comprender conceptos, principios y teorías fundamentales de química, también tener habilidad para aplicar conocimientos de la química que se pueden probar.
Propiedades de los materiales	Identificar y aplicar los materiales adecuados en los diferentes procesos de acuerdo a sus características y propiedades
Estudio del trabajo	Conocer los diferentes tipos de fabricación y materiales, también tener la capacidad de análisis y síntesis

Referencias.

- Adema, KN, Makki, H., Peters, EA, Laven, J., Van der Ven, LG, van Benthem, RA y de With, G. (2016). La influencia de las condiciones de exposición sobre los cambios químicos y físicos de los revestimientos de poliéster-uretano durante la fotodegradación. *Degradación y estabilidad de polímeros*, 123, 13-25.
- Arandes, J. M., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28-45.
- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R. y VanderMullen, J. (2002). Plasmas de descarga de gases y sus aplicaciones. *Spectrochimica Acta Part B: Espectroscopía atómica*, 57 (4), 609-658.
- C. Singh, N., Singh, R. y Ahuja, IPS (2018)
- CENGAGE Learning. Quagliano, J. C. (1998). Producción microbológica del poliéster biodegradable poli-3-hidroxi-butirato (PHB) a partir de *Azotobacter chroococcum* 6B (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- Chrissafis, K. (2009). Cinética de degradación térmica de polímeros. *Revista de análisis térmico y calorimetría*, 95 (1), 273-283.
- Córdova Lozano Felipe, (2017) Microscopia electrónica de barrido (SEM) (Expresiones UDLAP
- Dai, K., Deng, Z., Liu, G., Wu, Y., Xu, W. y Hu, Y. (2020). Efectos de un monómero retardante de llama que contiene fósforo-azufre reactivo sobre el retardo de llama y las propiedades térmicas y mecánicas de la resina de poliéster insaturado. *Polímeros*, 12 (7), 1441.
- Felföldi, T., Jurecska, L., Vajna, B., Barkács, K., Makk, J., Cebe, G., ... y Márialigeti, K. (2015). La textura y el tipo de fibra de polímero determina la colonización bacteriana y las propiedades de la biopelícula en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de ingeniería química*, 264, 824-834.

- Ge, Z., Sun, R., Zhang, K., Gao, Z. y Li, P. (2013). Propiedades físicas y mecánicas del mortero de residuos de botellas de tereftalato de polietileno. *Materiales de construcción*, 44 , 81-86.
- Gómez, E., Rani, DA, Cheeseman, CR, Deegan, D., Wise, M. y Boccaccini, AR (2009). Tecnología de plasma térmico para el tratamiento de residuos: una revisión crítica. *Revista de materiales peligrosos*, 161 (2-3), 614-626.
- González Mancera, G., & Noguez Amaya, M. E. (2006). Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gubanova, E., Kupinets, L., Deforz, H., Koval, V. y Gaska, K. (2019). Reciclaje de residuos poliméricos en el contexto del desarrollo de la economía circular. *Arquitectura, Ingeniería Civil, Entorno*, 12 (4), 99-108.
- Guddeti, RR, Knight, R. y Grossmann, ED (2000). Despolimerización de polietileno mediante tecnología de plasma acoplado por inducción. *Química del plasma y procesamiento del plasma*, 20 (1), 37-64.
- Hassanzadeh-Khayyat, M., Lai, E. P., Kollu, K., & Ormeci, B. (2011). Degradation of diclofenac in molecularly imprinted polymer submicron particles by UV light irradiation and HCl acid treatment. *Journal of Water Resource and Protection*, 3(9), 643.
- Molina, N. F., Mendoza, K. J., Añez, R. O., & Marulanda, W. U. (2021). Aprovechamiento sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto: Una revisión. *Interciencia*, 46(6), 240-247.
- Nevoralová, M., Koutný, M., Ujčič, A., Horák, P., Kredatusová, J., Šerá, J., ... & Kruliš, Z. (2019). Controlled biodegradability of functionalized thermoplastic starch-based materials. *Polymer Degradation and Stability*, 170, 108995.

- Nisol, B. y Reniers, F. (2015). Desafíos en la caracterización de polímeros de plasma utilizando XPS. *Revista de espectroscopía electrónica y fenómenos relacionados*, 200, 311-331.
- Nones Faria, C. E. (2019). Gestión y técnicas de reciclaje: estudio del escenario actual, aplicaciones y nuevas tendencias (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Okan, M., Aydin, HM y Barsbay, M. (2019)
- Pereira, APDS, Silva, MHPD, Lima, É. P., Paula, ADS y Tommasini, FJ (2017). Procesamiento y caracterización de composites PET reforzados con residuos de hormigón geopolimérico. *Investigación de materiales*, 20 , 411-420.
- Quintana Olivares, C. (2016). Evaluación de la bioactividad del cemento de silicato de calcio (Biodentine®) del efecto del grabado dentinario previo a su aplicación.
- Rauh, B., Kreling, S., Kolb, M., Geistbeck, M., Boujenfa, S., Suess, M. y Dilger, K. (2018). Limpieza con láser UV y caracterización de superficies de un polímero reforzado con fibra de carbono aeroespacial. *Revista Internacional de Adhesión y Adhesivos*, 82, 50-59.
- Řezníčková, A., Kolská, Z., Hnatowicz, V., Stopka, P. y Švorčík, V. (2011). Comparación de los cambios superficiales de polímeros termoplásticos inducidos por plasma de argón incandescente. *Instrumentos y métodos nucleares en la investigación de la física Sección B: Interacciones del haz con materiales y átomos*, 269 (2), 83-88.
- Richardson & Lokensgard. *Industria del Plástico. Plástico Industrial*.
- Rojas, A. F., & Osswald, T. (2016). Determinación de la degradación térmica de polímeros por análisis de cambio de color. *Ingeniería*, 21(1), 19-30.
- Schlummer, M., Gruber, L., Mäurer, A., Wolz, G. y Van Eldik, R. (2007). Caracterización de fracciones poliméricas de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) e implicaciones para la gestión de residuos. *Chemosphere*, 67 (9), 1866-1876.

Singh, N., Singh, R. y Ahuja, IPS (2018). Reciclaje de residuos de polímeros con refuerzo de SiC/Al₂O₃ para aplicaciones de herramientas rápidas. *Materials Today Communications*, 15, 124-127.

Whitten, D. Peck & Stanley. (2008). *Química*. (8a ed.).

Zapata, D., Pujol, R., & Coda, F. (2012). Polímeros biodegradables: una alternativa de futuro a la sostenibilidad de medio ambiente. *Técnica industrial*, 297, 76-80.