



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA**

Doctorado en Ingeniería ambiental y Tecnologías sustentables.

**TESIS DE INVESTIGACIÓN**

**“EMPLEO DE NYLON RECICLADO PARA LA  
FABRICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS  
POLIMÉRICOS TRATADOS POR PLASMA E  
IMPACTO AMBIENTAL ”**

Para obtener el grado de

**Doctora en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentable**

Postulante: **M.I.C.A. MARÍA DEL PILAR RODRÍGUEZ ROJAS**

Nombre del asesor: **Dr. Álvaro Torres Islas**

Nombre del asesor externo: **Horacio Martínez Valencia**



## Resumen

Esta investigación presenta una visión general del recubrimiento de nylon 6,6 reciclado como alternativa de disposición final frente a la forma tradicional de eliminación final de este polímero, centrándose en su ciclo de vida, producción, caracterización del recubrimiento, reproducibilidad de los datos y limitaciones a las que se enfrenta. Para comprender los impactos del nylon 6,6, este estudio investigó el impacto ambiental de los procesos que conducen a la conversión de residuos plásticos en revestimientos de polímeros reciclados, considerando también la solubilidad del polímero, el procesamiento del revestimiento mediante la técnica de inmersión y los procesos de eliminación de residuos. Para el análisis del ciclo de vida de los procesos de formación de revestimientos reciclados con el fin de estudiar los impactos ambientales, se utilizó el software OpenLCA y EIA09.

El estudio abarcó la formación de películas protectoras de nylon 6,6, y su caracterización como recubrimiento en sustratos de acero 316L, así como información obtenida durante la exposición a medios corrosivos, en este caso una simulación de un medio salino.

En la simulación se estudió el comportamiento de las películas de nylon 6,6, reciclado, como recubrimiento frente a la corrosión; así como los efectos del pH, la concentración y el comportamiento de los iones ( $\text{Cl}^-$ ), en el sustrato durante la exposición a la solución acuosa de NaCl.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

## Abstract

This research presents an overview of recycled nylon 6,6 coating as a final disposal alternative to the traditional form of final disposal of this polymer, focusing on its life cycle, production, coating characterization, data reproducibility and limitations faced. To understand the impacts of nylon 6,6, this study investigated the environmental impact of the processes leading to the conversion of plastic waste into recycled polymer coatings, also considering polymer solubility, coating processing by dipping technique and waste disposal processes. For the life cycle analysis of recycled coating formation processes to study the environmental impacts, OpenLCA and EIA09 software were used.

The study covered the formation of nylon 6,6 protective films, their characterization as a coating on 316L steel substrates, and information obtained during exposure to corrosive media, in this case a simulation of a saline environment.

In the simulation, the behavior of the recycled nylon 6,6 films as a coating against corrosion was studied, as well as the effects of pH, concentration, and behavior of ions (Cl-) in the substrate during the exposure to NaCl aqueous solution.



Dedico...

Este trabajo con mucho cariño a mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que hoy soy, es un privilegio ser su hija, gracias por todo.

A mi hija Itzel Aurora quien ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme y poder llegar a ser un ejemplo para ella.

A mis hermanos que son mi más grande apoyo: Ana Paula, David y Julián Rodríguez Rojas.

También a mi esposo por apoyarme en todo momento y estar a mi lado en los momentos difíciles.



## Agradecimiento.

El principal agradecimiento a Dios quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir adelante.

A mi asesor al Doctor Horacio Martínez Valencia por todo el apoyo a lo largo de estos años, por siempre guiarme y sobre todo por haber aceptado que se realice mi tesis.

Mi agradecimiento también va dirigido a la Dra. Edna Vázquez Vélez quien me ha apoyado en todo momento y me ha brindado su valioso tiempo.

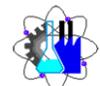
Agradezco también al Dr. Álvaro Torres Islas por haber aceptado dirigir mi tesis y su apoyo durante el desarrollo de mi tesis y a la comisión revisora: Dra. Josefina Vergara Sánchez, Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña, Cesar Torres Segundo y Jesús Mario Colín de la Cruz.

Mi agradecimiento también va dirigido al grupo de investigadores que colaboran con el grupo de Espectroscopia: Dr. Fermín Castillo Mejía, Dr. Osvaldo Flores Cedillo, Dr. Bernardo Campillo Illanes, Héctor Hugo Hinojosa Galván y a todos mis compañeros del grupo de espectroscopia del Instituto de Ciencias Físicas (ICF), en especial a Juana A. Romero Vergara (Juanita), por siempre auxiliarme.

Por último, agradezco al Dr. Rene Guardián Tapia (CIICAp), al Dr. Arturo Galván Hernández (ICF) y al Dr. Oscar Sotelo Mazón (ICF) por el apoyo brindado.

Este trabajo agradece el apoyo del proyecto DGAPA IN102222.

|  |    |
|--|----|
| Contenido  |    |
| Resumen .....  | 2  |
| Abstract .....   | 3  |
| Dedico.....  | 4  |
| Agradecimiento. ....   | 5  |
| Índice de figuras .....  | 9  |
| Índice de tablas .....   | 12 |
| Capítulo 1. Impacto Ambiental .....  | 13 |
| 1.1 Delimitación del área de estudio .....   | 13 |
| 1.2 Aspectos relevantes del proyecto.....  | 15 |
| 1.3 Análisis del entorno medio ambiental.....  | 18 |
| Resultados .....   | 20 |
| Capítulo 2: Introducción .....   | 25 |
| 2.1. Sustentabilidad.....  | 25 |
| 2.1.1. Objetivos del desarrollo sustentable.....   | 25 |
| 2.2 Sector automotriz .....  | 26 |
| 2.2.1. Sustentabilidad en el sector automotriz.....  | 26 |
| 2.2.2. Producción de polímeros que se utilizan para la fabricación de autopartes en el sector automotriz. .... | 27 |
| 2.2.3. Principales polímeros en la producción de autopartes .....  | 28 |
| 1.2.3.1. Termoplásticos.....   | 29 |
| 2.2.3.2. Termoestables .....   | 30 |
| 2.2.3.3. ABS (acrilonitrilo butadieno estireno).....   | 32 |
| 2.2.3.4. Poliamidas .....  | 32 |
| 2.3 Generación y disposición final de los polímeros.....   | 33 |
| 2.3.1 Residuos sólidos urbanos (RSU) .....   | 33 |
| 2.3.2. Etapas de manejo de los RSU en México .....   | 35 |
| 2.3.2.1. Recolección .....   | 35 |
| 2.3.2.2. Reciclaje .....   | 35 |
| 2.3.2.3. Disposición final .....   | 37 |



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

|   |    |
|---|----|
| Planteamiento del proyecto de investigación .....                           | 39 |
| Hipótesis.....  | 40 |
| Justificación.....  | 40 |
| Objetivos .....   | 40 |
| General: .....  | 40 |
| Específicos:.....   | 41 |
| Capítulo 3: Marco teórico .....   | 42 |
| 3.1. Corrosión.....   | 42 |
| 3.1.1. Tipos de corrosión.....  | 42 |
| 3.1.2. Recubrimientos poliméricos y su aplicación en metales.....           | 44 |
| 3.1.2.1. Técnica de síntesis y formación del recubrimiento .....            | 45 |
| 3.2. Técnicas de caracterización .....                                      | 46 |
| 3.2.1. Técnicas electroquímicas .....                                       | 47 |
| 3.2.1.1. Potencial a circuito abierto.....                                  | 47 |
| 3.2.1.2 Curvas de polarización .....  | 47 |
| 3.2.1.3 Impedancia .....  | 48 |
| 3.2.3. Caracterización química .....  | 49 |
| 3.2.3.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) ..... | 49 |
| 3.2.3.2. Espectroscopia de Raman.....                                       | 50 |
| 3.2.3.3. Microscopia electrónica de barrido.....                            | 50 |
| 3.2.3.4 Difracción de rayos X .....   | 51 |
| 3.2.3.5 Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) .....                           | 51 |
| Capítulo 4: Metodología .....   | 53 |
| 4.1 Sustrato: Acero inoxidable.....   | 53 |
| 4.2 Solución de Nylon 6,6 .....   | 54 |
| 4.3 Recubrimiento de nylon 6,6 reciclado .....                              | 56 |
| 4.3.1 Recubrimiento por inmersión.....                                      | 56 |
| 4.4 Técnicas de caracterización .....                                       | 58 |
| 4.4.1 Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) .....    | 58 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.4.2 Espectroscopia de UV-visible .....   | 59  |
| 4.4.3 Espectroscopia de Raman .....  | 59  |
| 4.4.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) .....   | 59  |
| 4.4.5 Difracción de Rayos X (DRX) .....  | 60  |
| 4.4.6 Angulo de Contacto .....   | 60  |
| 4.4.7 Técnicas Electroquímicas.....  | 61  |
| 4.5 Impacto ambiental .....  | 64  |
| 4.5.1 Evaluación del impacto ambiental preliminar: disposición final el polímero nylon 6.6 ..... | 64  |
| 4.5.2 Investigación y evaluación de la alternativa de reciclaje.....                             | 65  |
| 4.5.3 Estudio del impacto ambiental implementando el reciclaje del polímero. ....                | 65  |
| Capítulo 4: Resultados y discusión .....   | 66  |
| 4.1 Caracterización química de la solución polimérica .....                                      | 66  |
| 4.2 Caracterización de los recubrimientos .....  | 72  |
| 4.2.1.1 Difracción de rayos X .....  | 73  |
| 4.2.1.2 Nylon en ácido fórmico al 1% .....   | 75  |
| 4.2.1.1 Nylon en ácido fórmico al 11%.....   | 76  |
| 4.2.2.2 Nylon en ácido fórmico y etanol al 12% .....   | 78  |
| 4.2.4 Ángulo de contacto.....  | 86  |
| 4.2.5 Ensayos mediante técnicas ópticas .....  | 87  |
| 4.2.6 Caracterización electroquímica .....   | 89  |
| Conclusiones.....  | 96  |
| Bibliografía .....   | 98  |
| Productos de divulgación de la investigación .....   | 103 |
| <input type="checkbox"/> Artículos.....  | 103 |
| <input type="checkbox"/> Cursos .....  | 103 |
| <input type="checkbox"/> Congresos .....   | 104 |



## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Limitaciones del área en donde se llevará a cabo la investigación del impacto ambiental .....   | 14 |
| Figura 2 Muestra los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, las áreas en donde se concentran pozos y áreas naturales protegidas. ...                                | 15 |
| Figura 3. Etapas del proceso de elaboración de autopartes .....   | 16 |
| Figura 4. Diagrama de flujo de la disposición final de nylon 66 a) vertederos controlados y b) a cielo abierto.....   | 17 |
| Figura 5. Diagrama de flujo de las películas poliméricas. ....  | 17 |
| Figura 6. Diagrama de flujo de materiales en el proceso del recubrimiento de nylon 6,6 reciclado .....  | 20 |
| Figura 7. Modelo de daños del recubrimiento de nylon 6,6 eciclado.....  | 23 |
| Figura 8. Eco-perfil comparativo de la disposición final de nylon 66 .....  | 24 |
| Figura 9.- Termoplásticos utilizados para la fabricación de autopartes.....   | 29 |
| Figura 10.- Termoestables utilizados para la fabricación de autopartes. ....  | 30 |
| Figura 11.- Polímeros utilizados en la fabricación de autopartes, [14]. ....  | 31 |
| Figura 12. Composición de los RSU en México, 2012, [22] .....   | 34 |
| Figura 13. Composición de los RSU recolectados valorizables, la cantidad se expresa en porcentaje por día. Fuente: [22]......   | 37 |
| Figura 14. Disposición final de RSU en rellenos sanitarios, sitios controlados y no controlados, así como el número de rellenos sanitarios por entidad federativa. Fuente: [22]...... | 38 |
| Figura 15. Tratamientos para modificar la superficie del sustrato: a) Químico, b) Mecánico y c) Plasma atmosférico.....   | 53 |
| Figura 16. Limpieza del nylon reciclado en pellets. ....  | 54 |
| Figura 17. Diagrama del flujo para el desarrollo del recubrimiento polimérico por la técnica de inmersión.....  | 57 |
| Figura 18. Ángulo de contacto.....  | 60 |
| Figura 19. Esquema del ángulo de contacto .....   | 61 |
| Figura 20. Estructura química del nylon 6.6. Elaboración propia. ....   | 66 |
| Figura 21. Mecanismo de solvatación del ácido que rompe los puentes de hidrógeno. ....  | 67 |
| Figura 22. Espectro de FTIR de nylon puro y nylon reciclado, sólido y en solución. ....   | 69 |
| Figura 23. Espectro de UV-visible de nylon reciclado .....  | 70 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 24. Espectro de Raman de nylon puro y reciclado disuelto en ácido fórmico y ácido fórmico con 6% de etanol.....   | 72 |
| Figura 25. Espectros de difracción de rayos X (DRX) de la película de nylon reciclado. ....  | 73 |
| Figura 26. Espectro de difracción de rayos X (DRX): a) sustrato de acero 316L, b) nylon diluido al 1%, c) nylon concentrado al 11% y d) ácido fórmico y etanol al 12%.....   | 74 |
| Figura 27. Imágenes de SEM de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado al 1% tratada con plasma por 20 s: a) 5.0 kVx500 aumentos, b) 5.0 kVx50 aumentos y c) análisis químico.....   | 75 |
| Figura 28. Imágenes de SEM de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado al 11% depositado sobre la superficie de acero tratado con plasma por 60 s: a) 5.0 KVx500 aumentos, b) 5.0 KVx50 aumentos y c) análisis químico.....                  | 76 |
| Figura 29. Imágenes de SEM de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado al 11% tratado con plasma por 30 s: a) 5.0 KVx500 aumentos, b) 5.0 KVx50 aumentos y c) análisis químico. ....   | 77 |
| Figura 30. Imágenes de SEM de 15 KV 2000 aumentos del recubrimiento de nylon puro por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico.....  | 79 |
| Figura 31. Análisis químico del recubrimiento de nylon puro por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico. ....   | 80 |
| Figura 32. Imágenes de SEM de 15 KV 5000 aumentos donde se aprecia el detalle de la morfología del recubrimiento de nylon puro por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico. ....      | 81 |
| Figura 33. Imágenes de SEM de 15 KV 2000 aumentos del recubrimiento de nylon reciclado por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico. ....  | 82 |
| Figura 34. Análisis químico del recubrimiento de nylon reciclado por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico. ....  | 83 |
| Figura 35. Imágenes de SEM de 15 KV 5000 aumentos donde se aprecia el detalle de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico. .... | 84 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 36. Espectros de FTIR del recubrimiento de nylon puro y con tratamiento de plasma atmosférico. ....   | 85 |
| Figura 37. Espectros de FTIR del recubrimiento de nylon reciclado y con tratamiento de plasma atmosférico.....   | 86 |
| Figura 38. Variación del ángulo de contacto con respecto al tiempo de nylon puro y nylon reciclado sin y con tratamiento de plasma .....   | 87 |
| Figura 39. Las imágenes de esta figura muestran el comportamiento de la transmitancia y la reflectancia espectral de los diferentes recubrimientos sobre el sustrato de acero: a) Nylon, b) recubrimiento tratado con plasma y c) sustrato tratado con plasma antes del recubrimiento..... | 88 |
| Figura 40. Curvas de polarización del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 s). ....  | 89 |
| Figura 41. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 0h en solución de NaCl al 3%. ....                                       | 91 |
| Figura 42. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 24h en solución de NaCl al 3%. ....                                      | 92 |
| Figura 43. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 48h en solución de NaCl al 3%. ....                                      | 92 |
| Figura 44. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 120h en solución de NaCl al 3%. ....                                     | 93 |
| Figura 45. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 0h en solución de NaCl al 3%. ....                                       | 94 |
| Figura 46. Impedancia total del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos).....  | 94 |



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Efectos ambientales significativos en la disposición final del nylon 6.6....   | 19 |
| Tabla 2. Evaluación de impacto ambiental de la disposición final de nylon 66 en vertederos a cielo abierto, vertederos controlados y películas poliméricas .....                    | 22 |
| Tabla 3. Matriz experimental de los tratamientos superficiales de las muestras... ..  | 56 |
| Tabla 4. Asignación de grupos funcionales del espectro de FTIR de nylon puro y reciclado en sólido y en solución .....  | 70 |
| Tabla 5. Asignación de grupos funcionales del espectro de UV-visible de nylon reciclado.....  | 71 |
| Tabla 6. Resumen de los resultados de las curvas de polarización del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6.....   | 90 |
| Tabla 7. Impedancia total del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) durante 288 horas de inmersión. .... | 95 |



## Capítulo 1. Impacto Ambiental

Los efectos ambientales que se tienen con la disposición final de los residuos poliméricos, deben ser calculados hoy en día por un estudio preliminar, desde su implicancia en el área de influencia como también en el análisis normativo-legal.

Posteriormente, entrar el estudio de la línea base, en donde se considera la relación oferta-demanda, comparando la situación actual con la futura. En este momento del proceso se analizan las diferentes alternativas de este, comenzando por la manera tradicional, lo que lleva a la propuesta final, que surgirá como resultado de una optimización técnica.

Por último, se toma la decisión de realizar una evaluación de Impacto Ambiental, en la cual se analizarán los costos y benéficos de su aplicación.

### 1.1 Delimitación del área de estudio

Los sitios en los cuales se disponen los residuos sólidos en este caso polímeros después de su vida útil tiene como objetivo confinar de manera segura en términos de control de contaminación ambiental y protección de la salud pública.

La disposición final de los polímeros en específico del nylon 6,6 debe de optimizarse para la eficiencia del tiempo de degradación, pero también debe de ser lo suficientemente viable en el sentido costo-beneficio para que pueda ser competitivo con la disposición final actual.

Sin embargo, la disposición final de los polímeros en vertederos hace un uso ineficiente del tiempo de degradación, del impacto ambiental y a la salud, al no darles un tratamiento adecuado en los sitios donde se disponen esto, debido a que son a cielo abierto.

Provocando problemas de salud pública, como proliferación de transmisores de enfermedades, generados de malos olores y, principalmente, la contaminación de la tierra, y de las aguas superficiales y subterráneas a través de lixiviados, comprometiendo los recursos hídricos y del suelo.

La ineficiencia de la disposición final de los polímeros representa un impacto ambiental significativo. En México se producen 300 millones de toneladas de polímeros al año, de las cuales se recicla el 3% [1].

México cuenta con 2456 municipios y delegaciones de los cuales 1881 cuentan con sitios para su disposición final de residuos sólidos, estos están clasificados en rellenos sanitarios y vertederos a cielo abierto, 238 y 1643 respectivamente.

El Estado de Morelos cuenta con 33 municipios y 18 sitios de disposición final de los cuales solo 4 cumplen con el criterio de rellenos sanitarios en los cuales no se les da un tratamiento a los residuos sólidos para su disposición final.

La falta de una gestión integral para el manejo adecuado de estos residuos conlleva a la proliferación de focos de infección y el aumento en el riesgo de salud ambiental [2].

El trabajo se limita al Estado de Morelos y los estados vecinos: Ciudad de México, Estado de México, Puebla, Tlaxcala y Guerrero, figura 1.



Figura 1. Limitaciones del área en donde se llevará a cabo la investigación del impacto ambiental

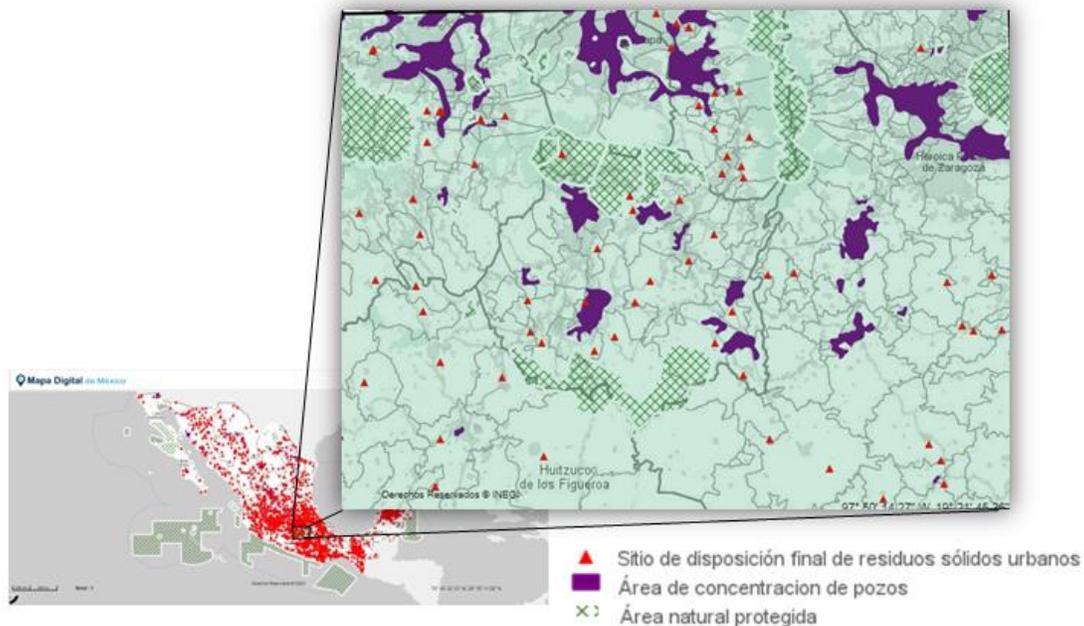


Figura 2 Muestra los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, las áreas en donde se concentran pozos y áreas naturales protegidas

Para el análisis del impacto ambiental es necesario conocer en donde están situados los sitios de disposición final en los estados antes mencionados y si se encuentran cerca de áreas naturales protegidas o pozos de agua para determinar los riesgos a la salud, efectos perjudiciales al medio ambiente, contaminación del agua y del suelo, figura 2.

En los cinco estados de estudio se encuentran 265 sitios donde se disponen los residuos, el 85% de estos sitios son vertederos a cielo abierto y el 15% rellenos sanitarios en donde solo el 7.69% de los sitios controlados dan tratamiento a los residuos.

## 1.2 Aspectos relevantes del proyecto

Se identificaron las acciones básicas que causan impactos potenciales durante proceso de almacenamiento y disposición final de las autopartes de nylon 6,6 utilizando la herramienta de análisis de ciclo de vida, para determinar la alternativa de menor impacto, utilizando el software EIA09 y tomando información secundaria de trabajos anteriores.

En la figura 3 se muestran las etapas del proceso de elaboración de autopartes, así, como su uso, también se identifica la fase de materias primas que incluye el proceso de polimerización, del proceso de las autopartes, la de uso de las piezas, su uso por el cliente y por último su disposición final.



Figura 3. Etapas del proceso de elaboración de autopartes y su disposición final

La disposición final de los polímeros consiste en la incineración o rellenos sanitarios. La norma NOM-052-SEMARNAT-2005, clasifica a los polímeros como desechos peligrosos para su disposición final, esto se debe su toxicidad, que con el paso del tiempo producen sustancias que provocan efectos adversos en la salud o en los ecosistemas, pero se consideran como residuos sólidos para su recolección. Debido a que se requiere analizar la parte de la disposición final del polímero y sobre este hacer diferentes comparativas de alternativas y determinar cuál es la mejor opción al igual que calcular el impacto que este tendría en el medio ambiente se determinó realizar un análisis sobre el impacto

A continuación, se muestran los diagramas de flujo de las alternativas que se compararon para la disposición final del polímero nylon 6,6.



En el caso de la disposición final en vertederos a cielo abierto y controlado, los datos sobre el impacto que provocan en el medio ambiente fueron tomados de la fuente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y de la literatura de trabajos anteriores.

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo de las alternativas que se compararon para la disposición final del polímero nylon 6,6 en vertederos controlados y vertederos a cielo abierto

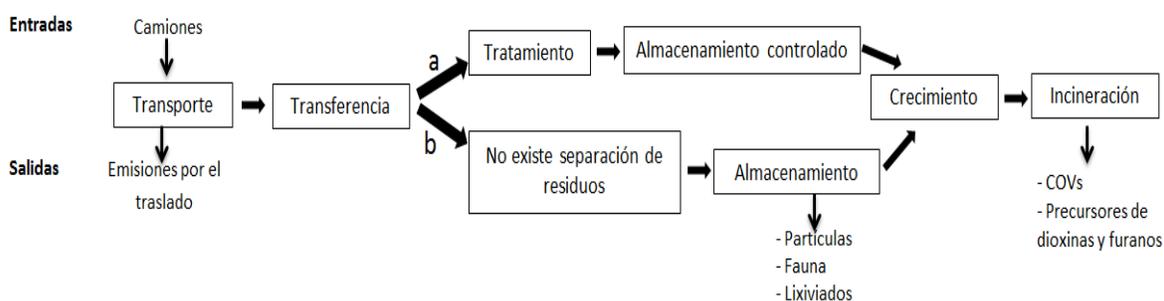


Figura 4. Diagrama de flujo de la disposición final de nylon 6,6 a) vertederos controlados y b) a cielo abierto

Una alternativa para ayudar a mitigar el problema de los residuos sólidos en este caso en específico de polímeros es la formación de películas poliméricas utilizando como materia prima los sobrantes de autopartes mediante la técnica de despolimerización.

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo para la alternativa de películas poliméricas utilizado como materia prima el nylon 6,6 de desecho.

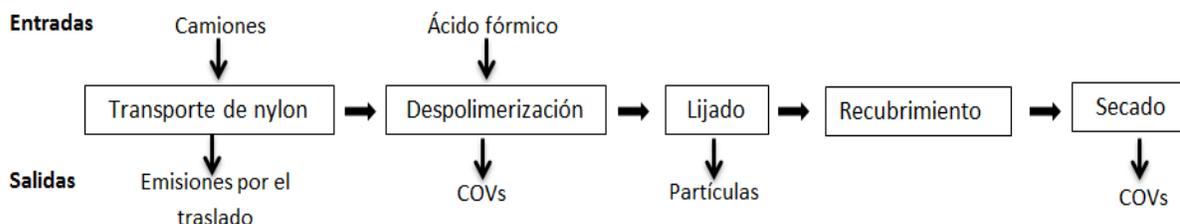


Figura 5. Diagrama de flujo de las películas poliméricas



### 1.3 Análisis del entorno medio ambiental

Para poder diagnosticar la influencia del proyecto sobre el entorno medio ambiental se caracterizó el ambiente: analizando los factores ambientales (agua, suelo, aire, seres vivos, clima, paisaje, entre otros.) posibles de ser afectados antes del proyecto.

Para el cual se eligió el método de la matriz simple de causa-efecto que permitiera identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales sobre el proyecto.

Una matriz simple de causa-efecto permite conocer por medio del cruce de acciones el alcance y el efecto del proyecto. Ayuda a determinar el orden del impacto y las relaciones más complejas, la cual servirá de base para los modelos de simulación.

Los efectos ambientales significativos [2], así como la descripción de cada una de las alternativas que se compararon se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Efectos ambientales significativos en la disposición final del nylon 6.6

| Alternativa                                  | Vertederos a cielo abierto  | Vertederos controlados                                 | Películas poliméricas  |
|--|---|--|--|
| <b>Efectos ambientales</b>                   |   |  |  |
| <b>Transporte de residuos sólidos</b>        | Emisiones que se generan con el traslado del polímero de la empresa a su disposición final  |  |  |
| <b>Inversión</b>                             | Inversión en el mantenimiento del vertedero   |  | Inversión para la compra de reactivos para realizar la despolimerización                                     |
| <b>Contaminación del suelo</b>               | Contaminación del suelo por el tipo de residuos sólidos que se depositan en el vertedero    |  |  |
| <b>Fauna</b>                                 | Fauna nociva para la salud: ratas, cucarachas, mosquitos                                    |  | Mitigación de fauna nociva para la salud   |
| <b>Impacto sobre el paisaje</b>              | Cambios en la topografía, vegetación y hábitat de las especies animales                     | Alteraciones del paisaje por la creación del vertedero | Impacto en el paisaje por la acumulación de residuos sólidos   |
| <b>Aceptación social</b>                     | Aceptación del vertedero por la población vecina  |  | Aceptación del recubrimiento   |
| <b>Erosión del suelo</b>                     | Erosión del suelo por la presencia de ciertos componentes presentes en los residuos sólidos |  | Mitigación de la erosión del suelo por la presencia de ciertos componentes presentes en los residuos sólidos |
| <b>Aguas subterráneas</b>                    | Contaminación de mantos acuíferos por el arrastre de lixiviados                             |  | Mitigación de contaminación de manantiales por el arrastre de lixiviados                                     |
| <b>Olores</b>                                | Olores producidos por la descomposición de los residuos                                     |  | Olores al realizar la despolimerización de nylon 6.6   |
| <b>Emisiones a la atmósfera</b>              | Gases que se generan en el vertedero y son emitidos a la atmósfera                          |  | Liberación de gases que se emiten a la atmósfera   |
| <b>Ríos y arroyos</b>                        | Arrastre de residuos sólidos contaminando ríos y arroyos                                    |  | Menor contaminación de ríos y arroyos por residuos sólidos   |
| <b>Contaminación de aguas por lixiviados</b> | Contaminación de ríos y arroyos por el arrastre de lixiviados                               |  | Mitigación de contaminación de ríos y arroyos por el arrastre de lixiviados                                  |
| <b>Salud</b>                                 | Enfermedades por fauna nociva y emisiones de gases  |  | Enfermedades por emisiones de gases  |

## Resultados

La disposición final de los polímeros en específico del nylon 6,6 debe optimizarse para la eficiencia del tiempo de degradación, pero también debe ser lo suficientemente viable en el sentido costo-beneficio para que pueda ser competitivo con la disposición final actual.

Sin embargo, la disposición final de los polímeros en vertederos hace ineficiente el tiempo de degradación y del impacto ambiental y a la salud, al no darles un tratamiento adecuado en los sitios donde se disponen estos, debido a que son a cielo abierto.

Conduciendo a problemas de salud pública, como proliferación de transmisores de enfermedades, generando malos olores y, principalmente, la contaminación de la tierra y de las aguas superficiales y subterráneas a través de lixiviados, comprometiendo los recursos hídricos y del suelo.

La ineficiencia de la disposición final de los polímeros representa un impacto ambiental significativo. En México se producen 300 millones de toneladas de polímeros al año, de las cuales se recicla el 3% [1].

En la figura 6, se muestran las entradas de material corresponden al lijado y lavado de las probetas, la solución de nylon y el tratamiento con plasma, mientras que las salidas del sistema la forman los residuos de estas, los lodos de limpieza y las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

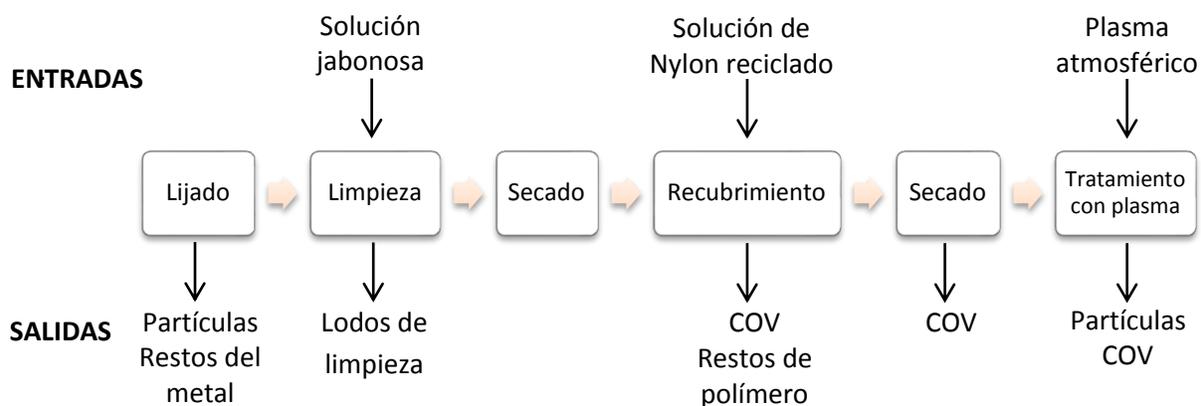


Figura 6. Diagrama de flujo de materiales en el proceso del recubrimiento de nylon 6,6 reciclado



Una vez que se han determinado las entradas y salidas del proceso, se introducen los datos que configuran el inventario en el software openLCA, obteniendo los resultados del eco-vector para las diferentes categorías de impacto elegidas.

En la figura 7 se muestran las categorías de impacto ambiental intermedias, las cuales proporcionan información más detallada de qué manera y en qué puntos se afecta el medio ambiente y cuáles son los posibles daños.

Posteriormente se llevó a cabo una clasificación de los resultados seleccionando las categorías de impacto más significativas, como son transporte de residuos sólidos, inversión, contaminación del suelo, fauna, impacto sobre el paisaje, aceptación social, erosión del suelo, aguas subterráneas, olores, emisiones a la atmosfera, ríos y arroyos, contaminación de aguas por lixiviados y salud, los cuales se modelaron en el software EIA09, comparándolas con las alternativas de disposición final tradicional del polímero: vertederos a cielo abierto y vertederos controlados.

En vista de los resultados obtenidos en la tabla 2 y la figura 8, las películas poliméricas es la alternativa que menor impacto genera sobre el medio ambiente. Cabe mencionar que el signo negativo de los valores en la tabla 2 se refiere a impactos negativos al ambiente. Por otra parte, la disposición final en vertederos a cielo abierto es el que presenta un mayor impacto ambiental en comparación con las otras dos alternativas. En el primer caso, la mayor acumulación de los residuos sólidos en espacios abiertos, las emisiones de COVs y los lixiviados son los acusantes de que la carga ambiental sea elevada, al contrario que en vertederos controlados. Considerando los valores de las categorías la que posee una mayor repercusión es la de fauna nociva, debido principalmente a la proliferación de fauna nociva precursora de enfermedades.

Tabla 2. Evaluación de impacto ambiental de la disposición final de nylon 6.6 en vertederos a cielo abierto, vertederos controlados y películas poliméricas

|  | Vertederos a<br>cielo abierto | Vertederos<br>controlados | películas<br>poliméricas |
|--|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Transporte de residuos<br>sólidos        | 0                             | 0                         | 0                        |
| Inversión                                | 0                             | 0                         | -3.92                    |
| Contaminación del suelo                  | 3.488                         | -8.645                    | 1.08                     |
| Fauna                                    | -32.76                        | 11.52                     | 36.176                   |
| Impacto sobre el paisaje                 | -20.16                        | -6.48                     | 6.35                     |
| Aceptación social                        | -5.202                        | 2.73                      | 4.556                    |
| Erosión del suelo                        | -5.76                         | 3.52                      | 2.984                    |
| Aguas subterráneas                       | -3.307                        | 3.308                     | 7.8                      |
| Olores                                   | -6.12                         | -2.88                     | -3.974                   |
| Emisiones a la atmósfera                 | -14.58                        | -6.982                    | -6.67                    |
| Ríos y arroyos                           | -1.44                         | 6.016                     | 4.724                    |
| Contaminación de aguas por<br>lixiviados | -6.63                         | 5.12                      | 4.606                    |
| Salud                                    | -6.662                        | -4.59                     | -4.557                   |

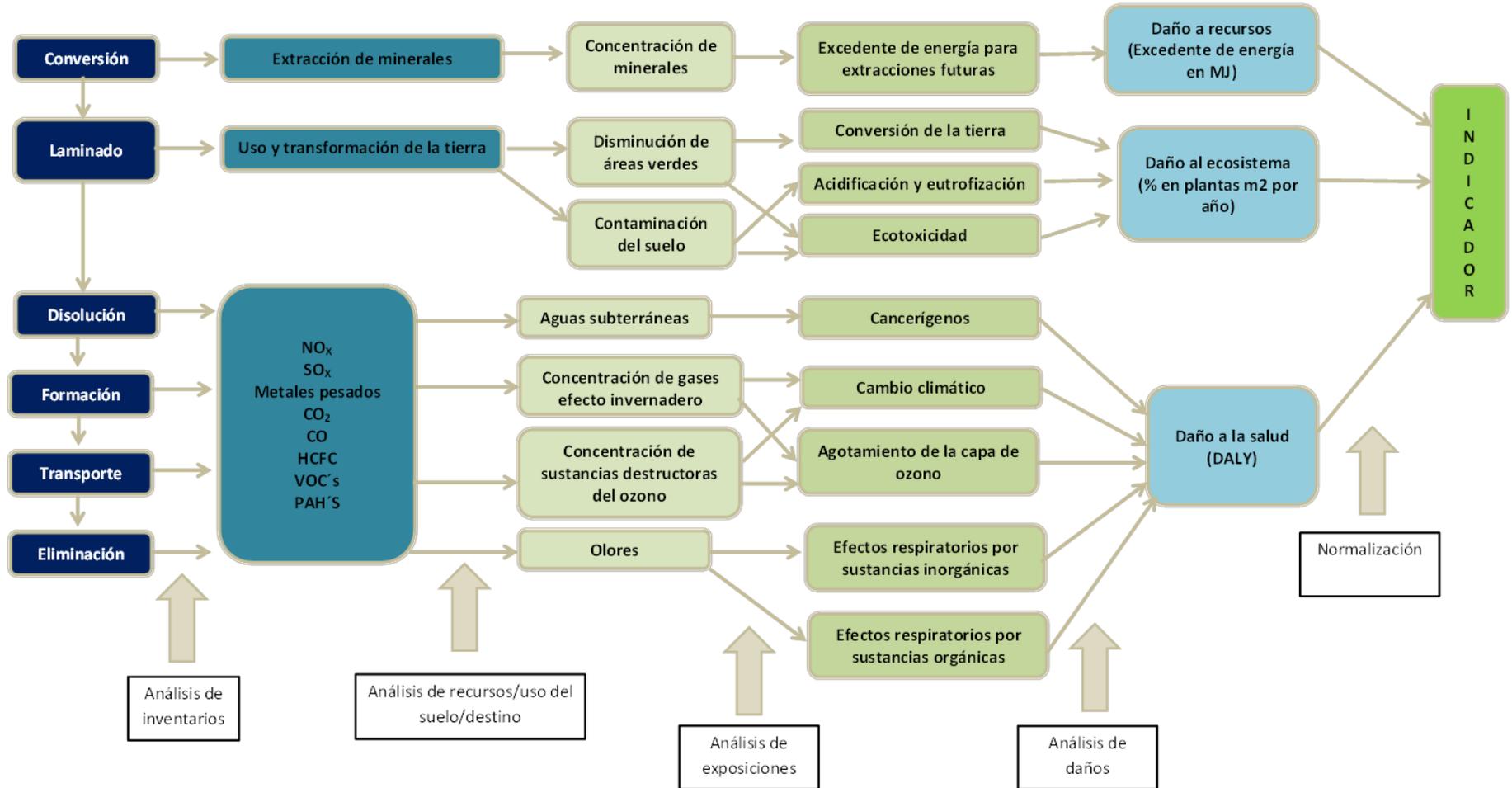
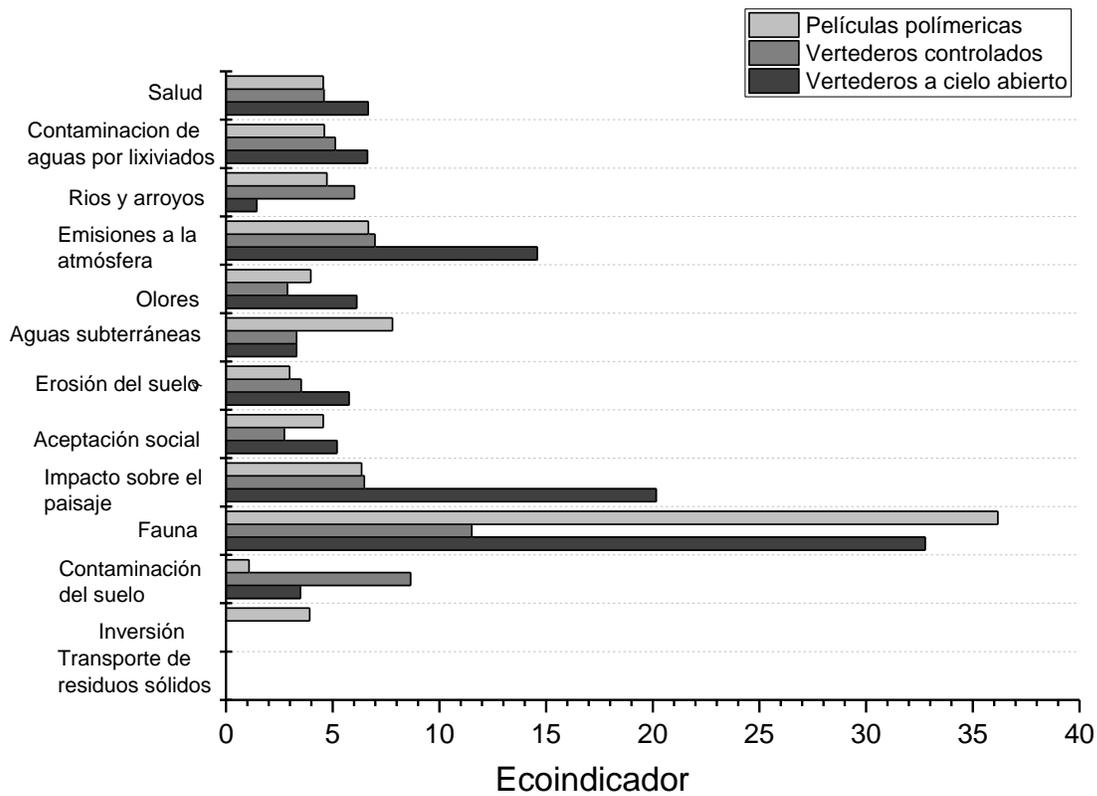


Figura 7. Modelo de daños del recubrimiento de nylon 6,6 reciclado



**Figura 8. Eco-perfil comparativo de la disposición final de nylon 6.6**

## Capítulo 2: Introducción

En esta sección se describen los objetivos de desarrollo sustentable, así como de la producción y tipo de polímeros que se utiliza en la fabricación de autopartes en el sector automotriz. Posteriormente la generación y la disposición final de los polímeros. Posteriormente se explica la definición de recubrimientos y su aplicación en metales.

### 2.1. Sustentabilidad

La sustentabilidad ambiental entendida como una condición de coexistencia armónica de la sociedad y su ambiente, donde la población actual puede satisfacer sus necesidades y mejorar su bienestar usando los recursos naturales disponibles, pero sin comprometer la calidad de vida de las generaciones venideras ni de las especies que habitan el planeta, es uno de los tres ejes fundamentales del concepto de desarrollo sustentables [3].

#### 2.1.1. Objetivos del desarrollo sustentable

Los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) son un llamado universal a actuar para terminar con la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad [4]. Entre los 17 ODS se encuentran al menos cuatro relacionados directamente con la disposición final de los polímeros utilizados en ingeniería.

- **Salud y Bienestar:** 7 millones de personas mueren cada año a causa de la exposición a finas partículas en el aire contaminado. Una de las metas para el año 2030, es reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo [5].
- **Industria, innovación e infraestructura:** Los avances tecnológicos también son esenciales para encontrar soluciones permanentes a los desafíos económicos y ambientales. Una forma importante para facilitar el desarrollo sostenible son la promoción de industrias sostenibles y la inversión en investigación e innovación científica. En 2030, se espera modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles,

utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo a sus respectivas capacidades [6].

- Ciudades y comunidades sostenibles. En 1990, había 10 ciudades con 1 millón de habitantes o más; en 2014, el número de megaciudades había llegado a 28, y en 2018 alcanzo 33. En el futuro 9 de cada 10 ciudades se encontrarán en el mundo en desarrollo. Para el 2030 se espera reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de desechos municipales y de otro tipo, [7].
- Producción y consumo responsable: para lograr crecimiento económico y desarrollo sostenibles, es urgente reducir la huella ecológica mediante un cambio en los métodos de producción y consumo de bienes y recursos. Una de las metas para el 2020, es lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, reducir significativamente su liberación a la atmosfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud y el medio ambiente. Y, en 2030 reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización, [8].

## 2.2 Sector automotriz

El sector automotriz, por supuesto, no es la excepción en la tendencia actualmente experimentada de producción y consumo sustentable. Y es un aspecto relevante, pues el sistema actual de movilidad impacta en la calidad de vida a través de las emisiones contaminantes y la congestión [9].

### 2.2.1. Sustentabilidad en el sector automotriz

La industria automotriz es un sector fundamental en el desarrollo económico de México. Sin duda, factores como la creciente competencia a nivel global, el

desarrollo tecnológico innovador y el acceso a nuevos mercados transformaran el rostro de la industria automotriz mexicana en los próximos años.

Hoy, en México se producen vehículos que se venden en todo el mundo, autopartes que se integran con éxito a las cadenas de valor de la industria global y se fortalecen nichos como el segmento de vehículos Premium. Además, año con año el país incrementa su participación en actividades de ingeniería, diseño de investigación y de desarrollo, y se suma a la búsqueda de alternativas para buscar soluciones a los desafíos que enfrenta la industria a nivel global. Como la sustitución de combustibles fósiles [10].

Los retos actuales no tienen que ver con la forma de remontar una crisis, si no con la manera de consolidar el crecimiento del sector y fortalecer áreas que actualmente presentan un nivel de desarrollo incipiente. A esto se suma la necesidad, cada vez más apremiante, de que la industria ofrezca vehículos más eficientes y amigables con el medio ambiente. De igual forma se busca impulsar el crecimiento de los segmentos Premium y de lujo, se crearán condiciones para que los vehículos híbridos y eléctricos puedan competir en el mercado, incentivando el desarrollo de infraestructura adecuada para el uso de tecnologías [11].

### **2.2.2. Producción de polímeros que se utilizan para la fabricación de autopartes en el sector automotriz.**

La industria de autopartes en México mantiene una tendencia de crecimiento sostenido. En los últimos cinco años, el sector automotriz ha alcanzado cifras récord tanto en producción (82,000 millones de dólares anuales) como en exportaciones (65,000 millones de dólares anuales). Actualmente, México es el sexto productor más grande del mundo y la expectativa es que en los próximos años el país avanzara varias posiciones, se prevé que para 2023 la producción de autopartes en México alcanzará un valor de 100,000 millones de dólares, lo que situara al país como el cuarto lugar mundial de producción, detrás de China, Estados Unidos y Japón [12].

En el sector de autopartes en México mejoro su posición como proveedor de Estados Unidos, pasando de representar el 23% de las importaciones en 1995 a 34% en 2013, lo cual lo coloco como principal proveedor de autopartes, superando a Canadá y a Japón [10].

Entre los materiales que de manera progresiva y contundente está siendo utilizado en la fabricación de automóviles se encuentran los polímeros, que dadas sus propiedades atractivas para satisfacer algunos de los requisitos de diferentes componentes y cualidades de un auto, están marcando la deferencia en algunos aspectos en relación con otros materiales.

De acuerdo con las cifras de crecimiento el sector de autopartes el uso de polímeros ha crecido considerablemente esto se debe a la búsqueda constante de crear automóviles más ligeros. Hoy en día un vehículo liviano puede contener más de 1,000 componentes plásticos [11].

La ligereza en el peso de los plásticos es un beneficio claro para la industria del automóvil, no sólo porque se consigue reducir el peso total de éstos de modo que se reduce también el consumo de combustible a los límites permitidos por la legislación, sino también permite realizar sistemas y componentes más sofisticados, tales como sistemas de control de temperatura en el coche y ventilación de este, por mencionar sistemas adicionales de seguridad como la ya bien conocido bolsa de aire.

Teniendo en cuenta los tipos de materiales utilizados en la fabricación de las piezas que componen un vehículo, se encuentra que aproximadamente el 14% serian materiales plásticos. La distribución de estos plásticos según diferentes partes o sistemas en las que se puede dividir un vehículo es aproximadamente en acabados interiores se observa el mayor porcentaje de utilización, en segundo lugar, en lugar en cuanto a mayor porcentaje de utilización seria la carrocería y la utilización de plástico en paneles aporta la ventaja frente al acero, de un mejor comportamiento frente a los impactos a baja velocidad y una reducción del peso de las piezas.

Para el caso de los paneles, los plásticos con los que se obtiene un mejor resultado son con los termoplásticos transformados por inyección, con los que se consigue unos buenos acabados superficiales y a un coste razonable. Sin embargo, para las piezas que necesitan una buena rigidez y un buen comportamiento a temperaturas elevadas, se utilizan los termoestables reforzados con fibra, aunque presentan mayor fragilidad frente a impactos [13].

### **2.2.3. Principales polímeros en la producción de autopartes**

Entre los materiales plásticos más utilizados en automatización se encuentran los termoplásticos, los termoestables y los elastómeros [13].

### 1.2.3.1. Termoplásticos

Están formados por macromoléculas lineales o ramificadas, no entrelazadas. En general son duros, fríos y al calentarlos se reblandecen y fluyen. Sus propiedades mecánicas dependen en gran medida del grado de polimerización y del proceso mecánico de su preparación. Entre los más utilizados se tienen los siguientes (figura 9).

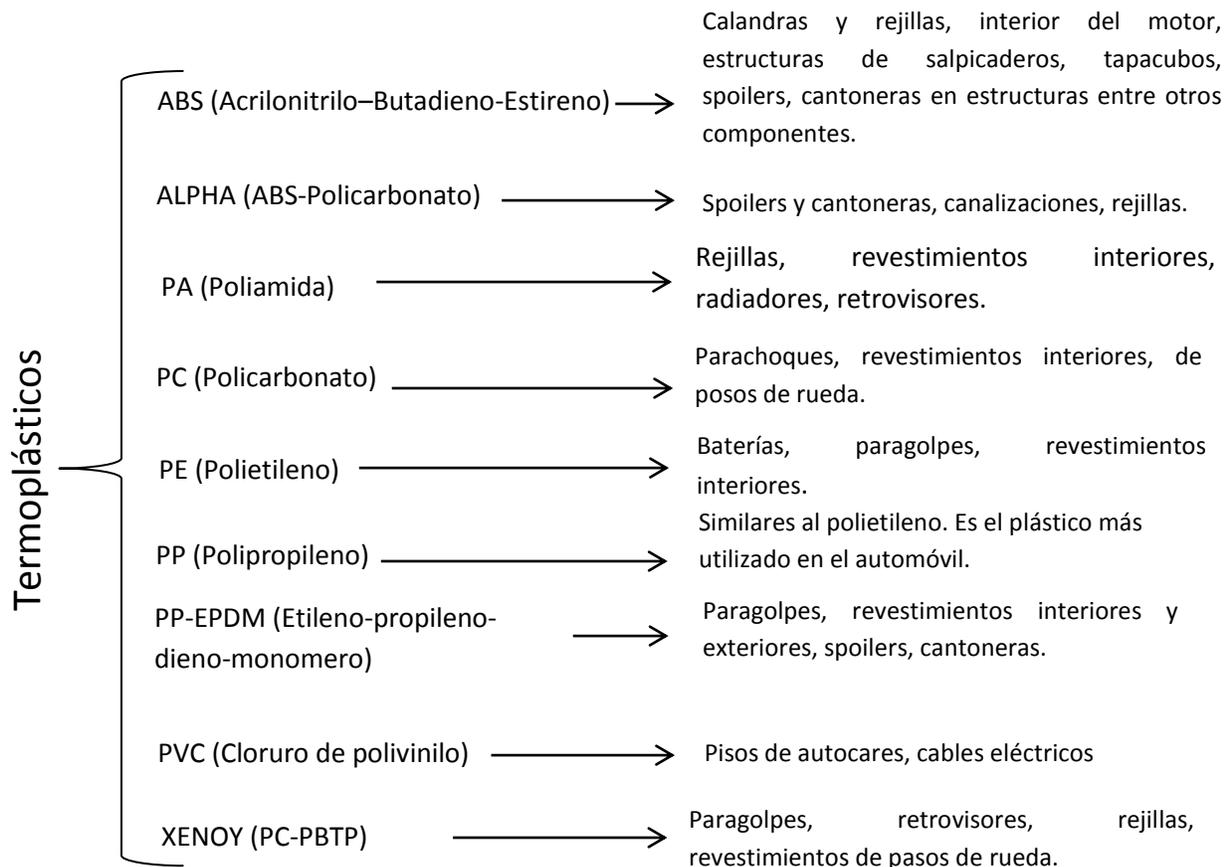


Figura 9. Termoplásticos utilizados para la fabricación de autopartes



### 2.2.3.2. Termoestables

Se denominan así por no sufrir ninguna variación en su estructura al ser calentados; no se reblandecen ni fluyen al ser sometidos a presión o a calor, siempre que no se llegue a la temperatura de descomposición. Derivados del fenol, su principal propiedad estriba en su resistencia mecánica. Entre los más utilizados se tienen (figura 10).

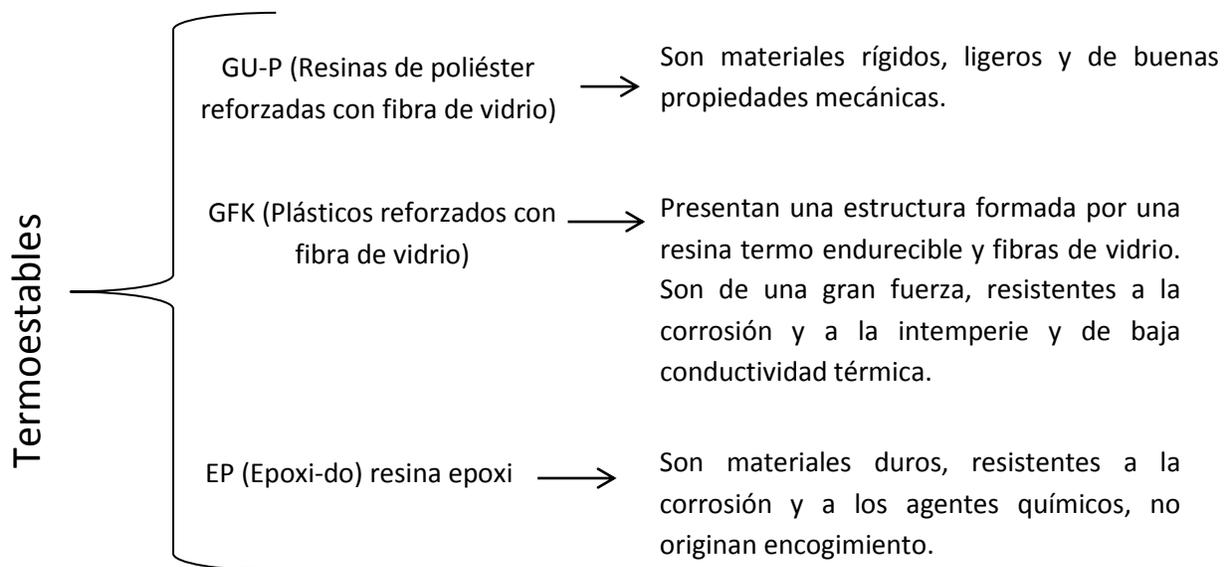


Figura 10. Termoestables utilizados para la fabricación de autopartes

Los plásticos utilizados en la industria automotriz así, como sus porcentajes se muestran en la figura 11.

Como se puede observar los polímeros que más se utilizan en la elaboración de autopartes del sector automotriz son el acrilonitrilo butadieno estireno y las poliamidas, ambas con un porcentaje del 31%.

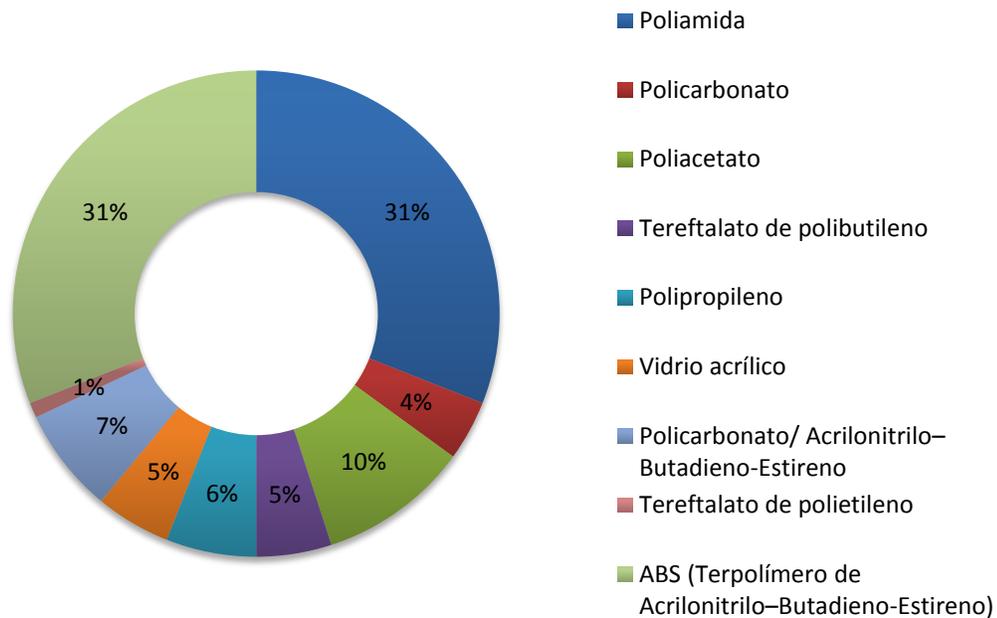


Figura 11. Polímeros utilizados en la fabricación de autopartes, [14]

En general, los polímeros presentan baja resistencia mecánica y baja rigidez en comparación con los metales. El módulo de elasticidad de los termoplásticos, en la mayoría de los casos, aproximadamente 2 GPa (100 veces menos que el acero) y los valores de resistencia mecánica son aproximadamente 5 veces menores que en los metales. Para aumentar la rigidez y resistencia de lo termoplásticos es mediante refuerzos del polímero con partículas o fibras formando un material compuesto o composite. La mayoría de termoplásticos son reforzados con fibras. El material más empleado como fibra de refuerzo (95% del total) es la fibra de vidrio, aunque las fibras de carbón también son usadas en requerimientos de alta rigidez, alta resistencia a la fatiga y poco peso específico. Sin embargo, las fibras de carbón son mucho más caras que las fibras de vidrio.

Entre las matrices termoplásticas más empleados se encuentran el nylon 6,6, el polipropileno el PEEK o poly-ether-ketone fabricado por ICI, que es un polímero relativamente nuevo de muy buenas propiedades mecánicas y que pueden ser usado a altas temperaturas, pero a un alto costo [15].



### 2.2.3.3. ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)

Es un termoplástico duro, resistente al calor y a los impactos. Es un copolímero obtenido de la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno, resultando de la combinación de los tres monómeros, originando un plástico que se presenta en una gran variedad de grados dependiendo de las proporciones utilizadas de cada uno.

Básicamente, el estireno contribuye a la facilidad de las características del proceso. El acrilonitrilo imparte la resistencia química e incrementa la dureza superficial y el butadieno contribuye a la fuerza de impacto y dureza total. Las proporciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno.

Principales aplicaciones: se aplica en partes de electrodomésticos, carcasas de teléfono, computadoras, impresoras fotocopadoras, en la industria automotriz (tableros, guanteras, carcasas de espejos, faros, etc.), decoración, juguetes, entre otros [16].

### 2.2.3.4. Poliamidas

Las poliamidas o nylon fueron los primeros materiales en ser conocidos como termoplásticos de ingeniería, debido a sus propiedades mecánicas superiores, especialmente al ser expuestos a elevadas temperaturas o en contacto con solventes. Estas propiedades les permitieron a las poliamidas ser usadas en aplicaciones previamente denominadas solo por los metales.

El mercado está denominado por dos productos, uno preparado a base hexametildiamina y ácido adípico, el cual es el nylon 6,6 (6 átomos de carbono en la diamina y en el ácido respectivamente), cubriendo casi la mitad del total del nylon producido. La poliamida preparada a partir de la apertura del anillo de la caprolactama o nylon 6, es la segunda poliamida en consumo. Otros productos de importancia comercial son las poliamidas 6.9; 10 y 11, basadas en el ácido azelaico, ácido sebácico y ácido 11-aminoundecanoico del aceite de castor y las poliamidas 6.12 y 12 basadas en el ácido dodecanoico y lauro lactama a partir de butadieno. Estos últimos tipos de poliamidas generalmente ofrecen menor absorción de humedad y mejor resistencia a la propagación de fracturas, pero sacrifican costos y propiedades térmicas y de rigidez.

Principales aplicaciones: las poliamidas tienen un intervalo muy amplio de aplicaciones, como en el sector automotriz, donde su translucidez y buen desempeño a altas temperaturas son la clave para su uso tanto en engranes, valeros, y piezas mecánicas, como en partes eléctricas, sustituyendo cada vez más partes metálicas [17].

## 2.3 Generación y disposición final de los polímeros

La producción y el consumo de autopartes generan inevitablemente algún tipo de residuos. Esto son sólidos de naturaleza orgánica e inorgánica. En función de su composición, tasa de generación y manejo pueden tener efectos muy diversos en la población y en el ambiente. En algunos casos, sus efectos pueden ser graves, sobre todo cuando involucran compuestos tóxicos que se manejan de manera inadecuada.

### 2.3.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)

La importancia del tema de la generación y manejo de los residuos no involucra sólo los efectos ambientales y de salud pública derivados de su generación y manejo. La gestión integral de los residuos, además de procurar reducir su generación y conseguir su adecuada disposición final, también puede dar como resultado colateral la reducción, tanto de la extracción de recursos, como de energía y agua que se utilizan para producirlos, así como la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero.

En 2012 la producción mundial de residuos sólidos urbanos (RSU) se calculó en alrededor de 1300 millones de toneladas diarias, y se estima que podría crecer hasta los 2200 millones en el año 2025. En el año 2010, cerca del 44% de los RSU producidos en el planeta correspondieron a los países con las economías más desarrolladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).

En México, según la cifra más reciente publicada en 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 61.2% con respecto a 2003 [18].

La intensificación de la industrialización que se presentó en México durante la segunda mitad del siglo pasado, produjo una mayor demanda de materias primas, con la finalidad de satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una

población en aumento, con patrones de consumo cambiantes y cada vez más demandantes. A la par crecieron la generación de residuos de distintos tipos y los problemas asociados para su disposición adecuada, así como las afectaciones a la salud humana y a los ecosistemas [19].

En función de sus características y orígenes, se les clasifica en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

La norma NOM-052.SEMARNAT-2005, clasifica a los polímeros como desechos peligrosos para su disposición final, esto se debe a su toxicidad, que con el paso del tiempo eliminan sustancias que provocan efectos adversos en la salud o en los ecosistemas, pero se consideran como residuos urbanos para su recolección [20].

En cuanto su composición, los RSU también han cambiado de manera importante en las últimas décadas en el país. En general la composición depende, entre otros factores de los patrones de consumos de la población: países con menores ingresos producen menos residuos, dentro de los cuales dominan los de composición orgánica, mientras que, en los países con mayores ingresos, los residuos son mayormente inorgánicos a partir de productos manufacturados y con un porcentaje mayor de productos y desechos [21].

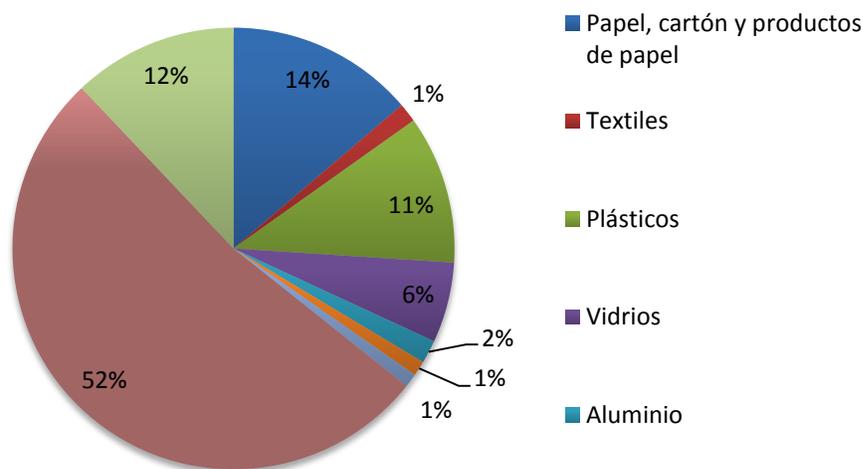


Figura 12. Composición de los RSU en México, 2012 [22]

El caso de México ilustra la transformación entre ambos tipos de economías: en la década de los 50, el porcentaje de residuos orgánicos en la basura oscilaba entre 65 y 70% de su volumen, mientras que para 2012 esta cifra se redujo al 52.4% y el 10.9% representa los residuos plásticos, figura 12.

El manejo adecuado de los RSU tiene como objetivo final, proteger la salud de la población, reduciendo su exposición a lesiones, accidentes, molestias y enfermedades causadas por el contacto con desperdicios y evitar el impacto potencial que podrían ocasionar sobre los ecosistemas. Sin embargo, la situación del manejo de estos residuos dista mucho de ser adecuada a lo largo del país. Aun a la fecha es relativamente común que estos se depositan en espacios cercanos a las vías de comunicación o en depresiones naturales del terreno como cañadas, barrancas y cauces de arroyos [22].

### **2.3.2. Etapas de manejo de los RSU en México**

En el ciclo de vida de los residuos, después de su generación existen diversas etapas importantes para su manejo, entre las que destacan su recolección, reciclaje y disposición final, [22].

#### **2.3.2.1. Recolección**

La recolección es un servicio público que comprende la colecta de los RSU en el sitio donde se producen (usualmente las casas, las industrias, los comercios o los edificios públicos) y su traslado hasta el sitio donde se tratan o disponen. Desde el punto de vista ambiental y de salud pública, tiene una relevancia fundamental, además de que los residuos que se colectan (al menos una parte de ellos) pueden ser recuperados o dispuestos adecuadamente. En contraste, aquellos que como: obstruir desagües y cursos de agua (con potenciales riesgos de inundaciones), contaminar los cuerpos de agua y los suelos, deteriorar el paisaje o convertirse en fuente de enfermedades potenciales a la población, entre otros [22].

#### **2.3.2.2. Reciclaje**

El reciclaje se define como la transformación de los residuos mediante distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicios a la salud, los ecosistemas o sus elementos [23].

En el proceso exacto de reciclaje, se puede diferenciar a grandes rasgos 4 formas diferentes de reciclar:

- Reciclaje mecánico

Responde a todas las técnicas y procesos que incluyen trabajo manual o ayudado por maquinas. Este tipo de reciclaje se utiliza en la clasificación de residuos mezclados y en el reciclaje del plástico.

- Reciclaje químico

Incluye técnicas y procedimientos que implican cambios en la estructura química del material. Se busca la descomposición del polímero para la obtención del monómero. Ejemplos de este tipo son la pirolisis, hidrogenación, craqueo térmico, disolución, hidrólisis, metano-lisis y glicolisis.

- Reciclaje energético

Se trata de residuos que no pueden ser clasificados y recuperados, bien por imposibilidad técnica p económica, y en lugar de llevarlos a vertederos se aprovechan de este modo.

- Reciclaje biológico

Es toda operación de tratamiento que busca la degradación de toda la materia orgánica en presencia o en ausencia de oxígeno.

A pesar de que el volumen de RSU que se recicla en el país se ha incrementado en los últimos años, aún resulta bajo. De acuerdo con las cifras obtenidas en los sitios de disposición final, en 2012 se reciclo 4.8% del volumen de RSU generados, obstantes, esta cifra podría alcanzar el 10% en virtud de que muchos de estos son susceptibles de reciclarse si se recuperan antes de llegar a los sitios de disposición final, en los contenedores como en los vehículos de recolección.

Del volumen total de RSU reciclados en 2012, el mayor porcentaje correspondió a papel, cartón y productos de papel (32%), seguido por el PET (15.8%), vidrio (13.8%), plásticos (9.2%), metales (7.6%) y los electrónicos y electrodomésticos, figura 13. Si se considera el volumen reciclado de cada tipo de RSU con respecto a su volumen producido, los sólidos que más se reciclaron en 2012 fueron los

metales (39%), el vidrio (23.5%) y el papel (14.7%). De los plásticos y textiles desechados solo se recicla alrededor del 0.5 % de cada uno de ellos, [22].

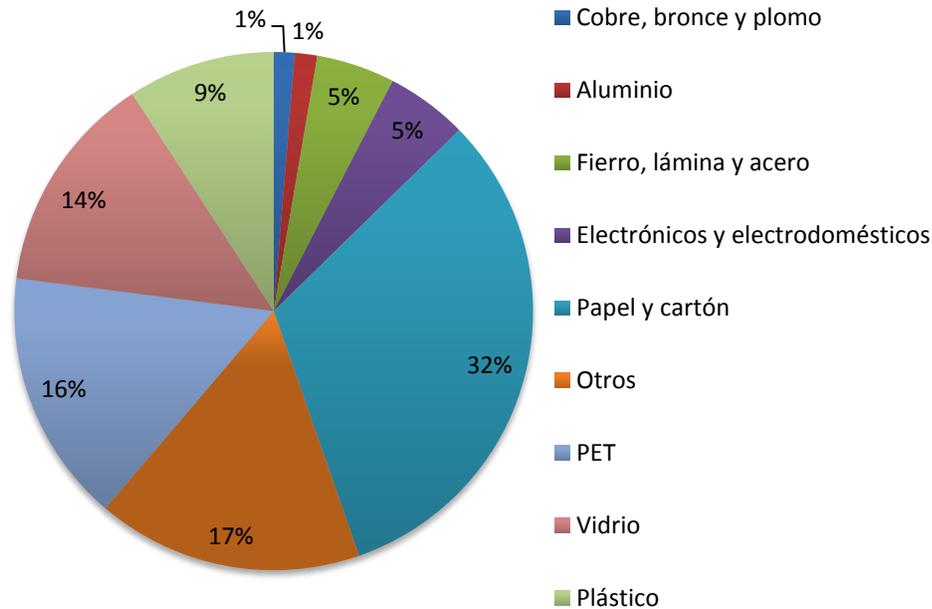


Figura 13. Composición de los RSU recolectados valorizables, la cantidad se expresa en porcentaje por día [22]

### 2.3.2.3. Disposición final

La disposición final de los residuos se refiere a su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su presencia en el ambiente y las posibles afectaciones a la salud de la población y de los ecosistemas.

En el país se cuenta con dos tipos de disposición final, los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados. Los rellenos sanitarios constituyen la mejor solución para la disposición final de los residuos urbanos; este tipo de infraestructura involucra métodos y obras de ingeniería particulares que controlan básicamente la fuga de lixiviados y la generación de biogases. Por su parte, los rellenos de tierra controlados, aunque comparten las especificaciones de los rellenos sanitarios en

cuanto a infraestructura y operación, no cumplen con las especificaciones de impermeabilización para el control de los lixiviados.

En general, los avances en materia de rellenos sanitarios se han dado principalmente en las grandes ciudades. Cuando se analiza la disposición adecuada de los residuos por localidad, en 2012 el 90% de las zonas metropolitanas disponían sus residuos en rellenos sanitarios y sitios controlados, mientras que tan solo el 4.5% en las localidades rurales o semiurbanas lo hacía del mismo modo.

En la actualidad todas las entidades, excepto la Ciudad de México (CDMX), cuentan con rellenos sanitarios para disponer sus residuos, figura 14. Los residuos de CDMX se disponen en cuatro rellenos sanitarios en el Estado de México: La Cañada, Cuautitlán, El Milagro y Tepoztlán. Las entidades que tienen más rellenos sanitarios son el Estado de México (28), Jalisco (27), Veracruz y Chihuahua (con 18 cada uno) y Guanajuato [24].

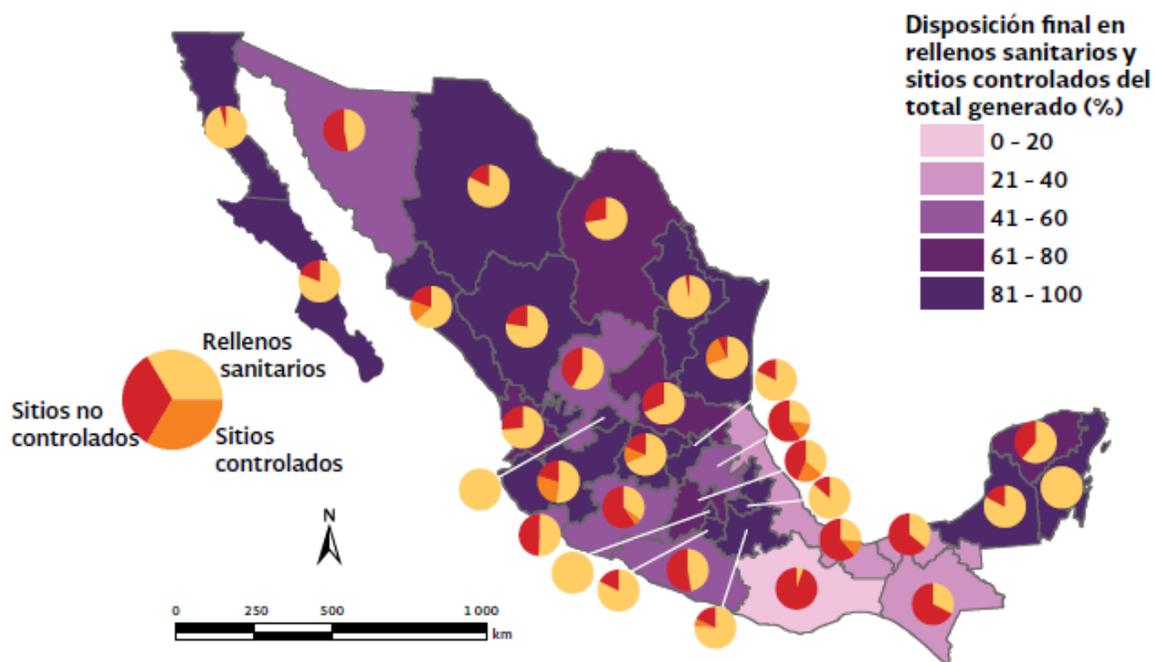


Figura 14. Disposición final de RSU en rellenos sanitarios, sitios controlados y no controlados, así como el número de rellenos sanitarios por entidad federativa [22]

## Planteamiento del proyecto de investigación

Debido a la problemática ambiental relacionada directamente con el manejo de los residuos sólidos que afecta al ser humano y a su entorno de diferentes maneras, especialmente en salud pública, recursos renovables y no renovables, factores sociales, los recursos naturales entre otros problemas por la disposición final de estos. Se hace hincapié en el reciclaje de algunos materiales poliméricos aumentando el ciclo de vida para lograr disminuir estos efectos negativos. El proceso de reciclaje depende de cada residuo y en el modo en que se encuentre, por lo cual puede clasificarse en 4 categorías: Reciclaje mecánico, químico energético y biológico. Sin embargo y como ya se ha mencionado antes el reciclaje químico puede ayudar a reducir la proporción de residuos plásticos que terminan en vertederos o incineración.

Los plásticos tienen beneficios comprobados durante su fase de uso, por ejemplo, la conservación de la pérdida de alimentos, la construcción liviana de vehículos y los aislamientos de edificios. Sin embargo, la presencia de plásticos en los residuos se ha incrementado de forma continua en las últimas décadas.

En México los plásticos constituyen el 12.88% de los residuos sólidos urbanos, aunque debido a su baja relación masa/volumen, su proporción en el espacio ocupado en los rellenos es hasta 2.5 veces mayor. Su presencia en los residuos contribuye de manera importante es la saturación de los rellenos, lo que a la larga lleva a buscar sitios de disposición cada vez más alejados de los puntos de generación aumentando el costo del manejo de residuos.

Además de los problemas asociados a su manejo con residuos, los plásticos generan impactos en el ambiente en otras etapas de su ciclo de vida. Uno de sus efectos más notables es su contribución al agotamiento de los recursos no renovables, ya que se calcula que el 4% del petróleo y gas extraído se usa como materia prima para la producción de plásticos, y entre 3 y 4% para generar la energía requerida en su manufactura [25].

Tomando en cuenta lo antes mencionado se propone el estudio de la producción y disposición final de los residuos poliméricos del termoplástico nylon 6,6 utilizado en la producción de autopartes para el sector automotriz en el Estado de Morelos para responder y aportar información sobre su impacto ambiental, así, como proponer una solución a esta problemática. Esto es, la recuperación de este para la formación de recubrimientos en forma de película para aumentar el tiempo de

vida útil del acero. En la cual se modificar la superficie del material metálico por medio de tratamiento mecánico (lijado), químico y por plasma. Una vez formado el recubrimiento sobre el sustrato se harán pruebas de morfología, adhesión y caracterización química, electroquímica y térmica.

Por esta razón, este trabajo de investigación se centra en el estudio de recubrimientos de nylon 6,6 reciclado obtenidos mediante las técnicas de inmersión y spin coating a diferentes concentraciones, así como su impacto ambiental.

## Hipótesis

El recubrimiento de nylon 6,6 reciclado en forma de película disminuye su impacto ambiental por presentar un menor ciclo de vida y por tanto una degradación con mayor facilidad en el medio ambiente.

## Justificación

Dado que la producción de autopartes para el sector automotriz en el Estado de Morelos utiliza para su producción una gran cantidad de el polímero termoplástico nylon 6,6, cuya disposición final no está bien regulada ni establecida.

Actualmente esta disposición final de los residuos se hace sobre vertederos o no se sabe su disposición final, lo cual crea un impacto ecológico grande. Por lo que este proyecto propone estudiar y analizar la producción y disposición final de los residuos poliméricos del termoplástico nylon 6,6 utilizado en la de autopartes para el sector automotriz en el Estado de Morelos.

## Objetivos

### General:

Reciclar y estudiar el polímero nylon 6,6 para formar recubrimientos poliméricos en forma de película sobre acero inoxidable 316L. Así como, investigar su degradación en un medio corrosivo y evaluar el impacto ambiental.

### Específicos:

- ✓ Reciclar el polímero para la formación de películas delgadas sobre acero inoxidable 316L.
- ✓ Analizar químicamente los grupos funcionales del polímero.
- ✓ Estudiar la adherencia del sistema-sustrato.
- ✓ Medir ángulo de contacto del recubrimiento.
- ✓ Investigar electroquímicamente la corrosión del sistema-sustrato.

## Capítulo 3: Marco teórico

### 3.1. Corrosión

Los metales experimentan cambios y transformaciones, debido a su interacción con el medio ambiente natural o de servicio, donde están expuestos a una o varias condiciones agresivas, que destruyen el metal gradualmente, convirtiéndolo en producto de la corrosión. La corrosión se define como un proceso espontáneo de degradación de los metales, debido a su interacción fisicoquímica con el ambiente que los rodea, como resultado de la cual ocurren cambios en las propiedades del metal, que lo pueden llevar a su destrucción o su pérdida de funcionalidad [26].

#### 3.1.1. Tipos de corrosión

La clasificación de los procesos de corrosión se puede hacer mediante las condiciones en las cuales se desarrollan o según el carácter de la destrucción del metal, de los cuales pueden distinguirse los siguientes tipos:

##### a. Corrosión en gases

Cuando un metal está expuesto en ambientes de gases en ausencia completa de humedad, lo que ocurre eventualmente a altas temperaturas.

##### b. Corrosión en medios no electrolitos

Corrosión que ocurre cuando los metales están expuestos a medios líquidos orgánicos no polares (no conductores).

##### c. Corrosión en electrolitos

Corrosión que sufren los metales al estar expuestos a soluciones acuosas o sustancias que forman electrolitos tales como: ácidos, bases, sales, agua de mar, agua dulce etcétera. Dependiendo del medio, la corrosión es algunas veces denominada ácida, alcalina marina en aguas etcétera.

##### d. Corrosión de contacto

Corrosión electroquímica que resulta del contacto de metales de diferente naturaleza.

### **e. Corrosión bajo tensión**

Corrosión de metales, como resultado de la acción conjunta del ambiente corrosivo y de una deformación del metal, resultante de fuerzas/tensiones residuales o aplicadas. Cuando la deformación mecánica aplicada sobre el metal es cíclica en presencia de tensiones que cambian su dirección, el fenómeno resultante se conoce como corrosión fatiga.

### **f. Corrosión por erosión**

Resultante de la acción conjunta de la corrosión y la erosión, en presencia de un efecto de fricción por parte del mismo ambiente corrosivo u otros cuerpos sólidos. Este es el caso más común de corrosión que sufre el cuerpo metálico de las bombas o tuberías que transportan líquidos a alta velocidad, así mismo, líquidos que contienen partículas abrasivas en forma de suspensión.

### **g. Corrosión por cavitación**

Fenómeno resultante de la acción conjunta de corrosión y cavitación, como fuerza actuando en forma de golpes ejercidos por parte del ambiente corrosivo.

### **h. Corrosión en hendiduras**

Corrosión que se desarrolla en aberturas muy estrechas, hendiduras o grietas en el metal o entre dos superficies de contacto, llenas de electrolito, donde preferentemente se desarrolla corrosión localizada.

### **i. Corrosión bacteriana**

Se debe a la acción de bacterias u otros microorganismos. Esta corrosión de metales ocurre en suelos o medio acuosos.

### **j. Corrosión Atmosférica**

La corrosión atmosférica es un fenómeno tan cotidiano como potencialmente destructivo, consumidor de recursos (humanos y materiales) y tiempo. Durante el siglo que acaba de terminar, se dieron muchos e importantes pasos hacia la comprensión de este tipo de corrosión. Existe mucha información sobre la corrosión atmosférica de los metales, obtenida de forma independiente por distintos investigadores, en diferentes partes del mundo y, en el último decenio, se han llevado a cabo diversos estudios de colaboración, en los que ha intervenido un elevado número de países [27].

Sin embargo, los metales sufren cambios y transformaciones debido a su interacción con el medio ambiente natural o de servicio, donde están expuestos a una o varias sustancias agresivas, que destruyen gradualmente al metal, formando productos de la corrosión y la principal causa de pérdidas de corrosión. Estas están calculadas en 50% de las pérdidas totales por corrosión de un país, que se aproximan a un total del 4 y 6% del producto interno bruto [28].

Los análisis muestran que los daños por corrosión pueden disminuir aplicando métodos apropiados de protección anticorrosiva para modificar el sistema de corrosión, preservando la integridad de los metales. Las modificaciones pueden contemplar tratamiento del medio ambiente aplicando inhibidores o la aplicación de medios de protección anticorrosiva a la superficie del metal con recubrimientos metálicos, de pintura, de conversión química o protección electroquímica adecuada (protección anódica o protección catódica).

Algunas tecnologías, pese a tener una serie de ventajas, muestran también algunas limitaciones en cuanto diferentes aspectos. Particularmente, el que muestren porosidad, permite que cuando deben responder ante medios corrosivos, pueda darse un mayor nivel de ataque a través de dicha porosidad [29].

### 3.1.2. Recubrimientos poliméricos y su aplicación en metales

Un recubrimiento es la aplicación de un espesor finito de algún material sobre el metal. Es la transformación de su superficie por medios químicos o electrólitos para lograr un óxido de metal. Los recubrimientos se utilizan para aislar las regiones anódicas y catódicas, también impiden la difusión de oxígeno o de vapor de agua que inicia la corrosión u oxidación [30].

El objetivo principal del recubrimiento o acabado es mejorar la apariencia y el valor de venta de artículo; a la mayoría de los metales se les cubre para proporcionarle una resistencia permanente al desgaste, a la descomposición electrolítica y al contacto con la atmósfera corrosiva.

Los recubrimientos protectores tienen como objetivo cubrir los objetos de tal manera que el metal base quede completamente aislado del medio agresivo. De ello se deduce principalmente que las piezas a recubrir deben estar acabadas de tal forma que no requiera ningún mecanizado posterior, ya que este deterioraría el recubrimiento. Se debe tener en cuenta las normas establecidas respecto a los

espesores mínimos de los recubrimientos a las consideraciones económicas. Uno de los recubrimientos más importantes es por aislamiento eléctrico del material (pinturas, resinas, depósitos metálicos y no metálicos de espesor suficiente).

### *Tipos de recubrimiento*

- Polímeros
- Metálicos
- No metálicos

Los polímeros son materia formada por moléculas que pueden ser de tamaño unitario o moléculas gigantes llamados monómeros. Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas unitarias denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones. Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño unitario son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases [31].

- Dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser: naturales o sintéticos
- Según su mecanismo de polimerización: por condensación o adición.
- Según sus aplicaciones: elastómeros, plásticos, fibras, recubrimientos y adhesivos

### **3.1.2.1. Técnica de síntesis y formación del recubrimiento**

#### ***3.1.2.1.1. Disolución***

El grado en que una sustancia se disuelve en un líquido depende tanto de la naturaleza del soluto como la del solvente, así como de la temperatura. Al final del proceso de disolución del sólido, se alcanza un estado de equilibrio dinámico cuando las concentraciones de los iones disueltos son tales que las fuerzas impulsoras de las dos tendencias opuestas (mayor entropía y menor energía) son iguales.

En algún momento, se alcanza la igualdad entre la velocidad de disolución del soluto y su velocidad de cristalización. Se alcanza así un equilibrio dinámico entre el sólido en exceso (sin disolver) y sus iones en solución, llamado equilibrio de solubilidad; en esta situación la cantidad neta de soluto disuelto en la solución se hace constante [32].

### **3.1.2.1.2. Inmersión**

La técnica por inmersión es un método que permite la formación de películas delgadas para diferentes espesores sobre sustrato. El método involucra una inmersión de un sustrato en un reservorio de solución durante un corto periodo de tiempo, de manera de asegurar que el sustrato se moje totalmente y luego se retira de la solución. Después de que el solvente se haya evaporado, queda una película uniforme depositada sobre la superficie del sustrato. Modelar este proceso resulta importante porque ayuda a la comprensión de la deposición de la película, su uniformidad y finalmente el grosor de esta. Desde el punto de vista hidrodinámico, este es un problema de una superficie libre, en la cual la evaporación juega un papel fundamental.

Una capa límite es el fluido localizado entre una superficie sólida y la solución en la cual está inmersa. Un sustrato en movimiento arrastra la capa límite; en el caso de que el sustrato ascienda emergiendo de la solución, la capa límite se divide en dos: La capa interna o ascendente que sube junto con el sustrato y la capa exterior o descendente que retorna a la solución. El espesor de la película depositada está relacionado con la posición a la cual se dividen la capa ascendente y la descendente de la solución. Esta posición depende a su vez del balance de por lo menos tres fuerzas, la viscosa de arrastre, la de gravedad y la debida a la tensión superficial en el mecanismo cóncavo [33].

## **3.2. Técnicas de caracterización**

Las técnicas de caracterización tienen como finalidad conocer cualitativa y cuantitativamente cómo está constituido químicamente la superficie y que cambios sufre a consecuencia de una reacción química, por ejemplo.

### 3.2.1. Técnicas electroquímicas

Las técnicas electroquímicas estudian las propiedades eléctricas de una disolución en la llamada “célula electroquímica”. Una característica de estas técnicas es que miden actividades no concentraciones de analito.

#### 3.2.1.1. Potencial a circuito abierto

Cuando un metal se sumerge en un electrolito, como resultado del intercambio de cargas eléctricas en la interfaz del metal y solución electrolítica como, por ejemplo, transporte de cationes desde el metal hacia el electrolito o viceversa, o la adsorción de iones o moléculas polares de la solución sobre la superficie metálica, surge un salto de potencial, llamado potencial del electrodo (P.E.). Su valor absoluto no se puede calcular ni medir. Por lo tanto, para determinar el valor P.E. es necesario armar una celda electrolítica con un electrodo del metal y otro electrodo de referencia (E.R.), sumergirlos en el mismo conductor iónico y medir el voltaje del circuito externo así formado.

Este voltaje se reconoce también como fuerza electromotriz ( $fem$ ), los valores de los electrodos son medidos habitualmente con respecto al valor del electrodo de hidrogeno saturado [34].

#### 3.2.1.2 Curvas de polarización

La polarización, o movimiento del potencial con respecto a  $E_{corr}$  se consigue con una fuente de corriente constante, rompiendo el equilibrio que se da en el potencial de corrosión entre las corrientes de oxidación y de reducción.

Al estudiar en fisicoquímica la cinética de las reacciones químicas o electroquímicas, se encuentra que las velocidades de reacción están limitadas por una barrera de potencial que separa el estado inicial del final. En las reacciones electroquímicas, se pueden modificar tales barreras, la velocidad del proceso, por tanto, mediante variaciones del potencial del electrodo, es decir, polarizándolo.

En los valores de las barreras de potencial intervienen varios componentes individuales, los más significativos de los cuales, en corrosión son:

- Polarización de activación,  $\eta_a$
- Polarización de concentración,  $\eta_c$
- Polarización de resistencia,  $\eta_r$

Los distintos tipos de polarización condicionan las etapas parciales de los procesos de corrosión. En toda la reacción de corrosión intervienen un cierto número de etapas en serie, las más lenta de las cuales contra la velocidad del proceso global. Tales etapas para un proceso simple de corrosión son:

- 1.- Generación de cationes y electrones en la interfaz metal/electrolito, en las áreas anódicas de las pilas locales.
- 2.- Absorción y disociación de las moléculas de oxígeno, seguida de una ionización por medio de los electrones liberados, en las áreas catódicas, supuesto electrolito neutro o alcalino.
- 3.- Transporte de los productos de reacción,  $Me^{++}$  y  $OH^-$ , hacia el seno de la solución y de los reactantes, moléculas de oxígeno, en sentido contrario, a través de la capa de tránsito o difusión que rodea el electrodo.

La mayor o menor resistencia entre las áreas anódicas y catódicas, de transporte, según sea la dificultad que presente al movimiento de las partículas cargadas [29].

### 3.2.1.3 Impedancia

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna que se aplica a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente.

En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial a un electrodo y se mide su respuesta en corriente a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña en corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencia- tiempo y corriente-tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina "Espectro de impedancia".

En el caso de los estudios de corrosión que utilizan la técnica de EIS, los espectros de impedancia suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C),

inductancias (L), etc. Combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”.

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizando en circuitos de corriente alterna. En un circuito de corriente directa la relación entre la corriente y el potencial es dada por la ley de Ohm.

### 3.2.3. Caracterización química

Las técnicas espectroscópicas de análisis se fundamentan en el monitoreo de las interacciones que se dan entre la radiación electromagnética y la materia. Cuando la radiación electromagnética incide sobre la materia se pueden evidenciar distintos efectos o fenómenos que permiten obtener la información sobre la estructura. Entre estos efectos se pueden mencionar la ionización de las moléculas, transiciones electrónicas entre los orbitales atómicos y moleculares, deformación y rotación de los enlaces químicos, los cuales se enmarcan en los fenómenos de absorción, emisión, dispersión y desviación de la luz por la materia.

#### 3.2.3.1. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Este tipo de espectroscopia, usualmente conocida como FTIR, por sus siglas en inglés Fourier Transform Infrared, brinda información sobre los grupos funcionales de las moléculas constitutivas de material analizado. Es una técnica muy desarrollada que consiste en la absorción de energía procedente de una fuente de luz infrarroja en longitudes de onda específicas que corresponden a las frecuencias de resonancia o vibración de las moléculas. En términos generales, su implementación implica la disposición de una pequeña cantidad de la muestra en una celda, la cual se ilumina con un barrido de luz infrarroja desde longitudes de onda que pueden ir desde 4000 hasta 400  $\text{cm}^{-1}$ , y con resoluciones variables desde 8 hasta 10<sup>2</sup>  $\text{cm}^{-1}$ , de longitud de onda. De esta forma, la cantidad de luz absorbida se puede conocer por diferencia entre la intensidad de luz incidida sobre la muestra y la transmitida por esta.

Un espectro de absorción en el infrarrojo representa la absorbancia o el porcentaje de transmitancia versus la frecuencia ( $\text{cm}^{-1}$ ) o longitud de onda ( $\lambda$ ). Dado que el movimiento vibracional puede ser complejo, el análisis del espectro de infrarrojo se simplifica dando lugar a un número de vibraciones constitutivas, llamado modos

normales de vibración, asociados a las transmisiones entre niveles de energía vibracional diferentes dentro del mismo estado energético, vibraciones de tensión y flexión: tijeeteo, balanceo, aleteo y torsión. Estos modos normales dependen exclusivamente del tipo y número de átomos que contenga la molécula y, por consiguiente, de sus grados de libertad [35].

### 3.2.3.2. Espectroscopia de Raman

La espectroscopia de Raman es una técnica fotónica no-destructiva que permite el estudio de rotaciones y vibraciones moleculares en tiempos cortos a partir del seguimiento de rotaciones y vibraciones moleculares mediante la luz que dispersa la materia cuando incide sobre ella un haz de luz monocromático. El proceso de dispersión de la luz puede ser elástico, la luz dispersada presenta la misma frecuencia que el haz incidente, dispersión de Rayleigh; o inelástico, si presenta frecuencias distintas, dispersión de Raman. En el último caso se generan nuevas frecuencias conocidas como frecuencia Raman, que son las que permiten describir la composición y naturaleza química de la muestra.

Los estados energéticos o líneas horizontales se asocian a los movimientos rotacionales y vibracionales de la molécula. Un fotón incidente, procedente de una fuente laser de radiaciones monocromática visible o infrarroja, con un cuanto de energía mayor a la diferencia de energía existente entre dos estados energéticos vibracionales o rotacionales hace que la molécula alcance por poco tiempo un nivel energético superior no permitido de menor energía que un estado excitado, conocido como estado virtual, y retorna a un nivel permitido emitiendo un fotón a una frecuencia determinada. Estos saltos energéticos pueden variar, y por ende las frecuencias del fotón dispersado, evidenciando los dos fenómenos de dispersión de Raman. Dichos desplazamientos de frecuencias o longitud de onda son inherentes a la estructura química de la molécula ocasiona la dispersión [35].

### 3.2.3.3. Microscopia electrónica de barrido

Se basa en la detección y visualización de los electrones secundarios dispersados procedentes de la interacción del haz de electrones sobre la superficie de la muestra que se va a analizar.

En un microscopio electrónico de barrido, el haz de electrones tiene una potencia variable entre 1 y 50 keV, y se realizara con un vacío del orden de  $10^{-7}$  atmosferas en una cámara de descarga. El haz de electrones se focaliza sobre la superficie de una muestra, barriendo la superficie de esta. Los electrones secundarios y dispersados son captados por un detector, llevando la señal a un tubo de rayos catódicos donde es digitalizada. En este tubo la señal realiza un barrido de la pantalla de manera sincronizada con el movimiento del haz electrónico sobre la muestra formando una imagen aumentada de la superficie [36].

### 3.2.3.4 Difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X se ha empleado ampliamente como técnica de caracterización de materiales cristalinos. En este método de análisis, el material bajo investigación difracta los rayos X de una manera distintiva y los patrones de difracción obtenidos contribuyen a varias estructuras útiles características. La posición, la intensidad y la forma del pico son importantes en definición de parámetros de red, grupo espacial, composición química, estructura cristalina, textura, análisis de fase cualitativa, y cuantitativa y tamaño de cristal.

Esta técnica da información en términos de estructura de materiales cristalinos, de películas delgadas o policristalinos. En varias áreas de investigación se ha utilizado el análisis de XRD, incluyendo nanopartículas, polímeros nanocompuestos, semiconductores, campo biológico (ADN, vitaminas, proteínas), medicamentos y otros [37].

### 3.2.3.5 Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)

La capacidad del microscopio de fuerza atómica (AFM) para medir imágenes topográficas de alta resolución, fuerzas y elasticidad en una muestra, puede dilucidar una comprensión más completa de las relaciones estructura-función con un sistema combinado. Uno de los grandes beneficios de AFM es su capacidad para medir en múltiples escalas espaciales. La resolución de AFM en XY está limitada por el tamaño de la punta y, por lo general, es del orden de unos pocos nm, mientras que el límite superior de medición es del orden de 100 micrones. Sin embargo, la resolución en Z está limitada por el ruido electrónico y térmico, y es del orden de un Angstrom, con un rango de medición superior que puede ser de



varias decenas de micras además de medir la topografía física de las muestras. La saliente AFM se puede utilizar para medir fuerzas como la adhesión, la deformación y la elasticidad de la muestra midiendo la deflexión de la saliente frente a la separación entre la punta y la muestra, y aplicando modelos mecánicos de resorte simples [38].

## Capítulo 4: Metodología

### 4.1 Sustrato: Acero inoxidable

Se cortaron probetas de 1 cm<sup>2</sup> de acero inoxidable 316L, a las cuales se les realizó un tratamiento (químico, mecánico o plasma según sea el caso) con el objetivo de modificar la superficie y tener una mayor rugosidad, figura 15.

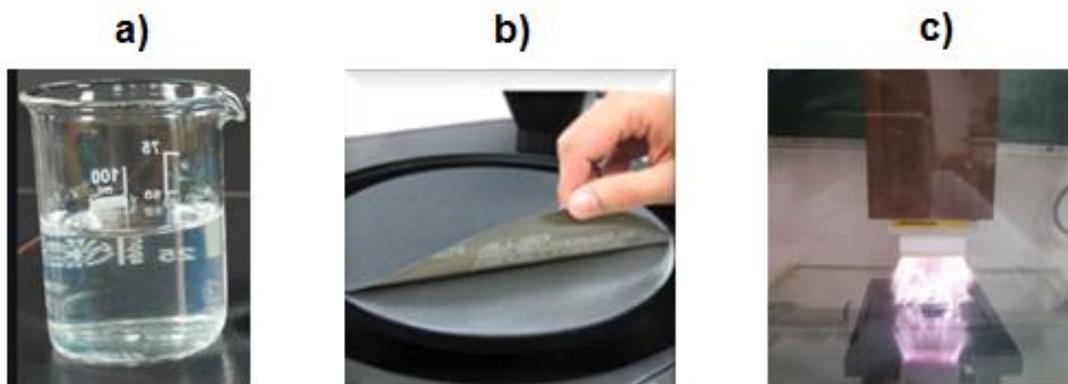


Figura 15. Tratamientos para modificar la superficie del sustrato: a) Químico, b) Mecánico y c) Plasma atmosférico

#### Tratamientos:

**Químico:** Se preparó una solución de 5 g/L de Hidróxido de Sodio (NaOH). Las probetas se sumergen en la solución alcalina por 60 segundos (s), se enjuagan con agua desionizada y posteriormente, se secan con acetona en condiciones atmosféricas y se colocan en cajas Petri.

**Mecánico:** Las probetas se pulieron con lija de carburo de silicio grado 320, 400 y 600; este procedimiento se llevó a cabo en una sola dirección; posteriormente, se colocaron en una solución jabonosa, en agua corriente y desionizada y en alcohol isopropílico el proceso en cada etapa duro 10 minutos (min.) con agitación en un baño con ultrasonido; finalmente se secaron con acetona en condiciones atmosféricas.

**Plasma:** El sustrato de acero y los recubrimientos de nylon 6.6 reciclado se trataron con plasmas a presión atmosférica (APP) utilizando un equipo de plasma

atmosférico (Diener Electronic GmbH + Co., KG modelo APC500 Spray Corona), con una línea de aire y un generador de energía de aproximadamente 500 W a un voltaje de 10 kV y una presión de gas de 1500 torr. La distancia entre el electrodo y el sustrato o en su caso las películas fueron de 4 centímetros (cm). El tratamiento se realizó durante 60 segundos sobre los revestimientos, cada uno de los tratamientos se realizó en probetas diferentes con el objetivo de evaluar cómo influye el tratamiento en la adherencia del recubrimiento. Los iones caracterizados fueron OH y O debido a la presencia de H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub> en la atmosfera, los resultados se presentan a detalle en el capítulo 4.

## 4.2 Solución de Nylon 6,6

Para la obtención de la solución de nylon 6,6 se utilizó ácido fórmico al 98% y etanol.

Materiales:

- Ácido fórmico (HCOOH), (Sigma Aldrich, 98%).
- Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O), (Sigma Aldrich, 99%).

Para la disolución del polímero de nylon 6,6 se prepararon tres soluciones las cuales se nombraron solución 1, 2 y 3.

Uno de los parámetros fundamentales para poder llevar a cabo la solución del polímero es el tamaño del pellet. Para esto se cortó el polímero en pellets con un grosor de 3 mm y posteriormente se le realizó un lavado para limpiar las impurezas que se generaron durante el corte, figura 16.



Figura 16. Limpieza del nylon reciclado en pellets

Solución 1: se pesaron 0.1216 gramos de polímero en una balanza analítica digital y agregar 10 mL de ácido fórmico comenzar la agitación a 900 rpm y mantener por 45 minutos.

Solución 2: pesar 1.1434 gramos de polímero y agregar 10 mL de ácido fórmico comenzar la agitación a 900 rpm y mantener la agitación por 70 minutos.

Solución 3: pesar 1.4222 gramos de polímero y agregar 10 mL de ácido fórmico comenzar la agitación a 1000 rpm después de 5 minutos agregar 5 mL de etanol y mantener la agitación a 900 rpm durante 60 minutos.

Al término de la agitación, se obtuvieron tres soluciones diferentes, estas fueron depositadas sobre acero inoxidable por las técnicas de inmersión y de spin-coating. Las cuales se detallan a continuación:

Inmersión: Se usaron 10 mL de solución, en la cual se sumergieron las probetas de acero inoxidable, esto se realizó a diferentes tiempos de inmersión, los cuales fueron 30 y 60 segundos de inmersión con la finalidad de estudiar el efecto del tiempo en la morfología del recubrimiento. Los recubrimientos se hicieron en una y dos capas. Las condiciones que presentaron mejores propiedades morfológicas fueron las que se formaron con ácido fórmico y etanol al 12% con dos capas.

Spin-coating: Se usó 0.5 mL de solución y se depositó sobre sustratos de acero inoxidable, esto se hizo a diferentes revoluciones por minuto (RPM's), las cuales fueron 300, 600, 800 y 1000 con la finalidad de estudiar el efecto del tiempo y la velocidad en las películas, así como la morfología obtenida. El depósito se realizó cuando el spin coating alcanzo la velocidad de giro requerido. El depósito se hizo en una sola capa (vaciar los 0.5 mL por goteo) en el centro del sustrato. Al término del depósito las películas fueron retiradas y se guardaron. Las condiciones que presentaron mejores propiedades morfológicas fueron depositas a 300 rpm y tratadas con plasma durante 1 minuto, los resultados se presentan a detalle en el siguiente capítulo.



### 4.3 Recubrimiento de nylon 6,6 reciclado

Para la formación del recubrimiento de nylon 6,6 reciclado se utilizaron tres soluciones de nylon anteriormente mencionadas y dos técnicas: Inmersión y Spin-coating. En la tabla 3 se muestra la matriz experimental de las muestras.

**Tabla 3. Matriz experimental de los tratamientos superficiales de las muestras**

|  | Recubrimiento por inmersión en tiempos: |            |            |            |            |            |
|--|---|------------|------------|------------|------------|------------|
|  | 30 s                                    |            |            | 60 s       |            |            |
|  | Solución 1                              | Solución 2 | Solución 3 | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 |
| Tratamiento químico (NaOH al 5%)                         | X                                       | X          | X          | X          | X          | X          |
| Tratamiento con plasmas antes del recubrimiento (60 s)   | X                                       | X          | X          | X          | X          | X          |
| Tratamiento con plasmas después del recubrimiento (60 s) | X                                       | X          | X          | X          | X          | X          |

#### 4.3.1 Recubrimiento por inmersión

Para el recubrimiento de nylon reciclado por inmersión se utilizaron sustratos de acero inoxidable 316L previamente lavados con jabón, enjuagados con agua desionizada y acetona. Posteriormente se realizaron tratamientos superficiales (mecánico, químico y plasma atmosférico).

Las probetas que se trataron con plasma atmosférico se variaron los tiempos de exposición los cuales fueron pequeños debido a que la finalidad del tratamiento por plasma era determinar la influencia del tratamiento en la adherencia del recubrimiento, los parámetros del tratamiento por plasma se determinaron en base

a la literatura consultada. Se utilizaron 3 condiciones para formar el recubrimiento, figura 17.

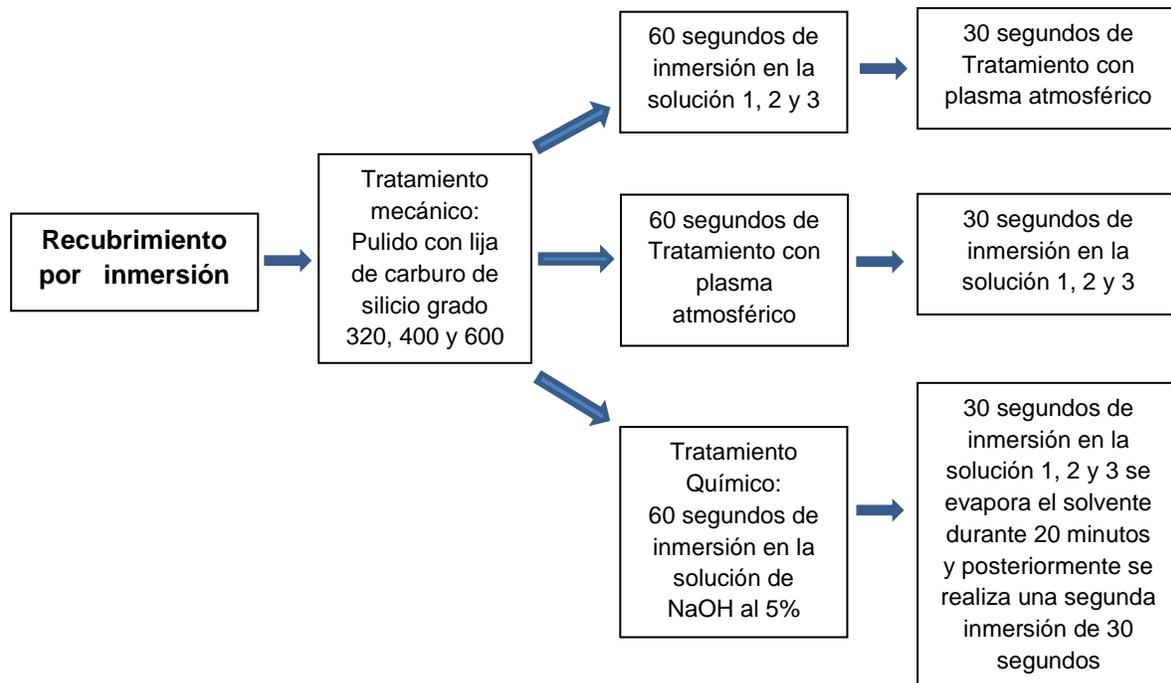


Figura 17. Diagrama del flujo para el desarrollo del recubrimiento polimérico por la técnica de inmersión

- Condición 1

Después de realizar el tratamiento mecánico, se sumerge la probeta de acero durante 60 segundos (s) en la solución (solución 1, 2 y 3, antes descritas), se dejan secar por 20 minutos para evaporar el solvente. Las probetas se realizaron por duplicado para realizarles un tratamiento con plasma durante 30 s con el objetivo de determinar como influye el tratamiento con plasma en la adherencia del recubrimiento.

- Condición 2

Posterior al tratamiento mecánico se trató la superficie del sustrato con plasma atmosférico durante 60 s y posteriormente se realizó el recubrimiento con un tiempo de inmersión de 30 s, el recubrimiento se realizó con las tres soluciones (1, 2 y 3).

- Condición 3

Se trataron las probetas con Hidróxido de Sodio (NaOH) al 5% para realizar una limpieza sobre la superficie, se enjuagaron con agua desionizada, acetona y se dejaron secar. Posteriormente se realizó la inmersión de las probetas durante 30 s en las soluciones (1, 2 y 3), se dejan secar durante 20 min y posteriormente se realizó una segunda inmersión durante 30 s se evapora el solvente a temperatura ambiente y se guardan en cajas Petri limpias.

#### 4.4 Técnicas de caracterización

##### 4.4.1 Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés) es una técnica que se basa en la excitación de grupos moleculares por un haz de luz infrarroja (2.5 a 15  $\mu\text{m}$ ; equivalente a número de onda comprendido entre 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ ), que genera movimientos vibracionales en los enlaces de la molécula. Los movimientos vibracionales se distinguen por el tipo de desplazamiento generado en los enlaces, conociéndose como vibraciones de tensión o flexión. Las tensiones provocan un estiramiento o estrechamiento del enlace y las flexiones generan una deformación del enlace. Si el número de átomos que forman un enlace es de tres o más, los movimientos también pueden presentarse como simétricos y antisimétricos. El análisis de una muestra por FTIR provee como resultado un espectro de absorción de infrarrojo el cual proporciona información de la estructura y concentración molecular. Todas las moléculas pueden manifestar una serie de bandas de absorción, cada banda corresponde con un movimiento de vibración de un enlace específico dentro de la molécula, a este conjunto de señales se les conoce como “huella dactilar” del compuesto.

La espectroscopia infrarroja con transformada Fourier fue obtenida con el espectrofotómetro Frontier FT-IR de Perkin Elmer. La medición se llevó a cabo en un intervalo de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$  [37].

#### 4.4.2 Espectroscopia de UV-visible

La espectroscopia UV-visible está basada en el proceso de la radiación ultravioleta-visible (radiación con longitud de onda comprendida entre los 160 y 780 nm) por la molécula. La absorción de esta radiación causa la promoción de un electrón a un estado excitado. Los electrones que se excitan al absorber radiación de esta frecuencia son los electrones de enlace de las moléculas, por lo que los picos de absorción se pueden correlacionar con los distintos tipos de enlace presentes en el compuesto. Debido a ello, la espectroscopia UV-Vis se utiliza para la identificación de los grupos funcionales presentes en una molécula. Las bandas que aparecen en un espectro UV-Vis son anchas debido a la superposición de transiciones vibracionales y electrónicas [38].

La medición del espectro UV-Vis se llevó a cabo en un intervalo de 175-950 nm<sup>-1</sup>.

#### 4.4.3 Espectroscopia de Raman

La espectroscopia Raman es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona en pocos segundos información química y estructural de casi cualquier material o compuesto orgánico e inorgánico permitiendo su identificación, pero es particularmente sensible en el estudio de los enlaces principales de las cadenas de los polímeros (estos enlaces son muy activos en la espectroscopia Raman). Esta sensibilidad es especialmente útil para el estudio de monómeros y polímeros. El análisis mediante espectroscopia de Raman se basa en el examen de la luz dispersada por un material al incidir sobre él un haz de luz monocromático. Una pequeña porción de la luz dispersadas inelásticamente experimentado ligeros cambios de frecuencia que son característicos del material analizado e independientes de la frecuencia de la luz incidente [39].

El análisis se realizó sobre el material a analizar sin necesitar ningún tipo de preparación especial por lo cual no conlleva ninguna alteración de la superficie sobre la que se realiza el análisis.

#### 4.4.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) trabaja con el mismo principio que el microscopio óptico excepto que en éste se hace incidir un delgado haz de electrones acelerados, con energías desde unos cientos de eV hasta unas décadas de KeV (50 KeV). Este haz se focaliza sobre la superficie de la muestra de forma que realiza un barrido de esta siguiendo una trayectoria de línea

paralelas. La señal emitida por los electrones y radiación resultantes del impacta se recoge mediante un detector y se amplifica para cada posición de la sonda. El resultado es una imagen topográfica muy ampliada de la muestra.

#### 4.4.5 Difracción de Rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos x, es una técnica que sirve para conocer las estructuras cristalinas de un material, las cuales exhiben picos característicos en función del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) al cumplirse la ley de bragg  $n \lambda = 2d \sin \theta$ .

El análisis se realizó colocando la muestra frente al haz de luz de rayos X a un ángulo entre  $20^\circ$  y  $70^\circ$ , mientras el contador se desplaza un ángulo  $2\theta$ , ambos respecto a la luz incidente.

#### 4.4.6 Angulo de Contacto

El ángulo de contacto mide el ángulo que forma un líquido al entrar en contacto con un sólido. Cuando las fuerzas de adherencia son muy altas el ángulo es menor de  $90^\circ$  ya que el líquido se ve atraído por el sólido y se extiende. En el caso del agua se denomina superficies hidrófilas. En el caso de que las fuerzas de atracción sean muy bajas la superficie tendera a repelar el líquido y el ángulo será mayor de  $90^\circ$ , en el caso del agua se llama hidrófobas. En el caso de encontrar estos comportamientos muy acentuados añadiremos el prefijo super y tendremos las superficies superhidrófobas y superhidrófilas, figura 18.

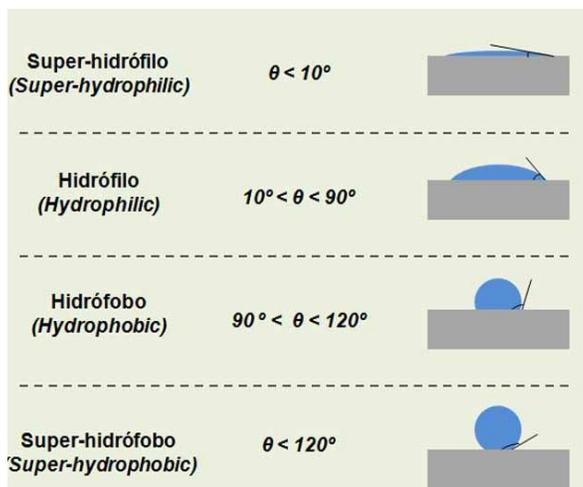


Figura 18. Ángulo de contacto

El ángulo de contacto ( $\theta_C$ ) entre un sólido y un líquido figura 19 va a depender de:

- La tensión superficial entre sólido y gas ( $\gamma_{SV}$ )
- La tensión superficial entre sólido y líquido ( $\gamma_{SL}$ )
- La tensión superficial entre líquido y gas ( $\gamma_{LV}$ )

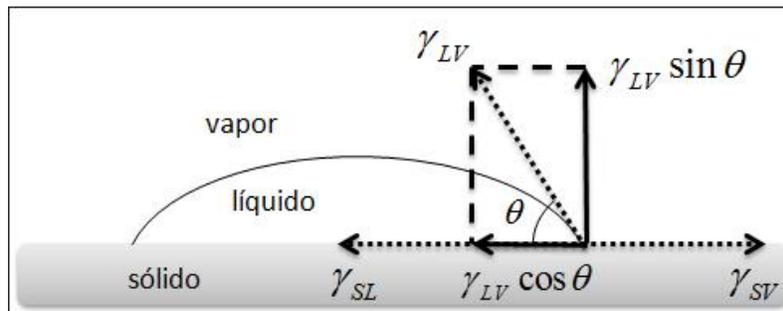


Figura 19. Esquema del ángulo de contacto

#### 4.4.7 Técnicas Electroquímicas

Los experimentos se realizan en una celda electroquímica, que utiliza un electrodo auxiliar o concentrado para cerrar el circuito con el electrodo de trabajo y hacer pasar corriente neta entre los dos. Este electrodo auxiliar puede ser de platino u otro material inerte, para no influir en el sistema estudiado metal/medio agresivo. Se usó una celda electroquímica en un arreglo experimental de tres electrodos: el electrodo de acero 316L con el recubrimiento de nylon 6,6 reciclado fue el electrodo de trabajo, como electrodo auxiliar se utilizó un electrodo de grafito y un electrodo de plata cloruro de plata, Ag/AgCl. Los recubrimientos se probaron electroquímicamente en solución salina, 3% NaCl, en condiciones atmosféricas a temperatura ambiente utilizando técnicas de impedancia con una señal de excitación de 10 mV en un rango de 100 kHz a 0.1 Hz.

#### **4.4.7.1 Curvas de polarización**

La polarización, o movimiento del potencial con respecto a al potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) se consigue con una fuente de corriente constantes o, con un potencióstato, que aplica a la probeta del metal estudiado, denominada electrodo de trabajo, el potencial deseado con respecto a un electrodo de referencia por el cual no circula corriente [40].

#### **4.4.7.2 Rectas de Tafel**

Las ecuaciones de Tafel describen los límites anódico y catódico de la ecuación de Butler-Volmer. Su descubrimiento a principios del siglo veinte, por Tafel al estudiar el comportamiento del potencial para la reacción de desprendimiento de  $H_2$  en función de la densidad de corriente.

Cuando se obtiene una curva de polarización experimental, la extrapolación de la recta que aparece en el dominio Tafeliano al valor del potencial de equilibrio, permite determinar la densidad de corriente de intercambio. El inverso del valor de la pendiente de estas rectas proporciona el valor de los coeficientes de Tafel,  $\beta_a$  y  $\beta_c$  [41].

#### **4.4.7.3 Espectroscopia de impedancia**

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en ingles), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de voltaje alterno (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta de corriente.

En el procedimiento experimental, se aplica una pequeña señal de potencial ( $E$ ) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente ( $i$ ) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias es posible aplicar una pequeña corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo usado procesa las mediciones de potencial-tiempo y corriente-tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina espectro de impedancias. Los espectros de impedancia obtenidos se analizan mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias ( $R$ ), capacitancias ( $C$ ), inductancias ( $L$ ), etc. Combinados de tal manera que

reproduzcan los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados circuitos eléctricos equivalentes [42].

Los datos obtenidos en los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica son reportados por los equipos de dos formas:

- a) Módulo de impedancia ( $|Z|$ ) y ángulo de fase ( $\phi$ ).
- b) Componente real de la impedancia total ( $Z'$ ) y componente imaginaria de impedancia ( $Z''$ ).

Estos dos métodos de describir los datos de impedancia son la base de dos maneras comunes de representar los datos, denominados gráficos de Nyquist y Bode.

El módulo de la impedancia  $|Z|$ , el ángulo de fase ( $\phi$ ) y los componentes real e imaginario de la impedancia total, se relacionan entre sí de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$|Z|^2 = Z'^2 + Z''^2$$

$$\tan \phi = \frac{Z''}{Z'}$$

$$Z' = |Z| \cos \phi$$

$$Z'' = |Z| \sin \phi$$

### Gráfico de Bode

Los gráficos de Bode son representaciones de diferentes parámetros de la impedancia contra frecuencia y existen diferentes variantes.

Los gráficos de Bode más comunes son:

- a) Logaritmo base 10 del módulo de la impedancia ( $|Z|$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia ( $f$ ).
- b) Ángulo de fase ( $\phi$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia ( $f$ ).

A diferencia de los gráficos de Nyquist, las representaciones de Bode contienen toda la información de un ensayo EIS, ya que las frecuencias se identifican claramente.

## 4.5 Impacto ambiental

En esta sección se realiza el análisis del impacto ambiental de la disposición final del polímero nylon 6.6 como se realiza tradicionalmente (incineradoras y tiraderos a cielo abierto) en comparación con el reciclaje del polímero en forma de recubrimiento polimérico.

La evaluación del impacto ambiental se dividió en tres fases:

1. Evaluación del impacto ambiental preliminar, así como la realización de estudios previos.
2. Investigación y evaluación de la alternativa de reciclaje.
3. Estudio del impacto ambiental implementando el reciclaje del polímero.

### 4.5.1 Evaluación del impacto ambiental preliminar: disposición final el polímero nylon 6.6

Para evaluar el impacto ambiental de la disposición final tradicional del polímero se realizó una investigación documental a través de un diseño cualitativo, el cual determino el procedimiento de selección y acceso documental. Se redactó una serie de interrogantes, las cuales constituyen una parte importante de la investigación.

A continuación, se describen las interrogantes que se utilizaron como instrumento de investigación:

- ¿Cómo se clasifican los polímeros para su disposición final?
- ¿Cuál es la disposición final de los polímeros?
- ¿Dónde están ubicados y cuántos son los sitios de disposición final de los polímeros?
- ¿Cuántos sitios de disposición final están en el estado de Morelos y en los estados vecinos?
- ¿los residuos poliméricos reciben algún tratamiento durante su disposición final?
- ¿Cuáles son los impactos ambientales que ocasionan estos residuos?

Una vez formuladas las preguntas se realizó la investigación documental, los resultados obtenidos se vaciaron en una matriz bibliográfica en la cual se reseñaron 30 documentos de diverso tipo de material, las fuentes de información la constituyen los documentos técnicos sobre impactos ambientales debido a los residuos sólidos urbanos, los datos de INEGI, SEMARNAT, plataformas de secretarías ambientales y artículos científicos.

#### 4.5.2 Investigación y evaluación de la alternativa de reciclaje.

Para la evaluación de la alternativa de reciclaje se comparó el ciclo de vida de la disposición final del polímero. Para el cual se realizó la de la investigación experimental (antes descrita) de los recubrimientos poliméricos analizando el impacto ambiental en el proceso de formación del recubrimiento.

#### 4.5.3 Estudio del impacto ambiental implementando el reciclaje del polímero.

Para comparar y evaluar las alternativas que se proponen para la disposición final del polímero nylon 6,6 se utilizó el Software EIA09, es una aplicación que facilita la evaluación del impacto ambiental. Permite la definición de diferentes alternativas de realización del proyecto, en las cuales se indican y valoran los efectos/impactos ambientales según se considere apropiado, obteniendo distintas valoraciones globales, facilitando la elección de la alternativa adecuada.

## Capítulo 4: Resultados y discusión

El nylon 6.6 es un polímero artificial que pertenece al grupo de las poliamidas. Se generan por policondensación de un diácido con una diamina. Se llaman así porque cada unidad repetitiva de la cadena polimérica, tienen dos átomos de carbono, cada uno con una longitud de seis átomos de carbono. Son polímeros empleados tradicionalmente para recubrir o para la fabricación de autopartes esto se debe a sus principales propiedades como: resistencia al envejecimiento durante periodos prolongados, alta fuerza y rigidez, excepcional resistencia química y excelentes propiedades dieléctricas.

Como parte de resultados se muestra la caracterización del polímero en solución y la formación del recubrimiento, así como el impacto ambiental en función de la disposición final del polímero y la formación del recubrimiento.

### 4.1 Caracterización química de la solución polimérica

En esta sección se presenta el mecanismo de reacción de la despolimerización del nylon 6,6 en ácido fórmico y con un porcentaje de etanol, así, como la caracterización química.

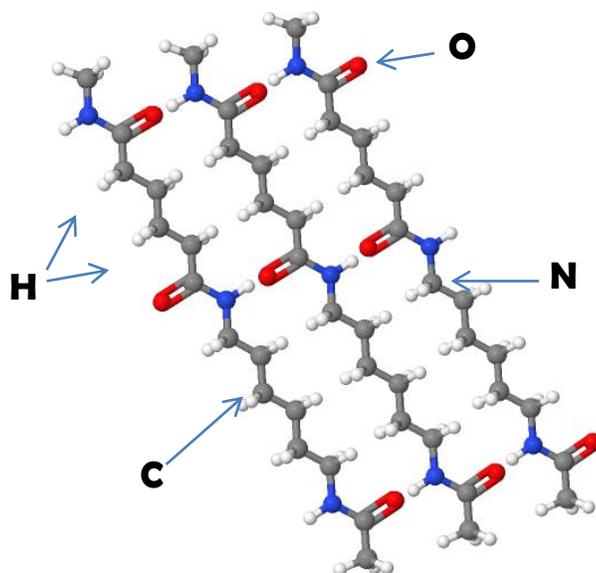


Figura 20. Estructura química del nylon 6,6. Elaboración propia

En la figura 20 se muestra la estructura química del polímero nylon 6,6, donde se observa una forma plana de las cadenas de carbono ligadas a hidrógenos con grupos funcionales destacando algunos modos de vibración relevantes como (C=O), (N-H), (CNH) Y (C-C) dentro de la cadena del polímero.

En la figura 21 se muestra el mecanismo de reacción entre el polímero y el ácido fórmico al 98%, el nylon 6,6 es hidrófilo y al entrar en contacto con el solvente se hincha esto se debe a su alta compatibilidad con los solventes orgánicos, posteriormente se lleva a cabo la hidrólisis en esta etapa de la reacción se separan las cadenas para formar cadenas poliméricas de con un peso molécula.

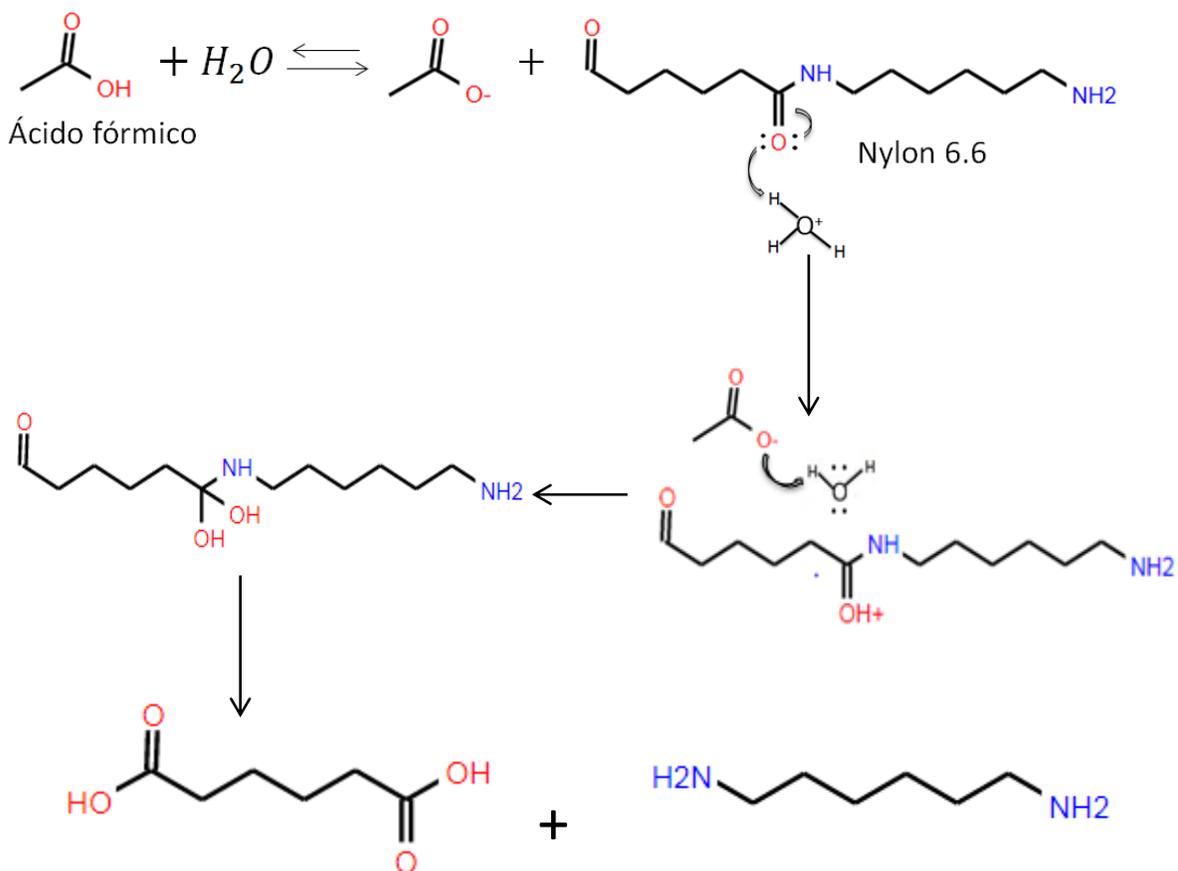


Figura 21. Mecanismo de despolimerización del Nylon 6,6 [46]

menor, por último, se lleva a cabo la disolución del polímero en el medio teniendo como resultado una mezcla.

La figura 22, muestra los espectros de FTIR del nylon 6,6, reciclado y en solución, mientras en la tabla 4 se presenta la asignación de los grupos funcionales de los espectros mostrados.

Como se puede apreciar, los espectros del nylon reciclado sólido y en solución coinciden con el espectro de nylon puro. En los cuales se observan las bandas correspondientes a los estiramientos del grupo N-H a  $3306$ , también se observan las bandas de absorción relativas al estiramiento C-H en la región de  $2950$  a  $2700$   $\text{cm}^{-1}$ . La banda de absorción conocida como amida I aparece cerca de  $1700$   $\text{cm}^{-1}$  debido al estiramiento del grupo C=O. La amida II aparece alrededor de  $1200$   $\text{cm}^{-1}$ . El análisis de FTIR confirma la estructura química del material polimérico reciclado como una amida secundaria, lo que coincide con la estructura química de las amidas reportadas en literatura.

En el espectro de nylon reciclado con un porcentaje de etanol se observa una banda ancha alrededor de  $3330$   $\text{cm}^{-1}$  la cual corresponde al grupo OH.

En la figura 23 se muestra el espectro de UV-visible de nylon 6,6 diluido en ácido fórmico. En la tabla 5 se presenta la asignación de los grupos funcionales y el porcentaje de absorbancia.

El espectro de UV-visible de nylon 6,6 reciclado en solución presenta bandas de absorción en la región de  $240$ - $490$  nm. La absorbancia de  $249$  nm corresponde a la amida. El enlace C=O absorbe en la longitud de onda de  $307$  nm. La banda de absorción de  $481$  corresponde al enlace de SO<sub>x</sub> que está presente en la composición química de fibra de vidrio que se utiliza como aditivo en el polímero de nylon 6,6.

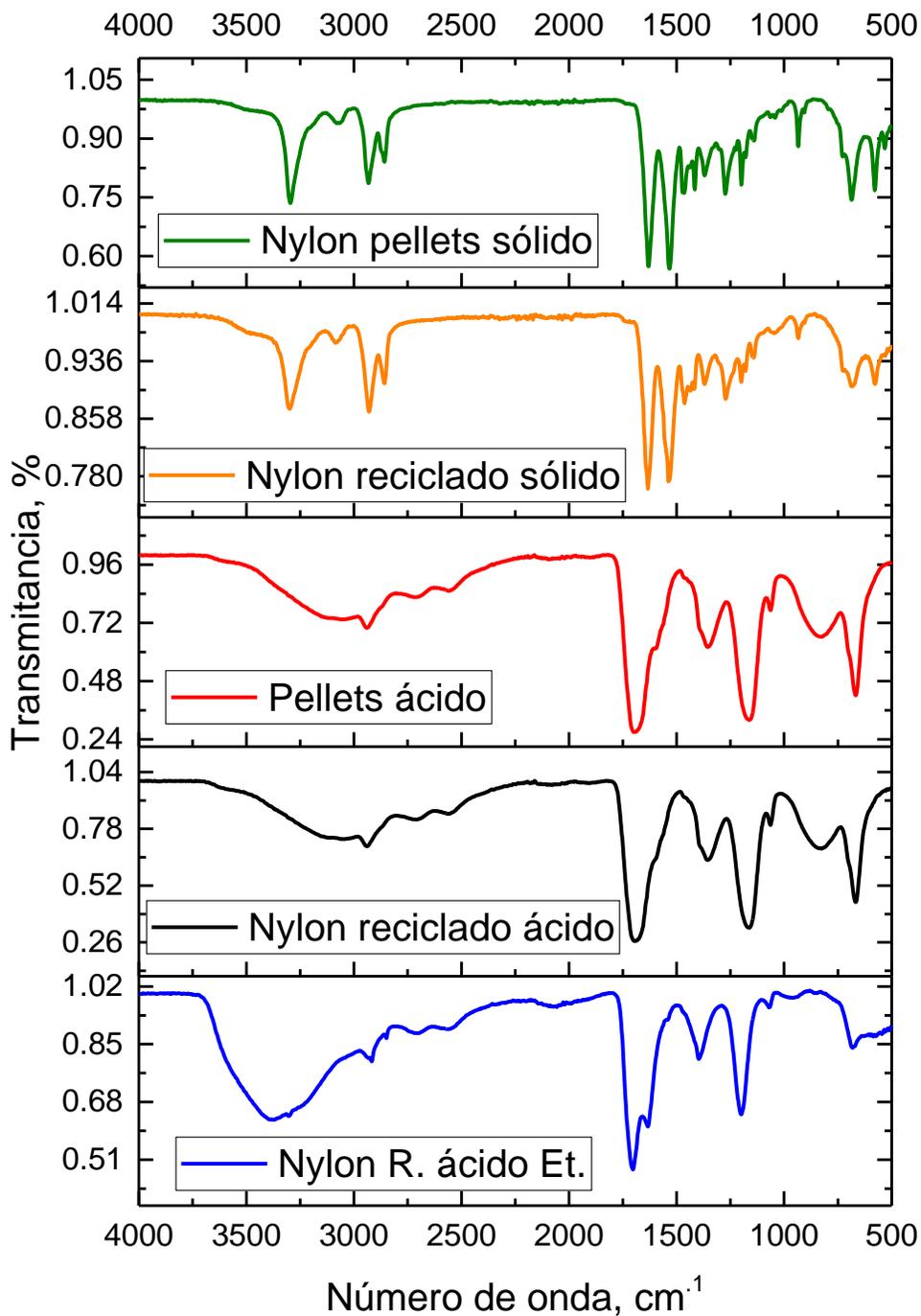


Figura 22. Espectro de FTIR de nylon puro y nylon reciclado, sólido y en solución



Tabla 4. Asignación de grupos funcionales del espectro de FTIR de nylon puro y reciclado en sólido y en solución

| Asignación en FTIR                    | Longitud de onda (cm <sup>-1</sup> ) |                      |                        |                  |                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
|                                       | Datos de literatura                  | Nylon Pellets sólido | Nylon reciclado sólido | Pellets en ácido | Nylon reciclado ácido | Nylon R. ácido Et. |
| N-H                                   | 3306                                 | 3303                 | 3311                   |                  |                       | 3330               |
| C-H asimétrico                        | 3082                                 | 3072                 | 3072                   |                  |                       |                    |
| CH <sub>2</sub> asimétrico            | 2932                                 | 2941                 | 2959                   | 2930             | 2945                  | 2900               |
| CH <sub>2</sub> simétrico             | 2862                                 | 2859                 | 2863                   | 2705             | 2705                  |                    |
| Amida I                               | 1639                                 | 1634                 | 1637                   | 1688             | 1692                  | 1693               |
| Amida II / CH <sub>2</sub> asimétrico | 1539                                 | 1532                 | 1536                   |                  |                       |                    |
| N-H deformación / CH <sub>2</sub>     | 1469                                 | 1467                 | 1461                   |                  |                       |                    |
| Amida III                             | 1269                                 | 1283                 | 1273                   | 1348             | 1375                  | 1383               |
| CCH simétrico / CH <sub>2</sub>       | 1200                                 | 1151                 | 1204                   | 1164             | 1166                  | 1191               |
| C-C estiramiento                      | 934                                  | 930                  | 940                    |                  |                       |                    |
| C-C                                   | 691                                  | 679                  | 691                    | 677              | 680                   | 683                |
| C-C deformación                       | 579                                  | 578                  | 584                    |                  |                       |                    |

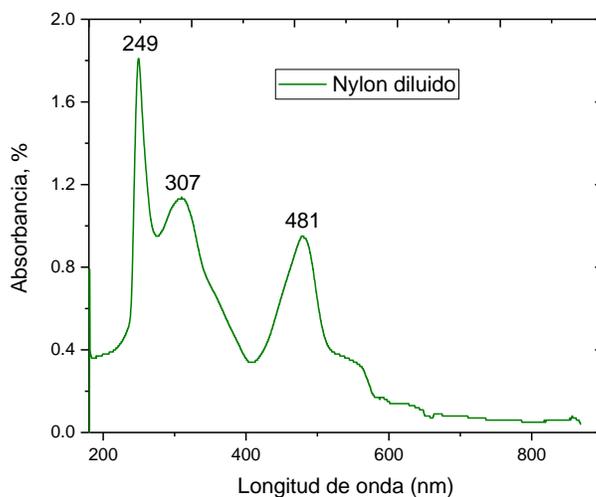


Figura 23. Espectro de UV-visible de nylon reciclado

Cabe mencionar que el polímero de nylon 6,6 esta reforzado con un gran porcentaje de fibra de vidrio el cual le proporciona las propiedades mecánicas.

Tabla 5. Asignación de grupos funcionales del espectro de UV-visible de nylon reciclado

| Asignación en UV-visible | Datos de literatura<br>Longitud de onda (nm) | Nylon Reciclado       |                    |
|--------------------------|--|-----------------------|--------------------|
|                          |  | Longitud de onda (nm) | Absorbancia (u.a.) |
| Amida                    | 220 – 245                                    | 249                   | 1.8                |
| Enlace C = O             | 290 -320                                     | 307                   | 1.3                |
| Enlace SOx               | 480  | 481                   | 0.94               |

En la figura 24 se muestra los espectros de Raman normalizados de nylon 6,6 puro y reciclado disuelto en ácido fórmico y agregándole un porcentaje de etanol.

Se analizaron cuidadosamente todos los picos de las muestras en función de los solventes que se utilizaron para disolver dicho polímero.

Los picos  $1871\text{ cm}^{-1}$  y  $1402\text{ cm}^{-1}$  que se muestran el espectro de nylon puro en pellets disuelto en acido fórmico muestra cambios sustanciales en sus intensidades con respecto al nylon reciclado disuelto en acido con un porcentaje de etanol.

En el espectro de nylon reciclado disuelto en acido con un porcentaje de etanol los picos se ensanchan esto se debe a la flexión del enlace CNH. Es posible reconocer que los picos  $1896\text{ cm}^{-1}$ ,  $1380\text{ cm}^{-1}$  y  $1109\text{ cm}^{-1}$  desaparecen cuando el polímero reciclado se disuelve en acido.

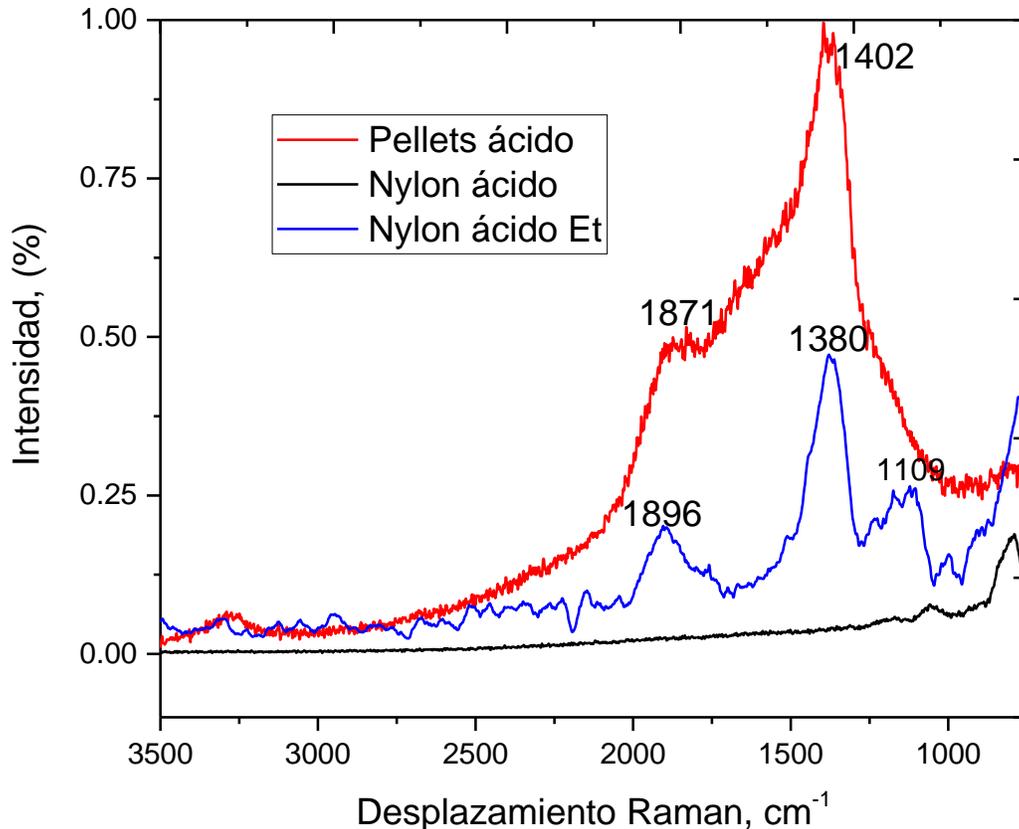


Figura 24. Espectro de Raman de nylon puro y reciclado disuelto en ácido fórmico y ácido fórmico con 6% de etanol

## 4.2 Caracterización de los recubrimientos

Para la formación del recubrimiento polimérico sobre el sustrato de acero inoxidable se utilizó la técnica de inmersión.

La solución de nylon al 12% en ácido fórmico y etanol, presenta buena adherencia después de la formación del recubrimiento polimérico, los poros que presentan algunas probetas se deben al procedimiento con el cual se formó dicho recubrimiento. Los resultados de la adherencia dependen de la solución, las probetas que presentaron mejores resultados fueron las que se realizaron con tratamiento mecánico con lija de grano 180, 240 y 320 en las cual se realizó una

inmersión de 30 segundos en la solución, a las cuales se le realizó un tratamiento con plasma antes y después de la formación del recubrimiento para ver como impactaba el plasma en la adherencia del recubrimiento.

Una vez que se analizó la adherencia de las probetas se realizaron análisis de SEM para analizar la morfología de las probetas.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del recubrimiento de nylon reciclado formado por la técnica de inmersión.

#### 4.2.1.1 Difracción de rayos X

En la figura 25 se muestra el espectro de difracción de rayos X de la película de nylon reciclado donde se aprecian tres picos, el primero corresponde al polímero y los consecutivos al oxido de silicio, el primer pico se caracterizó con respecto al nylon 6,6 puro.

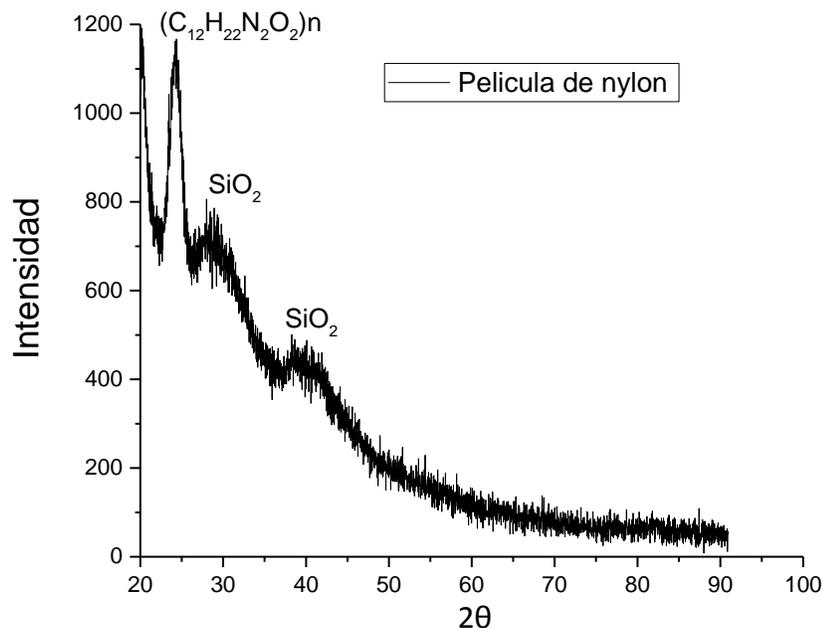


Figura 25. Espectros de difracción de rayos X (DRX) de la película de nylon reciclado

En la figura 26, se pueden apreciar los espectros de difracción de rayos X del sustrato del acero 316L figura 18a, así como el recubrimiento de nylon reciclado formado a diferentes concentraciones: b) nylon diluido al 1%, c) nylon concentrado al 11% y d) ácido fórmico y etanol al 12%. En las diferentes concentraciones se obtienen diagramas del recubrimiento similares, en cuanto aspecto. Entre mayor sea la concentración del polímero en la solución el pico correspondiente al nylon tendrá una variación importante, debido a que el pico del polímero disminuye aumentando los picos del óxido de silicio de tal manera que podrán ser observadas dentro del DRX.

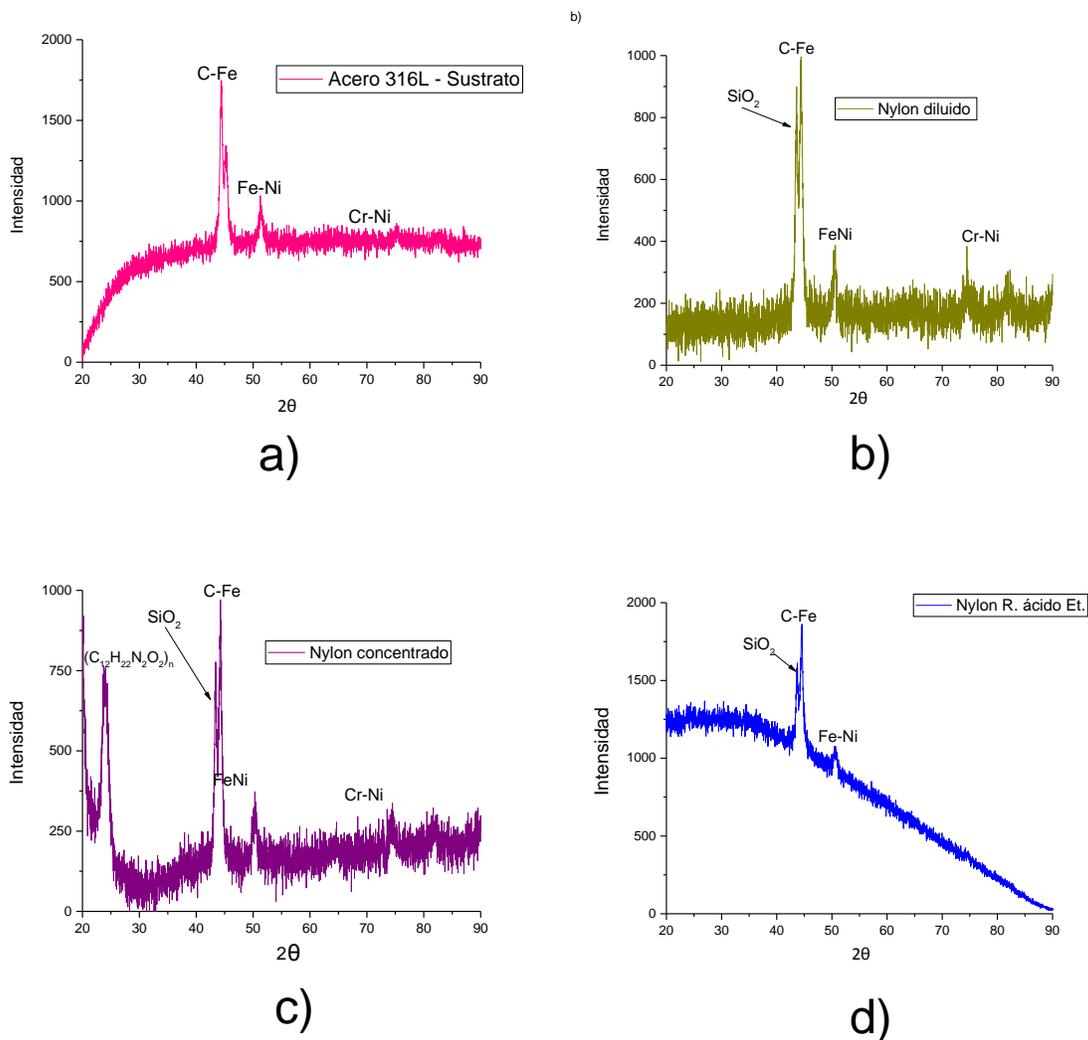


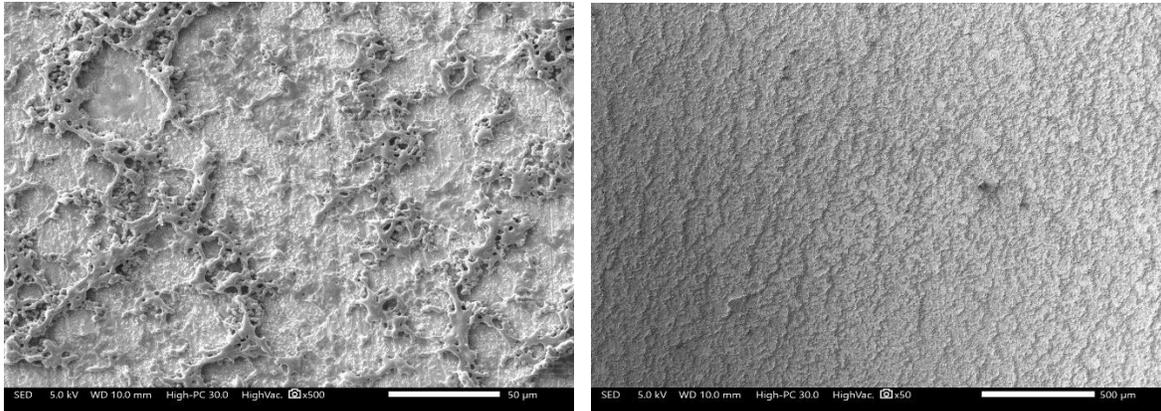
Figura 26. Espectro de difracción de rayos X (DRX): a) sustrato de acero 316L, b) nylon diluido al 1%, c) nylon concentrado al 11% y d) ácido fórmico y etanol al 12%



#### 4.2.1.2 Nylon en ácido fórmico al 1%

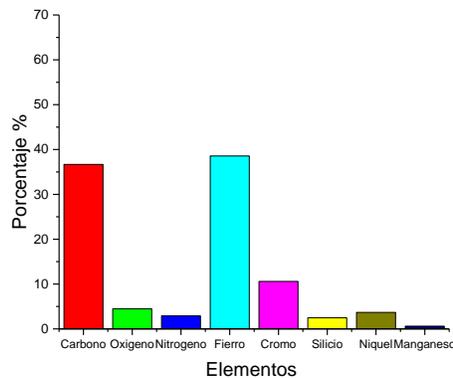
En la figura 27 se presentan imágenes donde se puede apreciar una morfología irregular del recubrimiento, generado sobre el sustrato lijado, con 30 s de inmersión en la solución de nylon diluida al 1% y posteriormente se trató 20 s con plasma atmosférico.

En la figura 19a se aprecian detalles del desarrollo del recubrimiento, en donde se observan pequeñas aglomeraciones porosas que se adhieren directamente al sustrato. Esto se debe a que la concentración de polímero al 1% en la solución es muy poca y no da paso a la formación de un recubrimiento homogéneo.



a)

b)



c)

Figura 27 Imágenes de SEM de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado al 1% tratada con plasma por 20 s: a) 5.0 kVx500 aumentos, b) 5.0 kVx50 aumentos y c) análisis químico

En la figura 27b se muestra una imagen general del recubrimiento donde se aprecian grietas y se pueden apreciar partes del sustrato, al realizar el análisis químico se aprecia la composición química del acero: carbono, hierro y cromo en mayor porcentaje.

#### 4.2.1.1 Nylon en ácido fórmico al 11%

En la figura 28 se muestran las imágenes de SEM del recubrimiento de nylon reciclado generado sobre el sustrato de acero inoxidable lijado y tratado por plasma durante 60 s, con una inmersión de 30 s en la solución de nylon, el proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente.

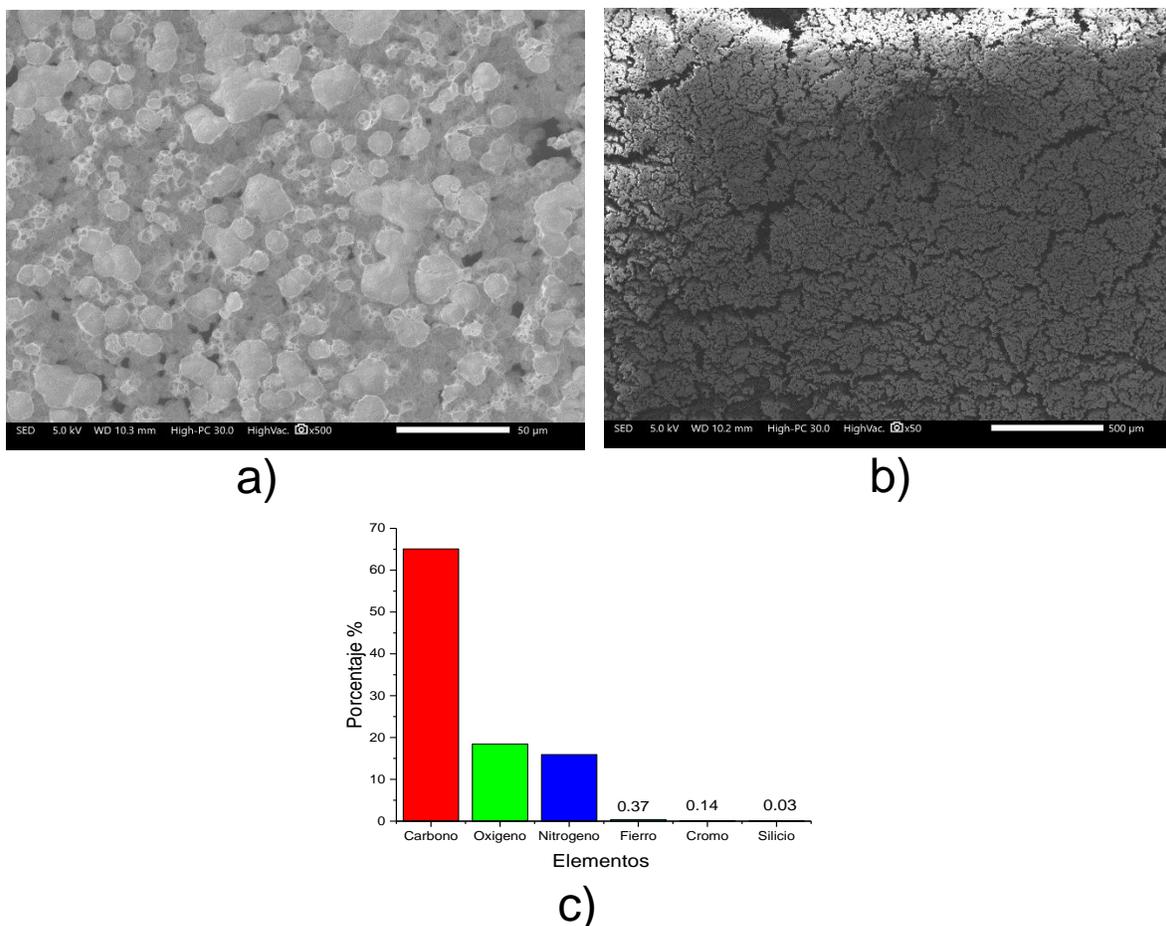
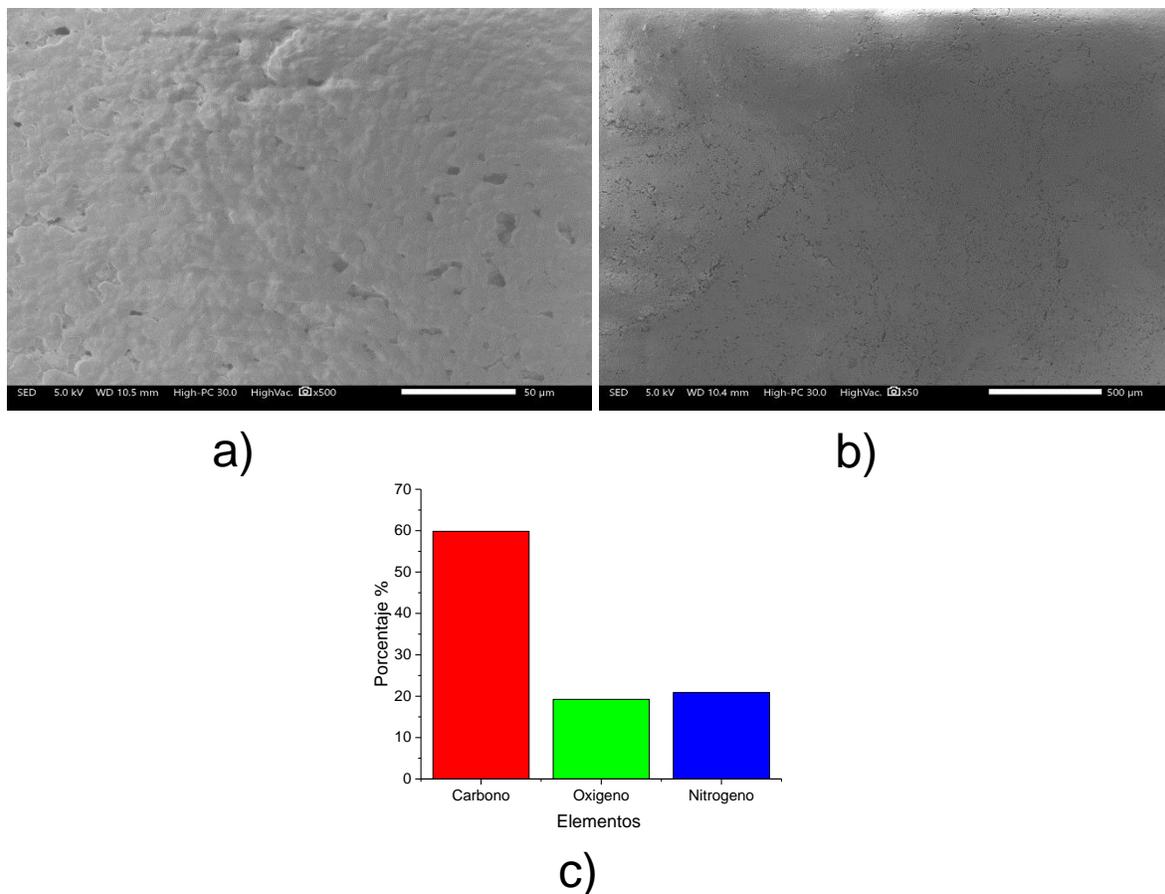


Figura 28. Imágenes de SEM de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado al 11% depositado sobre la superficie de acero tratado con plasma por 60 s: a) 5.0 KVx500 aumentos, b) 5.0 KVx50 aumentos y c) análisis químico

La figura 28a muestra una película irregular con bastantes defectos debido a que la superficie no se muestra homogénea en la que se detectan 6 elementos:

carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo, cromo y silicio. La figura 28b muestra un acercamiento del recubrimiento en donde los tres últimos elementos detectados en el análisis corresponden a la composición química del acero inoxidable y en la figura 28c se muestra el análisis químico de la película.



**Figura 29. Imágenes de SEM de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado al 11% tratado con plasma por 30 s: a) 5.0 KVx500 aumentos, b) 5.0 KVx50 aumentos y c) análisis químico**

En la figura 29a y 29b se muestran las imágenes de la morfología del recubrimiento formado con 60 s de inmersión en la solución de nylon concentrado al 11% y posteriormente se trató con plasma durante 30 s. en estas imágenes con diferentes acercamientos sobre la superficie del recubrimiento, se aprecia una capa robusta y compacta con fisuras en la frontera de algunos grumos; el análisis

de la zona figura 29c, muestra que dicho recubrimiento está constituido por la composición química del polímero: carbono, oxígeno y nitrógeno.

Si comparamos el recubrimiento anterior con este nos podemos dar cuenta que el tratamiento con plasma influye en la morfología del recubrimiento, cuando este se realiza posterior a la formación del recubrimiento, la superficie se ve compacta y menos porosa.

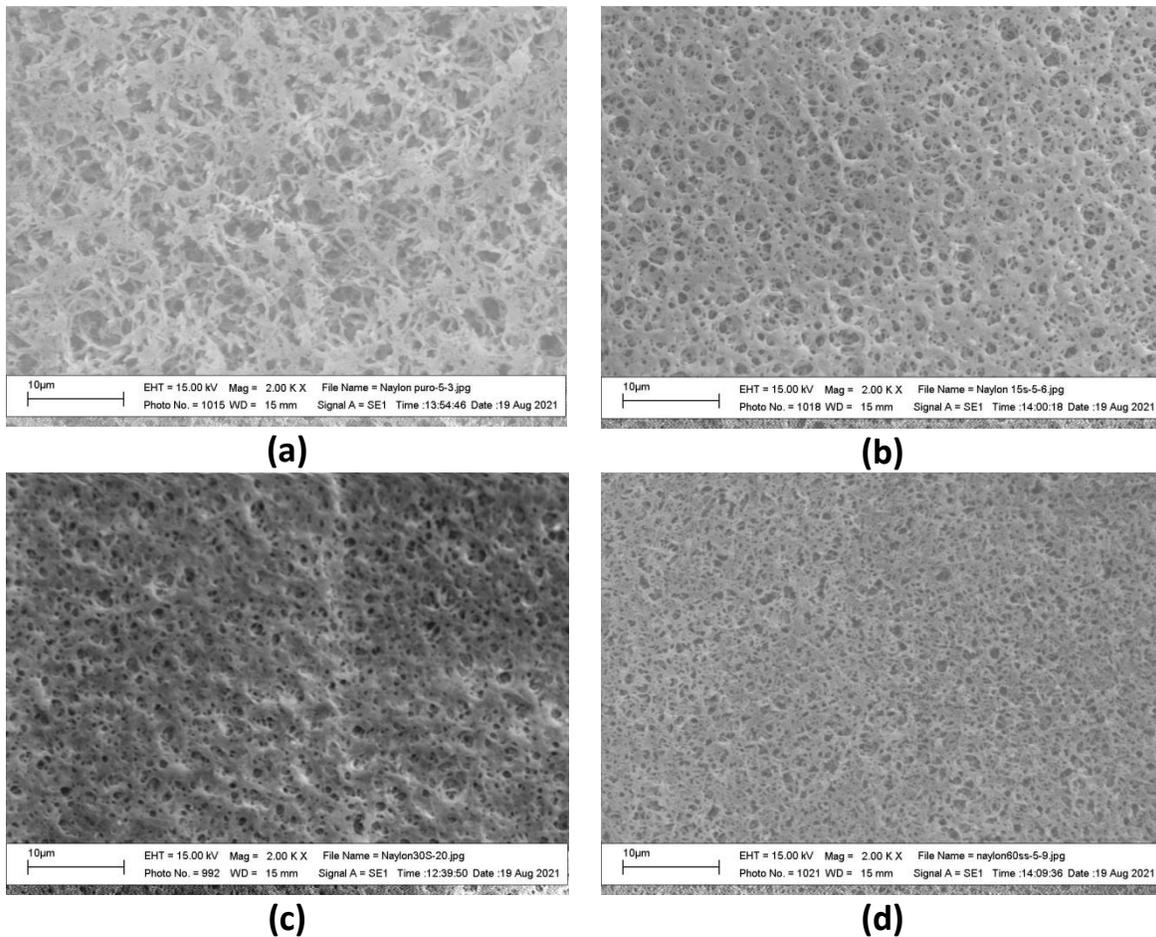
Debido que al tratar el recubrimiento con plasma atmosférico permite una activación funcional sobre la superficie, generando interacciones moleculares como son los puentes de hidrógeno como se había mencionado anteriormente, mejorando la adhesión interfacial.

La capacidad que posee el plasma atmosférico para modificar las superficies se debe a varios factores. Uno de ellos es la elevada energía media de los electrones libres presentes en el plasma, suficiente para romper enlaces químicos. Asimismo, las características únicas de los tratamientos superficiales mediante plasmas predominan los efectos producidos sobre la superficie por los fotones y especies activas procedentes del plasma, que solo penetran hasta una profundidad de entre algunos cientos de angstroms ( $\sim 10^{-10}$  m) y unas 10 micras. Debido a esto, las propiedades del interior del material permanecen inalteradas.

Para la formación del recubrimiento también influyen otros factores como la viscosidad de la solución, el proceso de inmersión, la velocidad a la que se extrae el metal de la solución y la evaporación del solvente.

#### **4.2.2.2 Nylon en ácido fórmico y etanol al 12%**

Uno de los parámetros fundamentales para determinar cuál de los recubrimientos era el mejor fue la adherencia, como se observa en las concentraciones anteriores es poroso y la adherencia es mala. Al trabajar con la concentración de nylon en ácido fórmico y etanol al 12% la adherencia es buena por lo cual se realizaron pruebas variando el tiempo del tratamiento con plasma para determinar cómo influía este sobre la morfología del recubrimiento de nylon comparándolo con el recubrimiento de nylon puro.



**Figura 30. Imágenes de SEM de 15 KV 2000 aumentos del recubrimiento de nylon puro por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico**

En la figura 30 se muestra una imagen del detalle del recubrimiento de nylon puro tratado con diferentes tiempos de plasmas en la figura 30(a) se muestra la imagen del recubrimiento del nylon puro sin tratamiento el cual presenta una morfología porosa en las imágenes de la figura 30(b, c y d) se muestra el recubrimiento de nylon puro tratado con plasma atmosférico con 15, 30 y 60 segundos, respectivamente. Como se puede observar son 30 segundos el recubrimiento se ve más homogéneo al aumentar el tiempo a 60 segundos el recubrimiento se observa más poroso.

En la figura 31 se muestran los análisis químicos del recubrimiento puro tratado con plasma atmosférico, entre mayor sea el tiempo del tratamiento la

concentración de oxígeno en el recubrimiento aumenta, aunque no es un valor significativo.

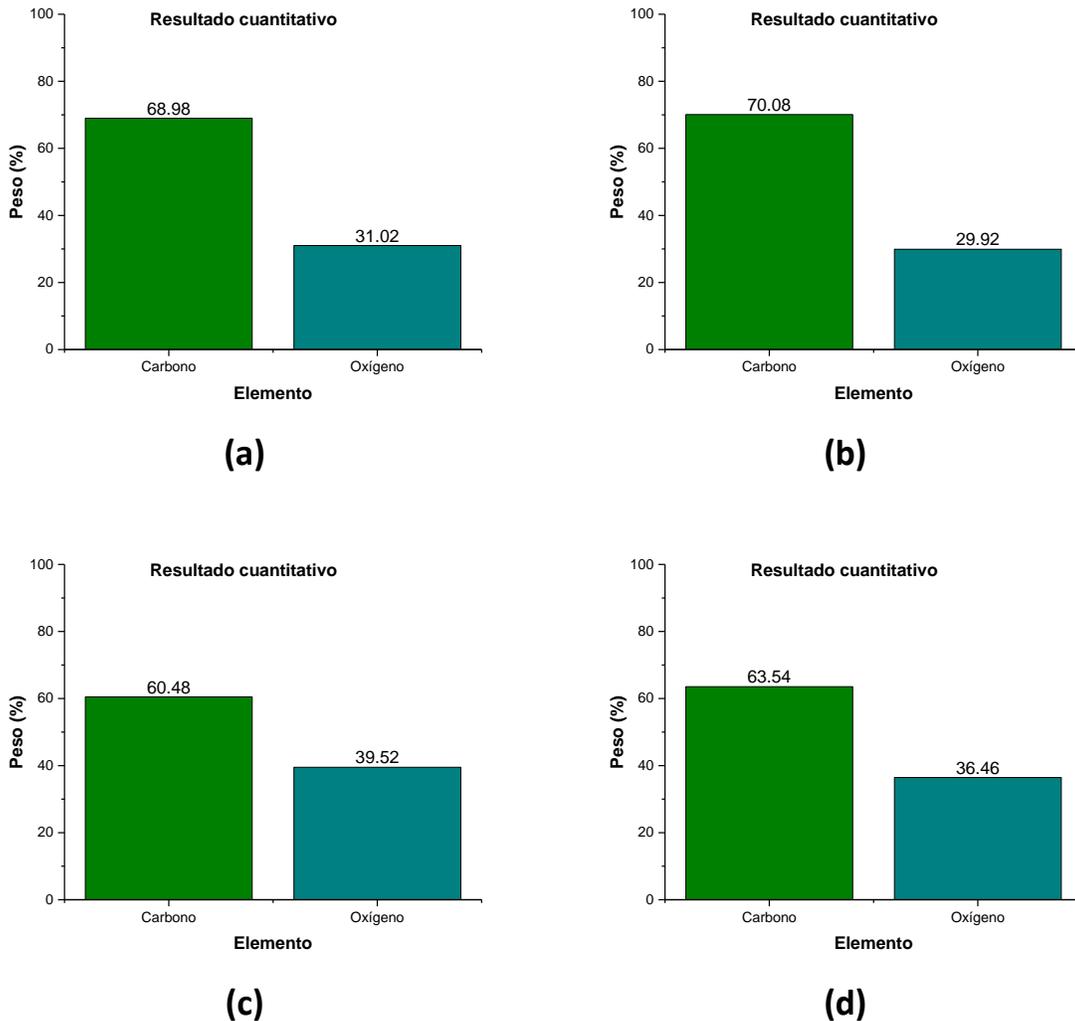
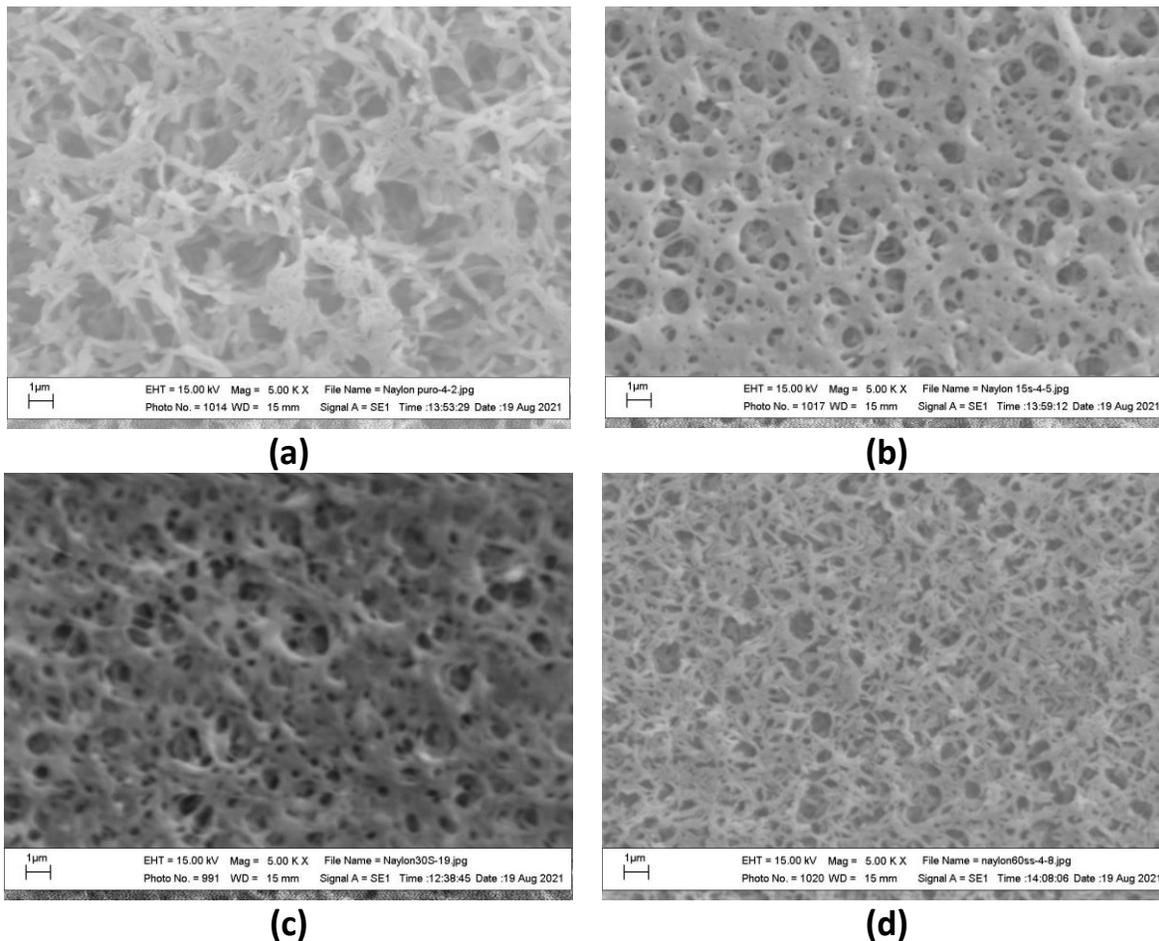


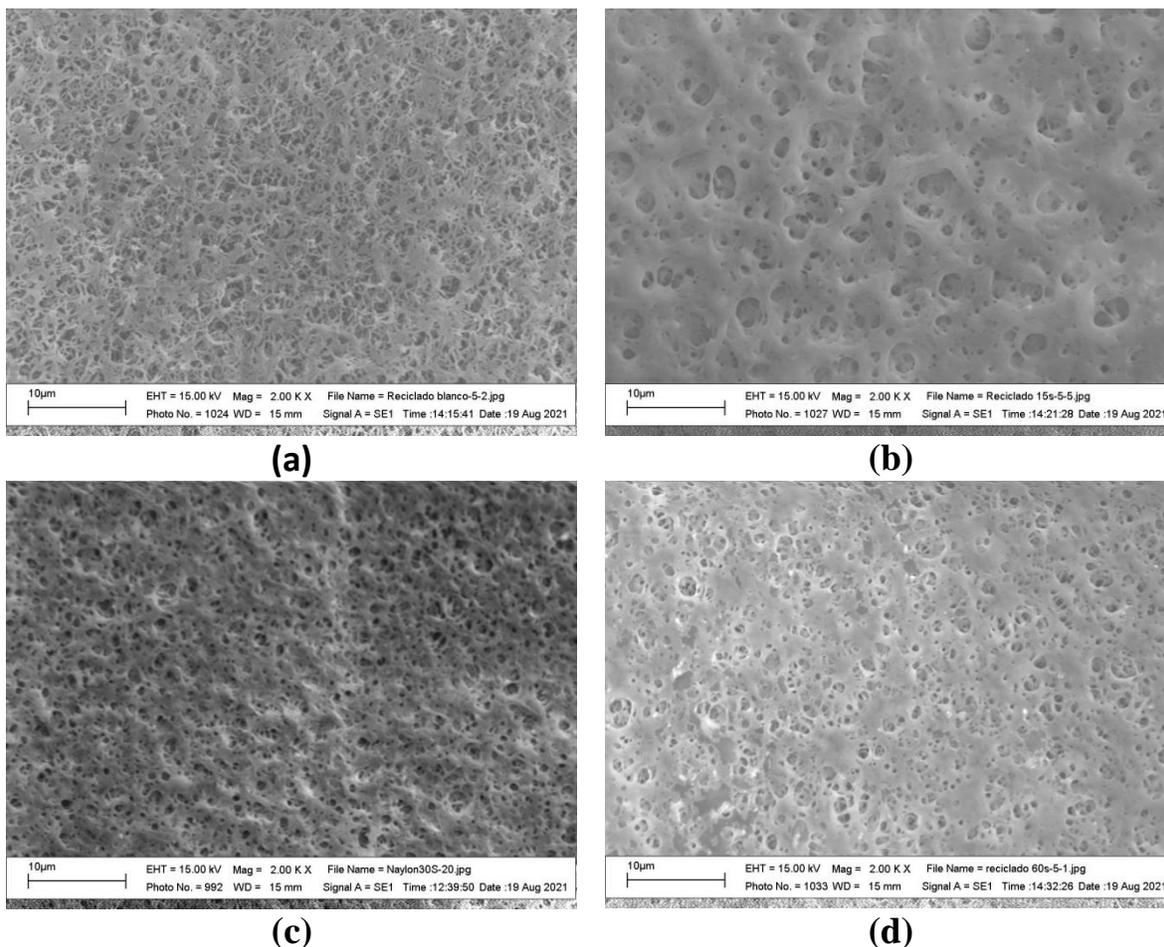
Figura 31. Análisis químico del recubrimiento de nylon puro por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico

En la figura 32 se muestra la morfología general del recubrimiento de nylon puro a 30 segundos figura 32(c) la morfología observa más homogénea y compacta con respecto a los tratamientos de 15 y 60 segundos, esto se debe a la interacción molecular de los grupos funcionales del polímero.



**Figura 32. Imágenes de SEM de 15 KV 5000 aumentos donde se aprecia el detalle de la morfología del recubrimiento de nylon puro por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico**

En la figura 33 se muestra la morfología a detalle del recubrimiento con nylon reciclado 33(a) el recubrimiento sin tratamiento con plasma el cual tiene una apariencia no homogénea y se observan como hojuelas dando una apariencia quebradiza, 33(b) el recubriendo con 15 segundos de tratamiento con plasma se observa más homogéneo y compacto con respecto a la probeta sin tratamiento, debido a que el tratamiento con plasma ayuda a activar los grupos funcionales de la superficie del recubrimiento, en la imagen de la figura 33(c y d) el recubrimiento se muestra poroso y quebradizo.



**Figura 33.** Imágenes de SEM de 15 KV 2000 aumentos del recubrimiento de nylon reciclado por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico

En la figura 34 se muestran los análisis químicos del recubrimiento de nylon reciclado-tratados a diferentes tiempos con plasma atmosférico. Al aumentar el tiempo del tratamiento se observa que la concentración del óxido de silicio aparece sobre la superficie del recubrimiento. El óxido de silicio está presente en el recubrimiento reciclado debido al alto contenido de fibra de vidrio que contiene el polímero, el porcentaje se analiza en mayor proporción a 30 segundos debido a que se tiene una menor proporción de carbono.

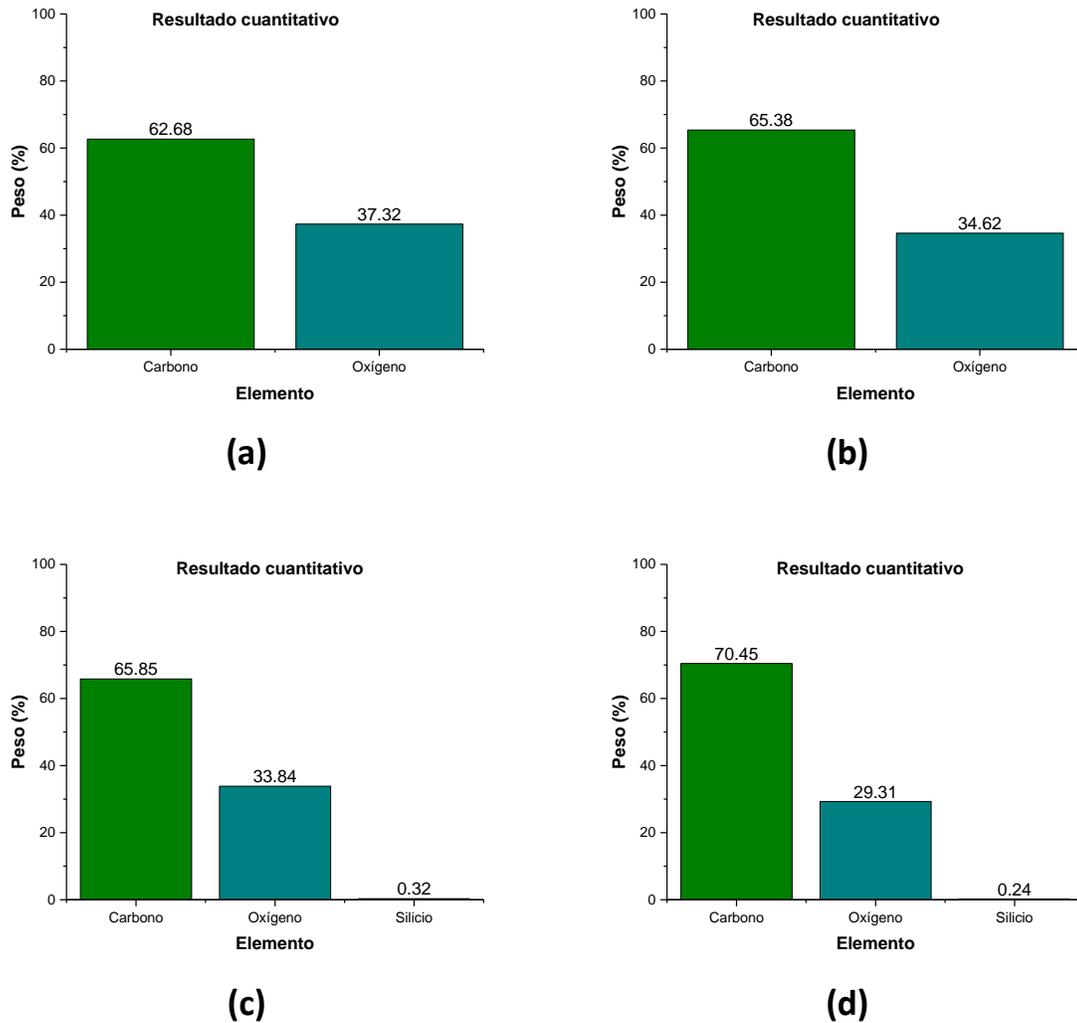
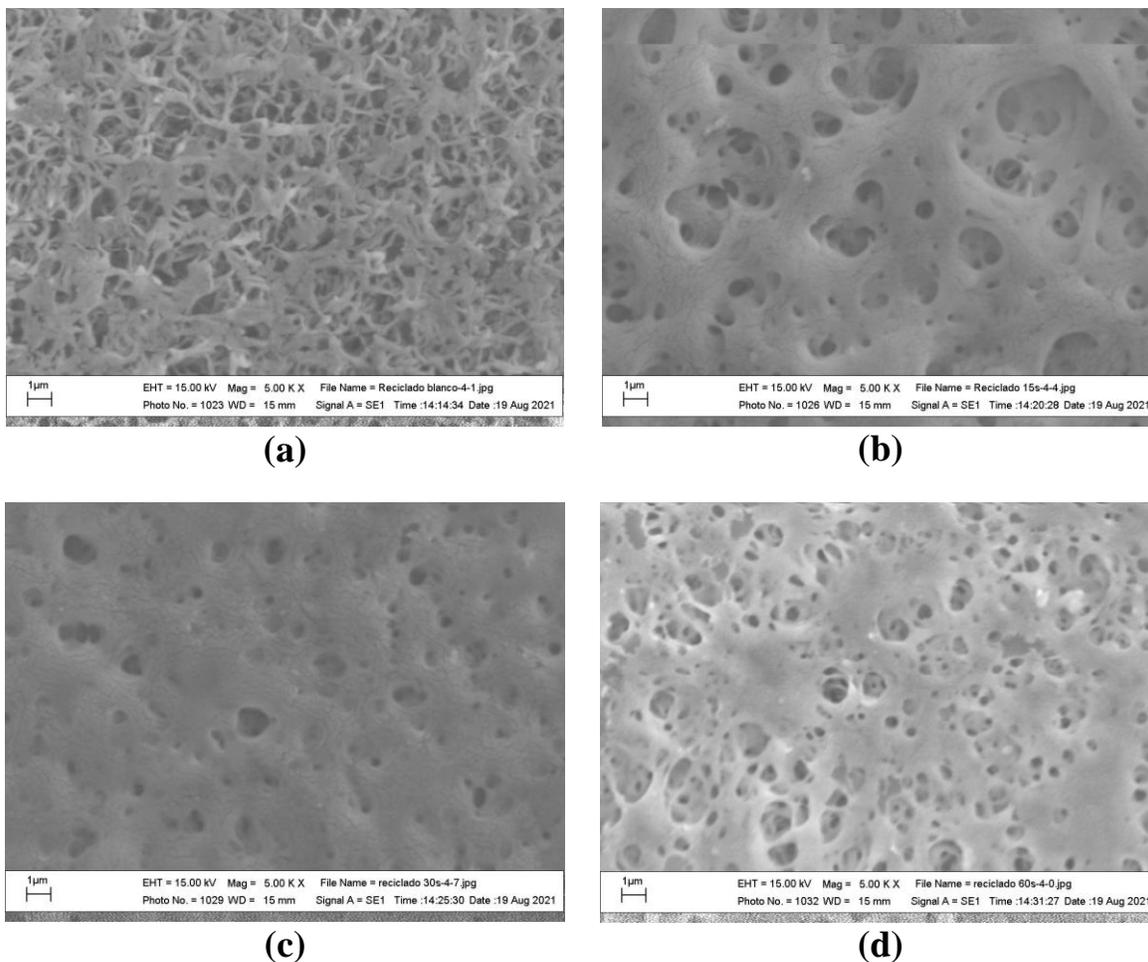


Figura 34. Análisis químico del recubrimiento de nylon reciclado por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico

En la figura 35 se muestra la morfología general del recubriendo de nylon reciclado en la cual se observa que le tratamiento con pasma ayuda a cerrar los poros del recubrimiento entre mayor sea el tiempo del tratamiento mejor es la adherencia y la morfología del recubrimiento. En la imagen 35 (d) se muestran aglomeraciones que ayudan a la protección del material metálico.



**Figura 35. Imágenes de SEM de 15 KV 5000 aumentos donde se aprecia el detalle de la morfología del recubrimiento de nylon reciclado por la técnica de inmersión: a) sin plasma, b) 15 s, c) 30 s y d) 60 s de tratamiento con plasma atmosférico**

En la figura 36 se muestran los espectros del recubrimiento del nylon puro donde se pueden observar cambios significativos en las bandas de absorción del enlace N-H y C-H del recubrimiento sin tratamiento y con 30 segundos de tratamiento de plasma. El recubrimiento con 15 y 60 segundos de tratamiento con plasma respectivamente presenta espectros similares.

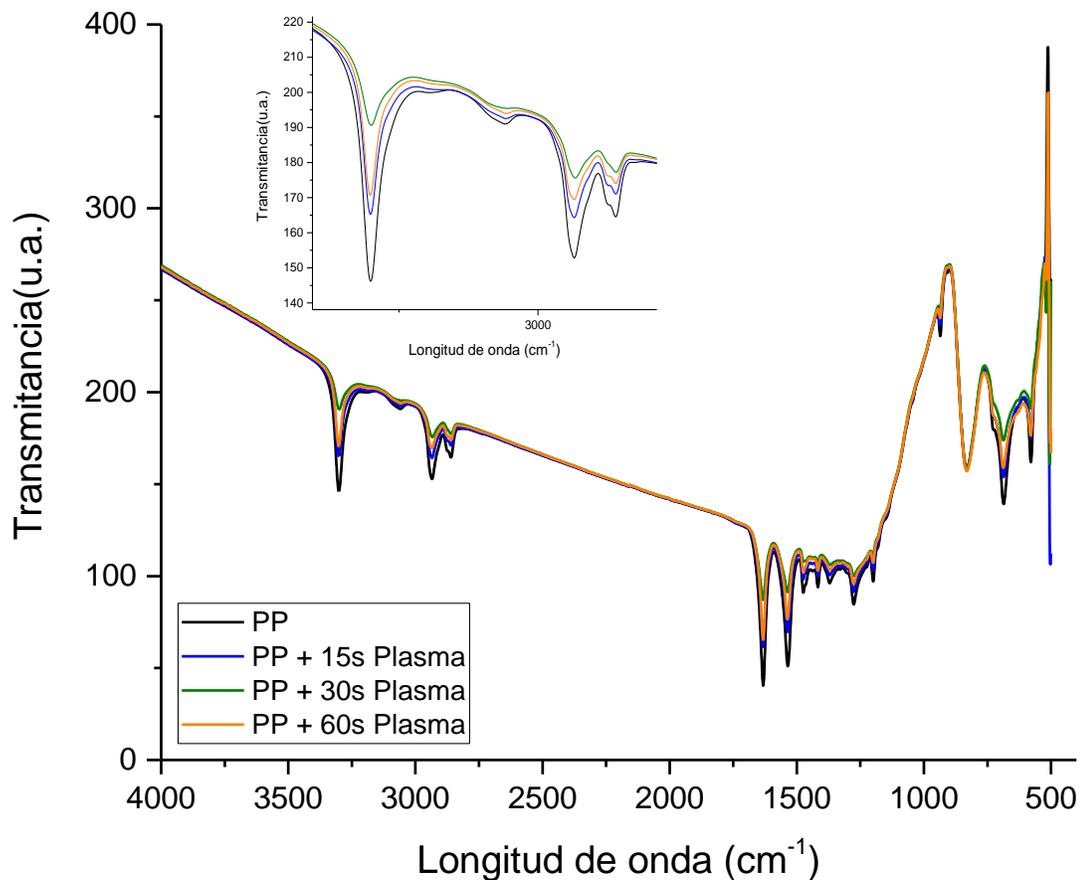


Figura 36. Espectros de FTIR del recubrimiento de nylon puro y con tratamiento de plasma atmosférico

En la figura 37 se muestran los espectros del recubrimiento con nylon reciclado tratado con diferentes tiempos de aplicación del plasma atmosférico. En los cuales se observan las bandas correspondientes a los estiramientos del grupo N-H, también se observan las bandas de absorción relativas al estiramiento C-H. Entre mayor sea el tiempo del tratamiento con plasma mayor es la banda de absorción conocida como amida debido al estiramiento del grupo C=O.

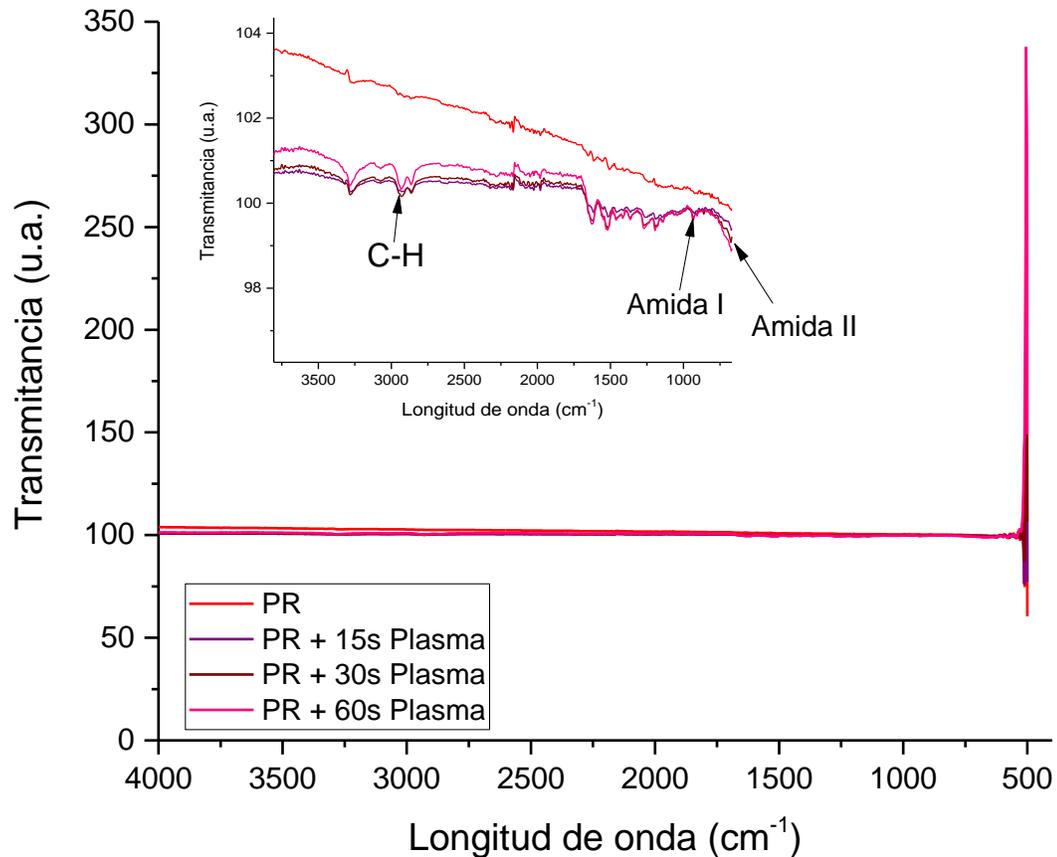


Figura 37. Espectros de FTIR del recubrimiento de nylon reciclado y con tratamiento de plasma atmosférico

#### 4.2.4 Ángulo de contacto

En esta sección se discuten los resultados obtenidos en las diferentes medidas del ángulo de contacto del recubrimiento de nylon en ácido fórmico y etanol al 12% con la variación en el tratamiento de plasma después de su formación. Observando las formas de las gotas se puede decir si el tratamiento con plasma aplicado después de la formación del recubrimiento ha sido de tipo hidrófilo.



En la figura 38 se observan que los recubrimientos tienen un  $\theta < 90^\circ$ , por lo tanto, presentan un carácter hidrófilo.

El ángulo de contacto del recubrimiento de nylon puro mantiene su carácter hidrófilo en el tiempo en cambio los recubrimientos con nylon reciclado tienden a aumentar en el tiempo y posteriormente regresan a su estado inicial cabe mencionar que las probetas se monitorearon durante 30 días.

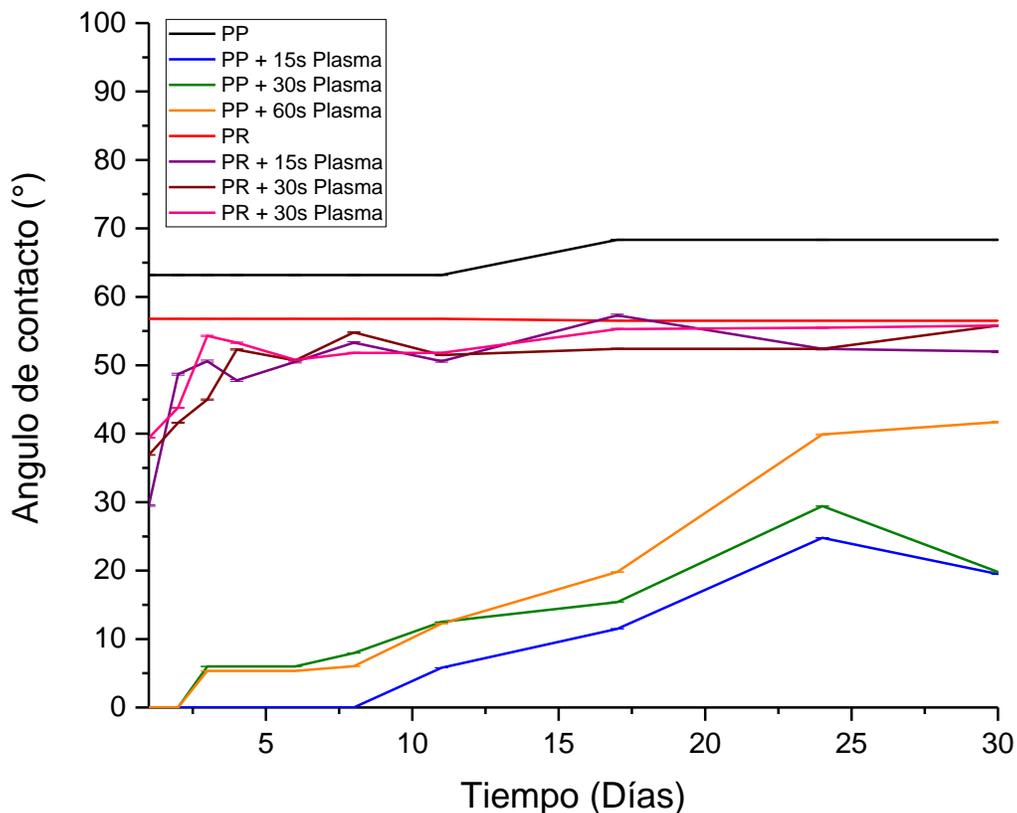


Figura 38. Variación del ángulo de contacto con respecto al tiempo de nylon puro (PP) y nylon reciclado (PR) sin y con tratamiento de plasma

#### 4.2.5 Ensayos mediante técnicas ópticas

El comportamiento del sistema sustrato recubrimiento en el espectro visible de la luz natural, así como el sustrato tratado con plasma y el recubrimiento tratado

posteriormente con plasma generado sobre sustrato de acero 316L y preparadas a 300 rpm por la técnica de spin-coating se muestran de manera gráfica la reflectancia de cada uno de los recubrimientos, como se puede observar la reflectancia no sufre cambios significativos con los tratamientos con plasma atmosférico en la figura 39: a) recubriendo de nylon, b) recubrimiento tratado con plasma después de su formación y c) sustrato tratado con plasma antes de la formación del recubrimiento. El análisis de reflectancia se realizó para determinar la cristalinidad de las películas poliméricas.

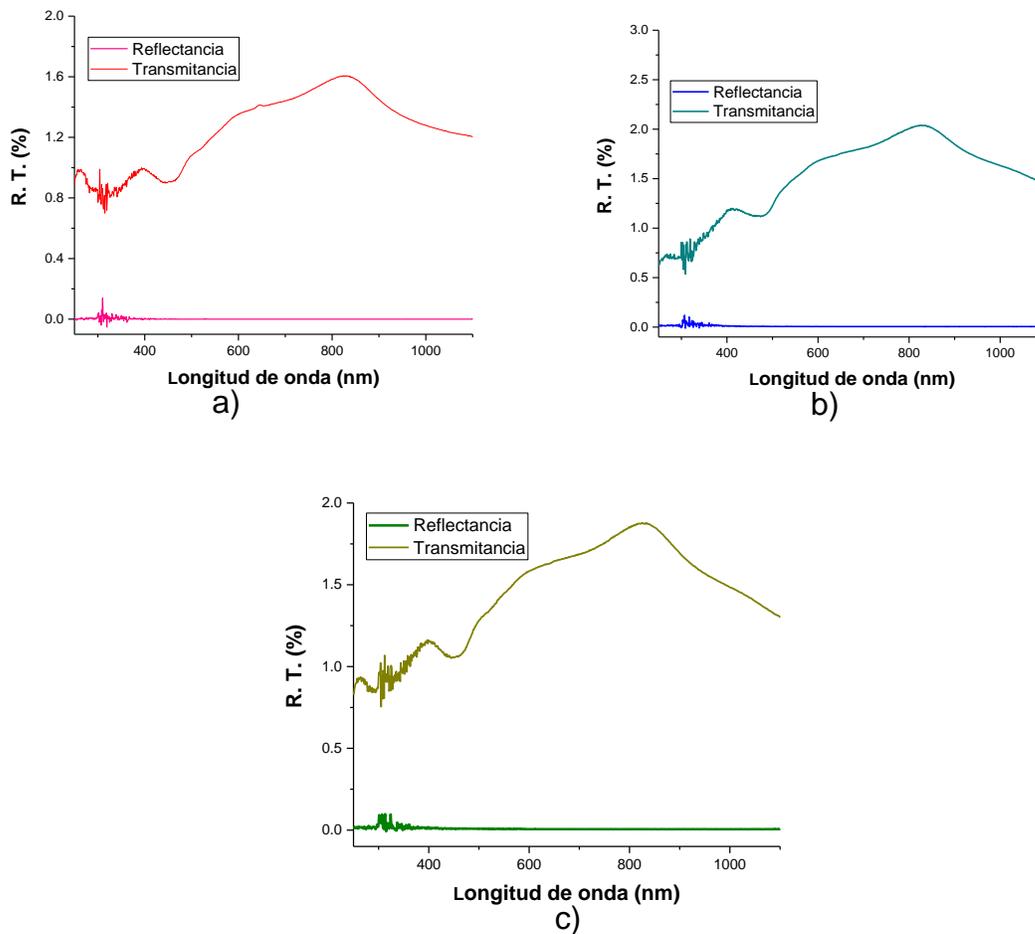


Figura 39. Las imágenes de esta figura muestran el comportamiento de la transmitancia y la reflectancia espectral de los diferentes recubrimientos sobre el sustrato de acero: a) Nylon, b) recubrimiento tratado con plasma y c) sustrato tratado con plasma antes del recubrimiento



## 4.2.6 Caracterización electroquímica

En la figura 40 se muestran las curvas de polarización del material acero 316L como sustrato base y el recubrimiento de nylon 6,6 en una solución de NaCl al 3% a 25 °C a una velocidad de barrido de 0.125 mV/s.

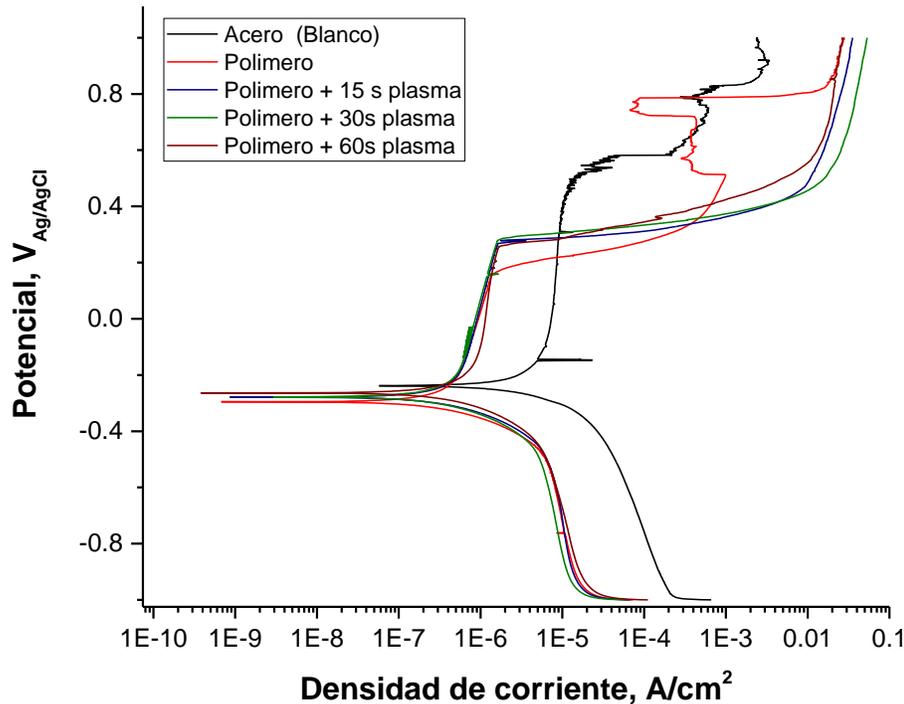


Figura 40. Curvas de polarización del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 s)

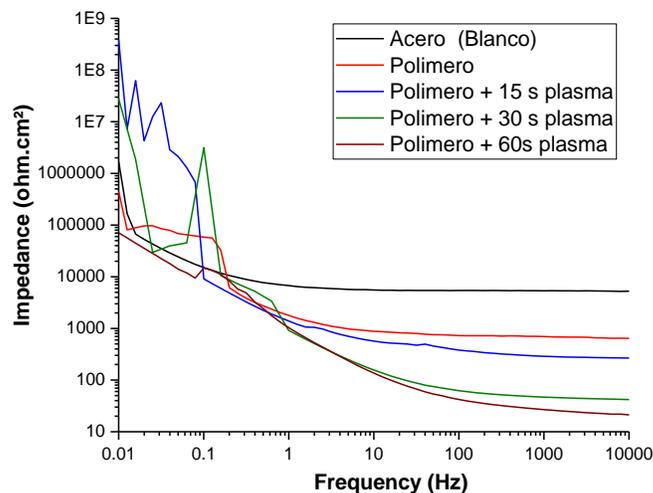
En las curvas de polarización potencio dinámica se observa que los recubrimientos con nylon 6,6 evidencian una mejora en la resistencia a la corrosión con respecto al del material base, en donde las densidades de corriente de corrosión son menores con respecto al material base. El comportamiento del acero mostro una polarización anódica típica del comportamiento de un acero inoxidable en una solución de NaCl que consiste en la disolución activa, pasividad y un rápido aumento de la densidad de corriente debido a picaduras.

Comparando las cinco curvas juntas, se puede observar que las probetas con recubrimiento se desplazan una década menor en la densidad de corriente presentando una velocidad de corrosión menor, los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.

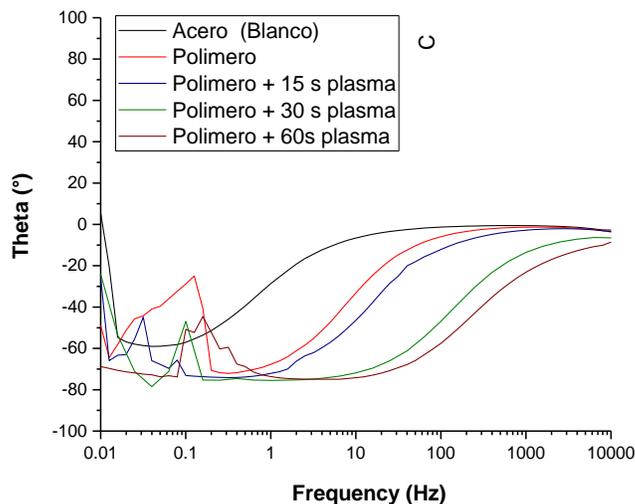
Tabla 6. Resumen de los resultados de las curvas de polarización del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6.6

|                          | $E_{corr}$<br>(V <sub>Ag/AgCl</sub> ) | $I_{corr}$<br>(A/cm <sup>2</sup> ) | $\beta_a$ | $\beta_c$ | Velocidad de<br>corrosión<br>(mm/año) |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|
| Acero 316L               | -238                                  | 2.49x10 <sup>-6</sup>              | 13.67     | 10.18     | 0.0167                                |
| Polímero                 | -292                                  | 3.40x10 <sup>-7</sup>              | 14.76     | 20.30     | 2.37x10 <sup>-3</sup>                 |
| Polímero +<br>15s plasma | -280                                  | 3.76x10 <sup>-7</sup>              | 17.68     | 16.60     | 2.62x10 <sup>-3</sup>                 |
| Polímero +<br>30s plasma | -277                                  | 3.98x10 <sup>-7</sup>              | 10.96     | 14.10     | 2.78x10 <sup>-3</sup>                 |
| Polímero +<br>60s plasma | -257                                  | 4.20x10 <sup>-7</sup>              | 13        | 14.80     | 2.93x10 <sup>-3</sup>                 |

En la figura 41 se muestran los gráficos que representan el módulo y el ángulo de la fase de impedancia de los sistemas con y sin recubrimiento de nylon 6,6 inmerso en NaCl al 3% con un barrido de frecuencia de 0.01 a 10000 Hz La grafica 41(a) señala un valor de  $1.64 \times 10^6$  ohm de impedancia para el acero 316L (sustrato); mientras el recubrimiento en las mismas condiciones arroja un valor de  $9.76 \times 10^6$  Ohms, para el recubrimiento con 15 segundos de tratamiento con plasma se tiene un valor de  $3.93 \times 10^8$  Ohms para el recubrimiento con 30 segundos de plasma se tiene  $2.41 \times 10^7$  Ohms y para el polímero con un tratamiento de plasma de 60 Segundos se tiene un valor de  $7.39 \times 10^4$  ohms.



(a)



(b)

Figura 41. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 0h en solución de NaCl al 3%

En la figura 42 se muestran los gráficos de la impedancia a 24 horas después de su exposición en cloruro de sodio al 3% con un barrido de frecuencia de 0.01 a 10000 Hz dónde se puede apreciar qué el polímero con 30 y 60 segundos de

tratamiento con plasma disminuye su valor dos décadas respectivamente en cambio el polímero sin tratamiento y con 60 segundos de tratamiento se mantiene constante en el tiempo de igual manera en la gráfica 42(b) se puede apreciar el ángulo del ángulo de fase en dónde se puede ver qué hay una fluctuación en el recubrimiento con 15 y 30 segundos de plasma.

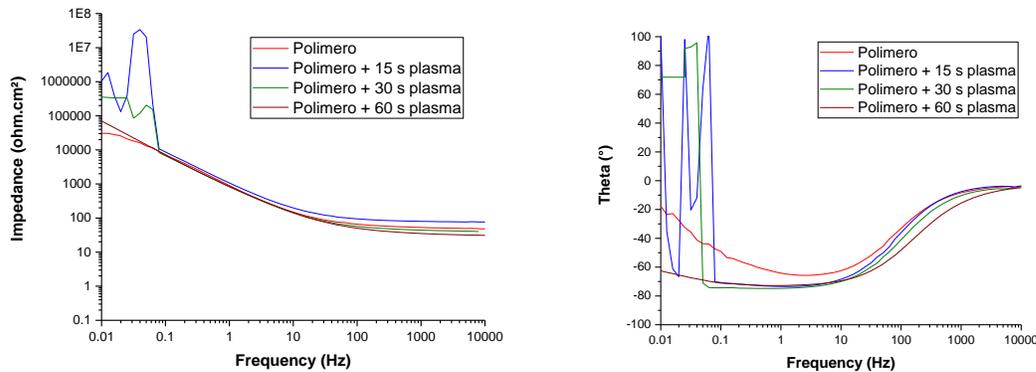


Figura 42. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 24h en solución de NaCl al 3%

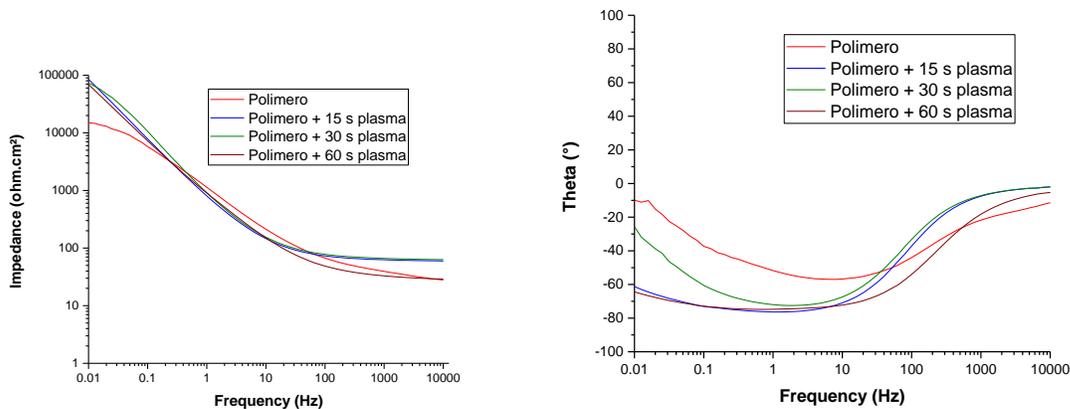
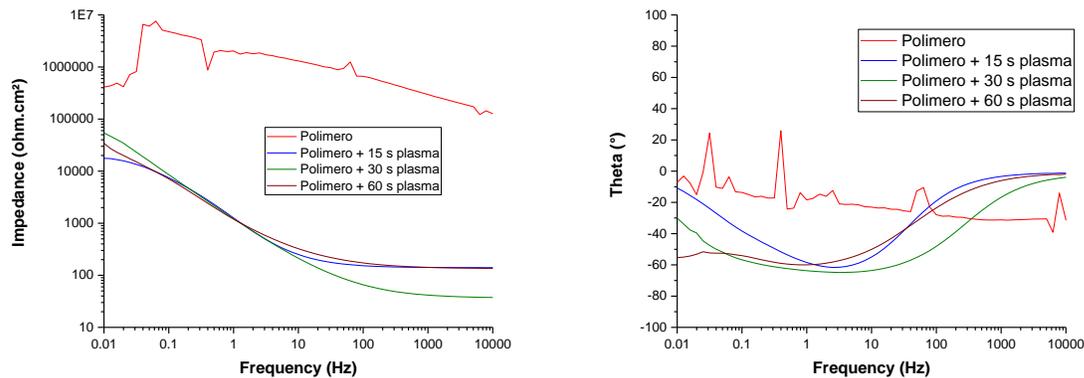


Figura 43. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 48h en solución de NaCl al 3%

En la figura 43(a) se puede observar los espectros de impedancia total para el polímero y las probetas con tratamiento con plasma 15, 30 y 60 segundos de este,

se puede observar que la impedancia total es similar en los tres casos que se tiene tratamiento con plasma, con un valor aproximado de  $6 \times 10^4$  y  $8 \times 10^4$  esto es después de 48 horas de exposición en el medio de cloruro de sodio con un barrido de frecuencia de 0.01 a 10000 Hz.



**Figura 44. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 120h en solución de NaCl al 3%**

En la figura 44 se puede observar que después de 120 horas de exposición al medio la impedancia del polímero sobre el sustrato aumenta a un valor de  $4.13 \times 10^5$ , esto se puede relacionar con las fisuras del recubrimiento. Por lo cual el medio está interactuando con el sustrato formando óxidos que sirven y funcionan como una capa protectora y eso también se puede observar en la gráfica 44(b) donde el ángulo de fase tiene un comportamiento positivo donde se puede asociar con procesos de adsorción de especies sobre la superficie que son los cuales están haciendo la protección sobre el material metálico.

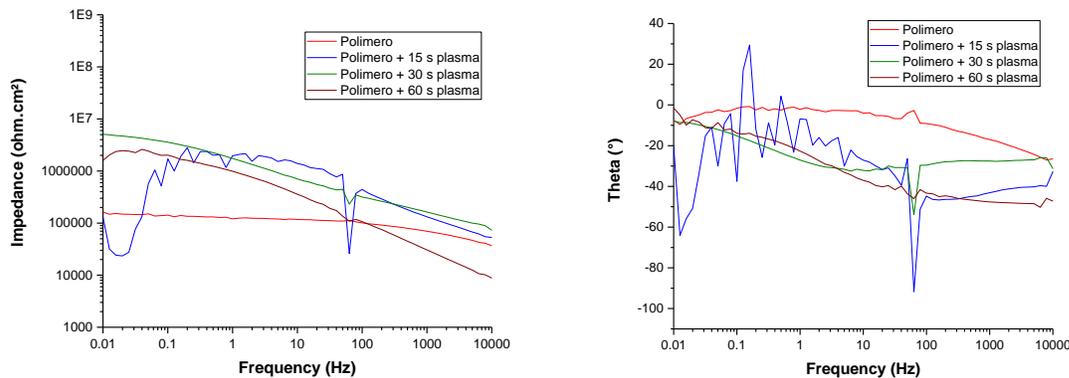


Figura 45. (a) Espectroscopia de impedancia y (b) ángulo de fase del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) a un tiempo de inmersión de 288h en solución de NaCl al 3%

En la figura 45 a después de 288 horas de exposición del medio se puede ver que el recubrimiento sin tratamiento con plasma su impedancia se mantiene constante con un mínimo de variación un cambio en el material con 15 segundos de plasma baja la impedancia, con 30 y 60 segundos de tratamiento se mantiene constante de igual manera se puede ver en la figura 45b donde el ángulo de fase se mantiene positivo, donde es característico de procesos de adsorción de especies esto se puede atribuir a los óxidos o a los productos de corrosión que se están formando sobre la superficie del material metálico y esto se debe a posibles fisuras del recubrimiento.

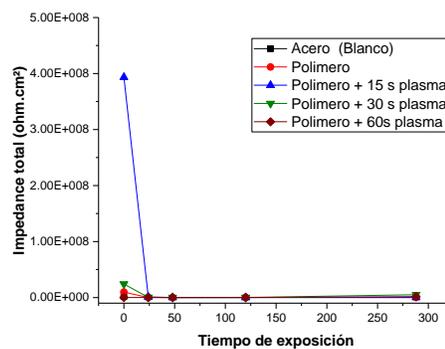


Figura 46. Impedancia total del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos)

En la figura 46 se puede observar cómo va cambiando la impedancia total en el tiempo de exposición en el medio de cloruro de sodio, el polímero con 30 y 15

segundos de plasma en el tiempo inicial (0 horas) con una impedancia total alta de  $4 \times 10^8$  conforme va pasando el tiempo va disminuyendo hasta caer a un valor de aproximadamente  $1.19 \times 10^5$ , en la tabla 7 se muestran los valores de impedancia en el tiempo, el polímero con 30 segundos de tratamiento con plasma después de 288 horas mantiene una impedancia total mayor que el acero base.

Tabla 7. Impedancia total del acero 316L y de los recubrimientos de nylon 6,6 tratados con diferentes tiempos de plasma (15, 30 y 60 segundos) durante 288 horas de inmersión

| Tiempo /<br>Horas                | 0         | 24      | 48    | 120    | 288     |
|----------------------------------|-----------|---------|-------|--------|---------|
| <b>Acero 316L</b>                | 1642932   |         |       |        |         |
| <b>Polímero</b>                  | 9768170   | 31132   | 14630 | 413331 | 161744  |
| <b>Polímero +<br/>15s plasma</b> | 393362935 | 1173841 | 83052 | 17696  | 119234  |
| <b>Polímero +<br/>30s plasma</b> | 24193638  | 374114  | 70110 | 51448  | 5124805 |
| <b>Polímero +<br/>60s plasma</b> | 73910     | 69938   | 67203 | 34261  | 1675361 |

## Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo de investigación son las siguientes:

El tratamiento con plasma atmosférico es uno de los medios más adecuados para aumentar la energía superficial y la fuerza de adhesión. Esto se debe a que el tratamiento con plasma atmosférico funcionaliza la superficie del recubrimiento, añadiendo grupos polares a las cadenas alquílicas. El tiempo óptimo de tratamiento en la mejora de su hidrofilia y morfología fue de 30 segundos, esto se pudo observar en el microscopio SEM.

Las propiedades analizadas fueron de acuerdo con los principales factores que afectan los mecanismos de adhesión: química superficial, rugosidad, humectabilidad y cristalinidad. La caracterización química se realizó a través de Espectroscopía Infrarroja, la cual reveló la integridad del recubrimiento. El aumento de la energía libre superficial se debe al componente polar, debido a la funcionalización de los grupos polares en la superficie, lo que demuestra el efecto de las especies activas del plasma en la superficie química.

La medición del ángulo de contacto mostró que el plasma aumenta significativamente la humectabilidad de la superficie, principalmente en las muestras de Nylon 6,6, donde disminuyó de  $68^\circ$  a  $0^\circ$ , y para las muestras de GF-N66 de  $56^\circ$  a  $18^\circ$ . Manteniendo su hidrofilia después de 30 días de tratamiento. En consecuencia, la energía libre superficial aumentó de  $51.9$  a  $79.1 \text{ mN m}^{-1}$ , para las muestras recubiertas con Nylon 6,6. Para las muestras de GF-N66, el SFE aumentó de  $56.2$  a  $74.8 \text{ mN m}^{-1}$ .

La caracterización de la superficie mostró cambios aparentes en el grabado de la superficie causado por el plasma. Los parámetros de rugosidad aumentan para ambos recubrimientos según el tiempo de tratamiento con plasma.

Se tienen una mayor rugosidad con un tiempo de tratamiento de 60 s. Excepto para las muestras tratadas por 30s, donde la rugosidad disminuye debido a los mayores reordenamientos en la región cristalina por grupos polares. La evaluación de la cristalinidad proporcionó evidencia complementaria para este estado. Finalmente, la principal implicación de este estudio fue que el tratamiento con plasma usa aire como gas portador, lo cual es una tecnología económicamente viable para ser ampliada y aplicada para mejorar las propiedades superficiales en polímeros reciclados.

Se puede concluir que el recubrimiento ayuda a proteger al sustrato metálico de acero 316L aproximadamente bajando la densidad de corriente aproximadamente una década y la velocidad de corriente también es menor en los con recubrimientos con tratamiento con plasma, de igual manera se puede decir que el tratamiento con plasma ayuda en la adherencia del recubrimiento al sustrato, pero tiene una mayor significancia en la velocidad de corrosión ya que homogeniza la superficie del recubrimiento. A 30 segundos se tiene una menor velocidad de corrosión.

El recubrimiento con 60s de plasma disminuye su impedancia con el tiempo esto se debe a la hidrofilia del recubrimiento de nylon 6,6.

De las curvas de polarización que se obtuvieron, se puede concluir que los sustratos con recubrimiento tienen una menor velocidad de corrosión y no se observa procesos de picado, pero si una disolución del material metálico lo cual nos indica que el recubrimiento tiene un carácter protector.

La alternativa de reciclaje de nylon 6,6 de polímero de desecho plástico para la formación de recubrimientos es viable debido a que presenta una menor degradación en el tiempo, en comparación de cómo se realiza cotidianamente la disposición final de estos polímeros.

Por último se realizó la interpretación del ACV en la que se combinan los resultados de análisis del inventario con la evaluación del impacto ambiental, lo cual se realizó con el Software EIA09, que es una aplicación de software multiplataforma, libre, gratuita y abierta para realizar evaluaciones de impacto ambiental de una amplia gama de proyectos de ingeniería.

Las películas poliméricas es una alternativa que genera un menor impacto sobre el medio ambiente. Por otra parte, la disposición final en vertederos a cielo abierto es el que presenta un mayor impacto ambiental en comparación con los otros dos escenarios. En el primer caso, la mayor acumulación de los residuos sólidos en espacios abiertos, las emisiones de COVs y los lixiviados son los acusantes de que la carga ambiental sea elevada, al contrario de los vertederos controlados. Considerando los valores de las categorías, la que posee una mayor repercusión es la de fauna nociva, debido principalmente a la proliferación de fauna nociva precursora de enfermedades.

## Bibliografía

- [1] M. Santillán, «Una vida de plástico,» México, 2019.
- [2] (CNGMD), «Módulo 6: Residuos Sólidos Urbanos. Aguascalientes. México. 2013.,» GODF. Decreto por el que se reforman diversas disposiciones de la ley de residuos sólidos del Distrito Federal. México., México, 2012.
- [3] CEMPRE, «Capítulo IV. Disposición final de residuos sólidos,» de *Manual de gestión Integral*, Uruguay, Residuos Sólidos Urbanos, pp. 102-154.
- [4] B. Ahumada, M. Pelayo y A. Arano, «Sustentabilidad Ambiental, del concepto a la práctica. Una oportunidad para la implementación de la evaluación ambiental estratégica en México,» *Gestión y política pública*, vol. XXI, nº 2, pp. 291-332, 2012.
- [5] Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>.
- [6] Naciones Unidas, «Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>.
- [7] Naciones Unidas, «Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>.
- [8] Naciones Unidas, «Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>.
- [9] Naciones Unidas, «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>.
- [10] M. Paulin y J. Carrillo, «El clúster como categoría estructurante del análisis para el estudio de la gestión ambiental de la industria queretana de autopartes,» de *El mundo del trabajo: realidades, desafíos y oportunidades*,

México, Ediciones y Gráficos Eón, S.A. de C.V., 2018, pp. 41-56.

- [11] ProMéxico, «Industria Automotriz,» Ciudad de México, 2014.
- [12] Agenda Automotriz, «Diálogo con la industria automotriz 2018 - 2024,» Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, Ciudad de México, 2018.
- [13] ProMéxico, «La Industria Automotriz Mexicana: Situación actual, retos y oportunidades,» Secretaría de Economía, México, 2016.
- [14] V. Ramos, «Evolution of the use of plastic materials in the automotive industry,» *INNOVA Research Journal*, vol. 3, nº 12, pp. 17-27, 2018.
- [15] Rau, M. & Nentwig, P., «Plastics in cars: polymerisation and recycling,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.scienceinschool.org/2011/issue20/plastics>.
- [16] F. Torres, «Polímeros: Procesos de manufactura y diseño. Parte 1: Termoplásticos,» *Revista de Química*, vol. XIII, nº 1, pp. 55-67, 1999.
- [17] Miembro de Ravago Group, «ABS, Acrolonitrilo Butadieno Estireno,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/abs.html>.
- [18] B. L. Contreras, T. L. Vargas y L. R. Ríos, Procesos de fabricación en polímeros y cerámicos, Bogotá: Ediciones de la U, 2018, pp. 126-130.
- [19] Compendio de Estadísticas Ambientales, «Informe de la Situación del Medio Ambiente en México: Residuos.,» Secretaría de Medio Ambiente en México, México, 2016.
- [20] C. R. González, «En un mar de residuos: EL cambio necesario,» Coyoacán , 2015.
- [21] NOM-252-SEMARNAT-2005, «Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, qu establece las características, el procedimie identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.,» Diario de la Federación, Ciudad de México, 2006.
- [22] E. Castillo y L. De Medina, «Generación y composición de residuos sólidos domésticos en localidades urbns pequeñas en el Estado de Veracruz,

México,» *Int. Contam. Ambien.*, pp. 81-90, 2014.

- [23] Dirección General de Estadística e Información Ambiental de la SEMARNAT, «Informe de la Situación del Medio Ambiente,» SEMARNAT, Ciudad de México, 2014.
- [24] M. L. Ortiz, «El impacto de los plásticos en el ambiente,» *La Jornada Ecológica*, p. 5, 27 Mayo 2013.
- [25] Dirección General de Estadística e Información Ambiental de la SEMARNAT, «Informe de la Situación del Medio Ambiente en México: Residuos,» SNIARN, Ciudad de México, 2012.
- [26] M. A. Vázquez, V. R. Espinosa, B. M. Villavicencio y P. M. Velasco, «El reciclaje de los plásticos,» Ciudad de México, 2016.
- [27] F. S., *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión.*, Madrid: C.S.I.C., 1984, pp. 9-43.
- [28] P. S. Castaño, «Corrosión atmosférica del zinc en ambientes exteriores e interiores,» *Revista de Metalurgia*, vol. 43, nº 2, pp. 133-145, 2007.
- [29] R. U. J. Muñoz, «Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la zona metropolitana de la ciudad de México.,» *Internacional de contaminación Ambiental*, vol. 18, nº 1, pp. 27-32, 2002.
- [30] J. A. González, «Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos: estudio electroquímico y microelectroquímico,» 2009. [En línea]. [Último acceso: 2019].
- [31] Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica., «Polímeros,» de *Guía didáctica*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Saavedra 789. C1229ACE., 2011, pp. 6-70.
- [32] L. F. Bedoya, «Protección contra la corrosión - Recubrimiento con polímeros,» de *Mtalografía*, Perreira, Universidad Tecnología de Perreira, 2015, pp. 150-198.

- [33] F. J. Trujillo Santacoloma, *Soluciones Acuosas: Teoría y Aplicaciones*, Medellín: Editorial Universidad de Medellín, 2004.
- [34] D. Leal, L. García y D. & M. J. Moronta, «Diseño y construcción de un sistema automatizado para la elaboración de películas delgadas, por el método de inmersión,» *Facultad de Ingeniería UVC*, vol. 26, nº 1, 2011.
- [35] B. J.O´M. y R. A. K. N., *Electroquímica moderna*, vol. 2, Barcelona: REVERTÉ, 2003, pp. 1175-1191.
- [36] T. Gutierrez-Valencia, D. Chito-Trujillo y G. Cuervo-Ochoa, *Polímeros: Generalidades y tendencias de investigación en Colombia*, Popoyán, Colombia: Universidad del Cauca, 2019.
- [37] B.-G. «Técnicas de caracterización de los recubrimientos,» *Informador Técnico* 67, 2003.
- [38] A. Bishnoi, S. Kumar y N. Joshi, «Wide-angle X-ray diffraction (WXRd): technique for characterization of nanomaterials and polymer nanocomposites.,» de *Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization*, ELSEVIER, ELSEVIER, 2017, pp. 313-337.
- [39] N. A. Geisse, «AFM and combined optical techniques. Materials today,» *ELSEVIER*, vol. 12, nº 7-8, pp. 40-45, 2009.
- [40] P. E. Barraza-Garza, «La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos,» *Revista latinoamericana de química*, vol. 41, nº 13, pp. 125-148, 2013.
- [41] G. Fernández, «Espectroscopía UV,» de *Determinación Estructural*, Oviedo, Academina Minas, 2014, pp. 11-22.
- [42] J. Castro, A. Villanueva y C. Ortiz, «Raman spectroscopy and its applications,» *Óptica pura y aplicada*, vol. 46, nº 1, pp. 83-95, 2013.
- [43] J. González, «Curvas de Polarización Reales y Aparentes: Diagramas de Evans,» de *Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas*, Madrid, GRAFIPREN, 1989, pp. 45-70.

- [44] J. Genescá, «Extrapolación de Tafel (intersección),» de *Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión*, Queretaro, Facultad de Química, UNAM, 2002, pp. 40-52.
- [45] J. Medoza, R. Durán y J. Genescá, «Espectroscopía de Impedancia, Electroquímica en Corrosión,» de *Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión*, Queretaro, Facultad de Química, UNAM, 2002, pp. 53-92.
- [46] M. D. Kumar, «Hydrogenative depolymerization of nylons.,» *Journal of the American Chemical Society*, vol. 142, nº 33, pp. 14267-14275, 2020.
- [47] S. Sanmetal, «Termoplásticos,» Febrero 2020. [En línea]. Available: <http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/poliamida-66-pa-66/8>.
- [48] G. Bernanche, «Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región centro occidente de México,» *Rev. Int. Contam. Ambien*, vol. 28, pp. 97-105, 2012.
- [49] G. Comité Técnico ISO/TC 207, «ISO 14040:2006». <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es> Patente ISO 14040:2006, 1999.
- [50] NOM-052-SEMARNAT-2005, «Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.,» Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 2006.
- [51] P. D. Rodríguez-Eugenio, «La contaminación del suelo: Una realidad oculta,» Alianza Mundial por el Suelo, Roma, FAO, 2019.
- [52] NIPPON KOEI, «Proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en el Manejo Integral de los Residuos Sólidos a Nivel Nacional en la República Dominicana,» República Dominicana, 2017.
- [53] Censos Económicos, «Perfil de fabricación de productos plásticos,» Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México, 2017.

## Productos de divulgación de la investigación

- **Artículos**

- Junio -2021      **Artículo** - Superficial surface treatment using atmospheric plasma on recycled nylon 6,6, M. Rodríguez, E. Vázquez-Vélez, H. Martinez and A. Torres-Islas, J. Nucl. Phys. Mat. Sci. Rad. A. 8 (2), 191-196 (2021).
- Mayo -2022      **Capítulo de libro** - Análisis del ciclo de vida de impacto ambiental del proceso del recubrimiento polimérico de nylon 6,6 reciclado, UAEM
- Febrero-2023    **Artículo** - Surface modification of the Nylon 6,6 and wasted glass fiber-Nylon 6.6 coatings using atmospheric plasma treatment, M. Rodríguez, E. Vázquez-Vélez, A. Galván-Hernández, H. Martinez, A. Torres, Surfaces and Interfaces
- Enviado          Artículo - Life cycle analysis of a novel process for recycling nylon 6,6 from the automotive industry in México into polymeric coatings, M. Rodríguez, E. Vázquez-Velez, H. Martínez, A. Torres-Islas.
- En proceso      Artículo – Caracterización electroquímica del recubrimiento polimérico de nylon 6,6 reciclado.

- **Cursos**

- Abril -2020      “Separación de residuos urbanos e industriales” en línea
- Abril -2020      “Eficiencia energética y energía sostenible” en línea
- Octubre -  
2019              Programa de capacitación y actualización dirigido a servidores públicos de las unidades de estado.

- **Congresos**

|                   |  |
|-------------------|--|
| Mayo - 2021       | <b>Cartel</b> - Primer Congreso Internacional la Gestión integral de los Residuos en América Latina y el Caribe. |
| Julio – 2021      | <b>Cartel</b> - Latin Conference on Environmental and Chemical Process Systems Engineering #LatinEnvChemPSE.     |
| Septiembre - 2021 | <b>Ponencia</b> – Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.  |
| Noviembre - 2021  | <b>Cartel</b> – 5° Simposio del Cuerpo Académico Ecotoxicología de las moléculas a los ecosistemas               |
| Mayo - 2022       | <b>Cartel</b> – Advances Surfaces, Interfaces, and Interphases.  |
| Mayo - 2022       | <b>Ponencia</b> – Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.  |
| Octubre - 2022    | <b>Ponencia</b> – CETIS 12 Benito Juárez García  |
| Octubre - 2022    | <b>Ponencia</b> – Instituto de Ciencias Físicas, UNAM  |



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMATO T-2  
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA  
Y DICTAMEN DE REVISIÓN  
Cuernavaca, Mor., a 8 de mayo de 2023.

DR. JESÚS MARIO COLÍN DE LA CRUZ  
DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA  
DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ  
DR. CESAR TORRES SEGUNDO  
DR. ÁLVARO TORRES ISLAS  
DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA  
DRA. EDNA VÁZQUEZ VÉLEZ  
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta MARÍA DEL PILAR RODRÍGUEZ ROJÁS, titulada: EMPLEO DE NYLON RECICLADO PARA LA FABRICACIÓN DE RECURRIMIENTOS POLIMÉRICOS TRATADOS POR PLASMA E IMPACTO AMBIENTAL, realizada bajo la dirección del DR. ÁLVARO TORRES ISLAS del Programa Educativo de Doctorado en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE  
*Por una humanidad culta*

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ  
DIRECTORA DE LA FCQEI

DICTAMEN

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ  
DIRECTORA DE LA FCQEI  
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

| NOMBRE                              | VOTO     | FIRMA |
|-------------------------------------|----------|-------|
| DR. JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ    | APROBADO |       |
| DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | APROBADO |       |
| DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ       | APROBADO |       |
| DR. CESAR TORRES SEGUNDO            | APROBADO |       |
| DR. ÁLVARO TORRES ISLAS             | APROBADO |       |
| DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA       | APROBADO |       |
| DRA. EDNA VÁZQUEZ VÉLEZ             | APROBADO |       |

Se anexan firmas electrónicas



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

**Sello electrónico**

**HORACIO MARTINEZ VALENCIA** | Fecha:2023-05-12 06:32:38 | Firmante  
 ESqFUHSEd8mmCN7BaeMkVLSdyRGGRRH6UahJHfHWHC0M0moMTa7Uwro6m8WkaBqE PpaJHEBULKE 1UjH160eJgZZUeB00NU6C06407WQ+YUeB0a8Y7TtQmO  
 50xkAU8hGxOv9GQJH1eaoD9AQPj0F9kclH4vhtLh3LJC+6sHVCUMFyRZdJy7wEcmPaT7sZaG0A0G0G092bclAmJLdO+yQmT0MWMYx0QUwomZ+1ca5Y9PEW1dmY  
 1PpT9CnPhjYNDKwVlyZ23puDeRZZQZrcVwVp6GvV0RdZPgU+zaV80uMS0Jgls2oPgg\*\*

**JOGERNA VERGARA SANCHEZ** | Fecha:2023-05-12 07:21:22 | Firmante  
 m+eNjYmJgE3m95Yn8Zmk55v11D43FJ11emACVWhLuoCbbj21E5d1zlv5eCoaJ7HfYCyCclR1Rmd47kcczJQmK15TE1wvq+9godhd30cp5R9dhtT03uQTRAFJXdkNHH  
 pTVQppj0mCP8Raa65N+073PEV6u0FCQwCo3wa5zjvK0Z3HWAU8v8C16LZTA0hyUbn1MXD8Lmau3phdG56MypTEq4KUTK0gDv8vOa8Ezm00mgP6CKRAH7emj  
 Wq5q3FndP6clNeeEv8vM8Wq5nEmoynpPJX11NQ7j9X8QWFLD6v6T2ZvA\*\*

**ALVARO TORRES ISLAS** | Fecha:2023-05-12 09:25:34 | Firmante  
 W10Y+2Clq4PpJMMej0vPfwknKUyotAFaF8uLx7qkAZnaU05Vnozi1FGd5LUPzd11Pac87QmT5MVMbly3yMU+Ash3iaUHPHq7bd+ETmivGM7yv6ZwT2ZgnD+XVvCnK57  
 qO+drAM86GFRpWWh3aavb05oFjhd0c7nGclY8H0eapEzer2K02agnFO8maAALg0F4K0C0nyA2VtaGDUGZb45p2JuaAM853Y10X7v8vM0c4H0Y08WyeONLc665qDu  
 J8Qz9p0P0f11NubckvVhYpkaCQpVLLPEQbA58bp+H8jH7bXN0wvOYm0g\*\*

**CESAR TORRES SEGUNDO** | Fecha:2023-05-12 09:48:07 | Firmante  
 cFUW7UwMfUICvC7okjaR8bJ3Da80RM3FGH+K05VCH89qWU4a3y0402YmV808GZ3yQym1UDpCiarW8gmGDaMMedmOQ40Vlga56NqPpOxP6zANXD4(T8PUZx)  
 5QcQWFPDUP800za1dHFG8m0Emaal3nD0kTRXLPrCX7MY8ZrL5hUR07H4JkLv05Yc46Lw4U7pbDyCmmJH0z06GZ20Z2Ca4onYcFh4+4Za30X7HNLVWNP1G0Q  
 eVL3p8VNOPIERPaMJAT0vsk2b5K06Y2q1+0UbnZ8T8A0qD0j8h88chataQ0q1z056\*\*

**HUGO ALBERTO SALDARRIAGA NORDEÑA** | Fecha:2023-05-12 11:29:02 | Firmante  
 Cj8aU8q8bcpCp8aXGacN8dR+0X7YePyp4QEid7m8xOkFP8M9Vgda1oDP7b0TY1Uj+2wG6OoRvvaWj5De+TFN6K1YDp0RVM3UjY8kwaA3W0Lvaak8K30bbwaj  
 vO0eZ0Wp908Uy5W03MC4WQe+mm8qL+J0c0Z3lq+8nbNpMgKfPmN8yP85ngH8m9hG0Pwuv8Wb+1R3gpaF85DKgwa05R70EMjpaFj9vOmEaAa87Pka0VopC  
 Gkx8v73qgl8em+7cYbJLpU8e0028hE8gPaL5Ez0wJ4DV1MVOY0RpkN8aIG8gHGA\*\*

**JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ** | Fecha:2023-05-12 13:59:32 | Firmante  
 e0+36N0ygEaOnRUEh3Z3Ra4wM8ozH+08H9w0Cb+67QzJpDe51+G0Nw2d4VTeoBLWp1bGd00Me4ZZc0E8LW54zAhT0dDUWwYH+nT8VdqpJp2hGM5bF0vT5V  
 wian0375oLU0qMMZ0xY18P0wL7Gv0N0F2m529ek8rka08XvvoL8agGndvZ3ZTEqj65AEXGkZK6V110JLym8V1HYvFPeLhFYPjATUVB3+1AM357PuzH23ZMANCocD  
 GRHWjLVinDqaw8R0Pzv8N1CkV6ZTVZ6RExajZj+5W50M0n06u8H8L2b+00Pw\*\*

**EDNA VÁZQUEZ VELAZ** | Fecha:2023-05-12 16:19:53 | Firmante  
 Y4Em0pki1yOPJLd8r56g1Y100ZLaP8N8Vn8+3k4gm8Yq1q7c0V5vJTr00K00Eh0T4EJ+0F71ag8u7k4feUWY1FTugDu3MaT87X0VJLcWQ7harkh8b+Vh0T8Thk  
 E4XZ2c06Aa+J85CgC0aLzkaVw8md50YH+2IQg08110cc+05bHfY8PvUX0875W5E1uaaV8z3M#MouuK3mUc0dR8uMFJ067DK0v8wH6VomCmC0kLjgg7D  
 L805YLSwVb7nA4c0mC0XkaID0K+500P8V8v8v85JkP8v8Ap8a80Ggg\*\*



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

J48pbhKOP

<https://efirma.uaem.mx/hoRepudic/DY33MaL0vYDioqVw8m4p4GcFqYVw>