



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

---

**UNIDAD ACADÉMICA PROFESIONAL TIANGUISTENCO**

*“Caracterización de polialuminio y aluminio (Al), recuperado a partir de envases de Tetra Pak®, por microscopías y análisis térmicos”*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN PLÁSTICOS

P R E S E N T A

**LILIANA ROSALES HERNÁNDEZ**

DIRECTORES: DRA. LILIANA IVETTE ÁVILA CÓRDOBA.  
DR. CARLOS EDUARDO BARRERA DÍAZ.

# AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO (UAEM) y a la UNIDAD ACADÉMICA PROFESIONAL TIANGUISTENCO (UAPT), por darme la oportunidad de ser un profesional.

Al Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM (CCIQS) y al Instituto Nacional de Investigación Nuclear (ININ), por las facilidades brindadas para la realización de esta meta, y por abrirme las puertas.

A mis directores de tesis, la Dra. Liliana Ivette Ávila Córdoba y al Dr. Carlos Eduardo Barrera Díaz, por su esfuerzo y dedicación, quienes, con sus conocimientos, experiencia, paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

Al Dr. Fernando Ureña Núñez, M. en C. Melina Tapia-T y M. en C. Alejandra Núñez Pineda, por su colaboración en las pruebas que se realizaron en este proyecto.

A mis revisores Dra. Ana Lilia Flores Vázquez y Mtra. María Victoria Arroyo González, por sus observaciones y comentarios que enriquecieron este proyecto.

Al Ing. Johana Paulina Valencia Barron y al Dr. Orlando Soriano Vargas, por sus valiosos comentarios al presente trabajo, y por mostrarse siempre accesibles y dispuestos a colaborar.

# CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
CAPITULO 1 .....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Reciclaje.....	5
1.1.1 Reciclaje físico o mecánico .....	5
1.1.2 Reciclaje químico o terciario.....	6
1.1.3 Reciclaje energético o cuaternario .....	7
1.2 Importancia ambiental del reciclaje.....	8
1.3 Tetra Pak®.....	12
1.3.1 Celulosa.....	16
1.3.2 Polietileno de Baja Densidad (PEBD).....	18
1.3.3 Aluminio (Al).....	20
1.4 Reciclaje del Tetra Pak®.....	21
1.4.1 Reciclaje de PEBD .....	24
1.4.2 Reciclaje del Al.....	25
1.4.3 Reciclaje de la Celulosa .....	25
1.5 Técnicas analíticas para la caracterización del Tetra Pak®.....	26
1.5.1 Calorimetría diferencial de barrido.....	27
1.5.2 Análisis termogravimétrico (TGA).....	28

1.5.3	Microscopía Electrónica de Barrido con Análisis de Energía Dispersiva por Rayos X (SEM-EDS).....	28
1.5.4	Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) .....	30
1.5.5	Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM). .....	31
CAPÍTULO II .....		34
MATERIAL Y MÉTODOS.....		34
2.1	Material .....	34
2.2	Equipo .....	34
2.3	Desarrollo experimental .....	37
2.3.1	Diagrama de flujo .....	37
2.4	Desarrollo de las pruebas para la caracterización. ....	41
2.4.1	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Termogravimétrico (TGA), simultáneos. ....	41
2.4.2	Microscopía electrónica de Barrido con Análisis de Energía Dispersiva por Rayos X (SEM-EDS).....	42
2.4.3	Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) .....	43
2.4.4	Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM). ....	43
CAPÍTULO III .....		45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		45
3.1	Caracterización del Tetra Pak® .....	45
3.1.1	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	45
3.1.2	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	46
3.1.3	Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). ....	47
3.1.4	Microscopía Electrónica de Barrido. ....	48
3.1.5	Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM). ....	51

3.1.6	Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM) de la Celulosa.....	52
3.2	Caracterización del Polialuminio. ....	53
3.2.1	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	53
3.2.2	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	54
3.2.3	Microscopía de Fuerza Atómica. ....	55
3.2.4	Microscopía Electrónica de Barrido. ....	56
3.2.5	Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM). ....	58
3.3	Caracterización de Aluminio.....	59
3.3.1	Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). ....	59
3.3.2	Microscopía Electrónica de Barrido. ....	60
3.3.3	Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM). ....	62
3.4	Caracterización de Aluminio de lata. ....	63
3.4.1	Resultados de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). ....	63
3.4.2	Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM). ....	64
	CONCLUSIONES.....	65
	GLOSARIO.....	66
	REFERENCIAS.....	70

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la regeneración de productos en el reciclado químico. ....	7
Figura 2. Actuales y Futuros recicladores Distribución Geográfica. ....	11
Figura 3. Barreras de protección del envase de Tetra Pak®. ....	12
Figura 4. Estructura molecular de la celulosa.....	17
Figura 5. Estructura general del etileno y polietileno.....	18
Figura 6. Hidropulpeador.....	21
Figura 7. Polialuminio.....	22
Figura 8. Diagrama del proceso del reciclaje del Tetra Pak®. ....	24
Figura 9. Esquema del funcionamiento del microscopio electrónico de barrido. ...	29
Figura 10. Esquema del funcionamiento de un microscopio de fuerza Atómica. ...	31
Figura 11. Esquema del funcionamiento de un microscopio Confocal de Barrido Laser (CLSM). ....	32
Figura 12. Analizador Térmico. ....	34
Figura 13. Microscopio de Fuerza Atómica. ....	35
Figura 14. Micorscopio de Barrido Electronico.....	35
Figura 15. Microscopio Confocal de Barrido Láser.....	36
Figura 16. Diagrama de flujo. ....	37
Figura 17. Envases de Tetra Pak®. ....	38
Figura 18. Corte de envases de Tetra Pak®. ....	38
Figura 19. Procedimiento de lavado de Tetra Pak®.....	39
Figura 20. Procedimiento de secado de Tetra Pak®.....	39
Figura 21. Muestra Polialuminio.....	40
Figura 22. Termograma obtenido por DSC para la muestra de Tetra Pak® .....	45

Figura 23. Termograma obtenida por TGA para la muestra de Tetra Pak®.....	46
Figura 24. Distintos cortes de Tetra Pak® obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal. ....	47
Figura 25. Micrografía obtenida por SEM del Tetra Pak®.....	48
Figura 26. Micrografía obtenida por SEM del Tetra Pak® a 250X. ....	49
Figura 27. Análisis elemental por EDS del Tetra Pak®. ....	50
Figura 28. Micrografía por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM). ....	51
Figura 29. Micrografía por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM). ....	52
Figura 30. Termograma obtenida por DSC para la muestra de Polialuminio. ....	53
Figura 31. Termograma obtenida por TGA para la muestra de Polialuminio. ....	54
Figura 32. Distintos cortes de Polialuminio obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal. ....	55
Figura 33. Micrografía obtenida por SEM de Polialuminio a 250X. ....	56
Figura 34. Análisis elemental por EDS de Polialuminio.....	57
Figura 35. Micrografía por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM). ....	58
Figura 36. Distintos cortes de aluminio obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal ....	59
Figura 37. Micrografía obtenida por MEB-EDS de aluminio.....	60
Figura 38. Micrografías obtenidas por SEM-EDS de Aluminio.....	61
Figura 39. Micrografías obtenidas por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).....	62
Figura 40. Distintos cortes de aluminio obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal. ....	63
Figura 41. Micrografías obtenidas por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).....	64

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del PEBD.	14
Tabla 2. Propiedades del polietileno-aluminio de los envases de Tetra Pak®.	14
Tabla 3. Propiedades del Aluminio.	15
Tabla 4. Especificaciones de las muestras para el Análisis de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).	43
Tabla 5. Composición química de Tetra Pak®, por análisis elemental.	50
Tabla 6. Composición química de Polialuminio por análisis elemental.	57
Tabla 7. Composición química de Aluminio (Al), por análisis elemental.	61

# RESUMEN

El desarrollo tecnológico actual conduce a que la industria del reciclaje se convierta en importante suministradora de materia prima para la fabricación de los más disímiles artículos de consumo diario o de equipos de larga duración. Al mismo tiempo permite proteger el ambiente, ahorrar los recursos minerales y la energía [1]. Como es el caso de los envases multicapa, ya que resulta muy atractivo para muchos empresarios, cuando se recuperan en grandes cantidades del material [2].

Es importante la caracterización del material reciclado para obtener información y saber si es factible el reciclaje de este material compuesto, pero también tener información de cada uno de sus componentes. Es por eso que se plantea en este proyecto la caracterización, de aluminio y polialuminio (polietileno de baja densidad (PEBD)-aluminio) del envase de Tetra Pak®, mediante las técnicas analíticas: microscopía de fuerza atómica (AFM), microscopía electrónica de barrido con análisis de energía dispersiva por rayos X, microscopía confocal, análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC). El resultado del análisis de cada uno de los subproductos del hidropulpado y de separación térmica muestran que es posible recuperar aluminio y celulosa, en un grado de pureza alto el cual puede emplearse para reúso, por ejemplo, en la fabricación de nuevos productos o en todo caso en los mismos envases de Tetra Pak®, en el caso del PEBD, también se puede utilizar en la fabricación de otros productos u obtener energía de este.

La metodología utilizada consistió en la separación y selección de envases, así como la separación de la celulosa y aluminio, una vez efectuadas las técnicas de caracterización los resultados mostraron los porcentajes de pureza de los materiales, pérdidas de masa, morfología, la característica superficial de los materiales.

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria requiere de materiales con propiedades muy particulares (que entre otras incluyen bajo peso, alta resistencia, etc.) y con prolongada vida útil, lo da lugar a los materiales compuestos. Estos son considerados como un sistema o combinación de materiales insolubles constituido a partir de la unión no química de dos o más componentes que da lugar a uno nuevo, con características específicas y que se requieren para diversas aplicaciones [3], [4] como es el caso del Tetra Pak®. Sin embargo, el uso indiscriminado y la inadecuada disposición final de este tipo de envases, ha conllevado importantes problemas de contaminación ambiental, por lo que el empleo de distintos procesos de separación y reciclaje toman relevancia en la minimización del daño originado.

En este sentido, la caracterización de materiales de reciclaje a través de técnicas analíticas térmicas y microscópicas, cobra importancia para identificar algún cambio en la composición y propiedades fisicoquímicas de éstos, por ejemplo, en estructura, morfología o propiedades térmicas, lo que es una herramienta valiosa para posteriormente darles alguna aplicación específica [5].

La presente Tesis está dividida en tres capítulos a través de los cuales se pretende estudiar la caracterización por medio de microscopía electrónica de barrido con análisis de energía dispersiva por rayos x (SEM-EDS), microscopía de fuerza atómica (AFM), microscopía confocal de barrido laser (CLSM), también análisis térmicos como, calorimetría diferencial de barrido y análisis termogravimétrico (TGA), para el envase de Tetra Pak® y sus constituyentes polialuminio y aluminio (Al) separados vía mecánica.

En el capítulo I, marco teórico, se define el concepto y métodos de reciclaje, para plásticos, también se comenta la importancia ambiental, la descripción de Tetra Pak®, así como sus componentes, y cuáles son los métodos de recuperación para

este tipo de envase, pero asimismo para cada uno de sus componentes. Del mismo modo se describe cada una de las pruebas para la caracterización de Tetra Pak®.

En el capítulo II, material y método, se detalla el procedimiento técnico realizado, para cada una de las pruebas y la obtención de estas.

Finalmente, el capítulo III, Conclusiones, presenta las principales conclusiones obtenidas en la Tesis.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

# **CAPITULO 1**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Reciclaje**

Reciclaje significa separar o extraer materiales del flujo de desechos (normalmente post-consumo) sin valor económico y acondicionarlos para su comercialización de modo que puedan ser usados como materias primas en sustitución de materiales vírgenes [6].

La recuperación de los residuos sólidos es un intento de extraer más valor económico a través de ahorro de energía y materiales, así como la protección del ambiente. Los residuos sólidos son clasificados por su naturaleza química e inorgánica como: residuos inorgánicos (vidrio, cerámica y metales como hierro, zinc y aluminio); la recuperación de estos materiales ha sido objeto de estudio durante mucho tiempo. A diferencia de los anteriores, los plásticos tienen una estructura orgánica y la importancia de su adecuada disposición es fundamental en la protección del ambiente debido a su larga vida [7].

Existen tres métodos para el reciclado de plásticos:

#### **1.1.1 Reciclaje físico o mecánico**

Es un proceso físico y más utilizado mediante el cual el plástico luego de ser consumido o utilizado en procesos industriales, se vuelve a poner en circulación para su reúso. Este proceso de reciclado es el más usado actualmente; contempla el acopio, empacado, separación, molienda, lavado, secado y peletizado.

Dependiendo de la calidad del material resultante, el reciclado mecánico se conoce como primario o secundario: consiste en la conversión de los plásticos de desecho en artículos con propiedades fisicoquímicas iguales o similares a las del material original y normalmente es el procedimiento in situ de productos que no cumplen con los estándares de calidad del propio fabricante.

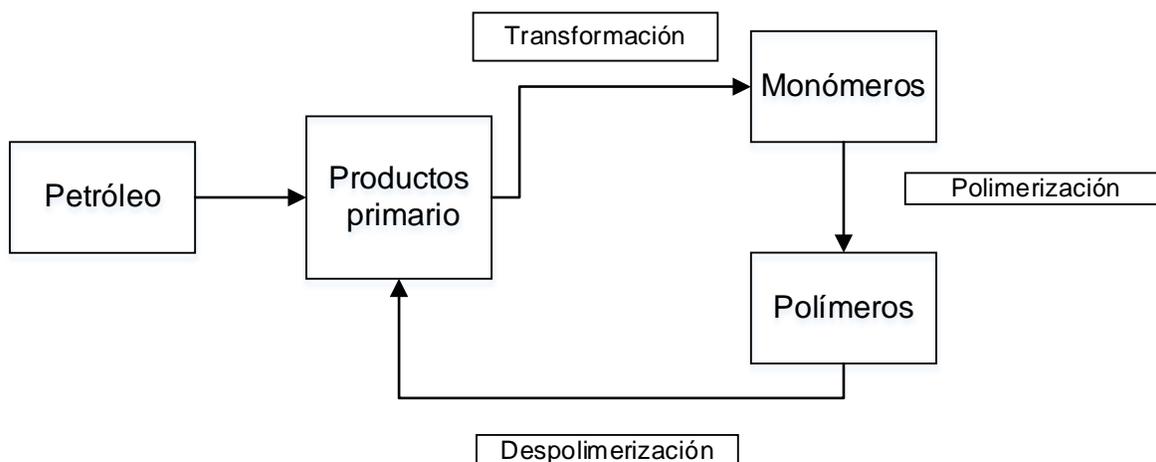
En el caso del reciclaje secundario, los plásticos provenientes de desecho (mezclados o solos) se transforman en productos nuevos, pero con una calidad inferior a la original; en este caso no se requiere la limpieza previa, por lo que en ocasiones son llamados plásticos contaminados [8].

### **1.1.2 Reciclaje químico o terciario**

No todos los materiales plásticos están en condiciones de ser sometidos a un reciclado mecánico, bien porque están muy degradados y no darían productos con buenas características, o porque se encuentren mezclados con otro tipo de sustancias que dificultan su separación y limpieza. Para éstos, existe otra opción para alargar la vida de estos materiales a través de diferentes tipos de reacciones químicas.

El reciclado químico, es un proceso por el que a partir de plásticos post-consumo se llega a la obtención de los monómeros u otros productos químicos como gas de síntesis y corrientes hidrocarbonadas, que serán transformados posteriormente en plásticos o bien en otros derivados.

El reciclado químico puede ser definido ampliamente como la reacción reversible de la polimerización dirigida a la recuperación de las materias primas, esquematizándose el proceso en la Figura 1.



**Figura 1. Esquema de la regeneración de productos en el reciclado químico.**

El reciclado químico aplicado a los plásticos procedentes de una polimerización por adición conduce a mezclas de compuestos hidrocarbonados, mientras que aquellos que se obtuvieron mediante reacciones de condensación originan los monómeros de partida (Figura 1) [9].

### **1.1.3 Reciclaje energético o cuaternario**

Es el tratamiento térmico de los plásticos de desecho para obtener energía, la cual se emplea para llevar a cabo otros procesos. Se fundamenta en la eliminación de la mayor parte del volumen de los residuos mediante combustión, transformando los desechos en gases, cenizas y escorias. Existen tres tipos de tecnologías de este tipo en función de los requerimientos de aire: pirólisis (en ausencia de oxígeno con la subsecuente formación de mezclas complejas de productos sólidos, líquidos o gaseosos), hidrogenación (proceso pirolítico en una atmosfera de hidrógeno o

monóxido de carbono) y gasificación (combustión parcial con aire limitado). De esta manera, el plástico se convierte en combustible proporcionando energía calorífica como tal o que puede emplearse para la generación de electricidad [10].

## **1.2 Importancia ambiental del reciclaje.**

Hace miles años, el paisaje de la tierra se caracterizaba por la presencia de grandes masas de vegetación, no existía contaminación y el agua era abundante y limpia [11]. Actualmente, existe una estrecha relación entre las cuestiones económicas y ambientales que se condicionan, a menos que se adopten políticas más ambiciosas, o procesos para el reciclaje, se espera que las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial crezcan en un 50% a partir de 2010 hasta 2050, con el grave riesgo de un aumento de 2°C en la temperatura media mundial. La población, sigue creciendo, con una previsión para 2050 de alrededor de 9,1 mil millones de personas en el mundo; esto requeriría un aumento en la producción de alimentos en un 70% [12].

La industria de la alimentación es uno de los sectores industriales más grandes del mundo y el principal consumidor de energía. La producción de alimentos, conservación y distribución, consumen una cantidad considerable de energía, lo que provoca el agotamiento de recursos (ya que el desarrollo de las sociedades y su adaptación evolutiva dependen en gran medida de los recursos de la naturaleza) y las emisiones contaminantes [13].

La protección del ambiente ya no se trata de un lujo o un capricho, sino que se ha convertido en una de las claves para asegurar el desarrollo futuro y la permanencia de la sociedad. No se trata sólo de proteger el ambiente en sí, sino que es una exigencia de la supervivencia y el desarrollo sostenido de la humanidad a medio y

largo plazo, además de una demanda social en cuanto a derechos como la salud y determinados niveles de calidad de vida [14].

Se basa en un aumento constante del consumo, que genera nuevas necesidades, y en la fabricación masiva de objetos de vida limitada, destinados al desecho una vez usados y que requieren un reabastecimiento constante. Estos objetos están pensados y diseñados para que no puedan recuperarse, son a menudo difíciles de reciclar, ya que es necesario separar sus múltiples y complejos componentes, como es el caso de los envases multicapa.

Este consumo incontrolado responde más a las necesidades creadas por la sociedad de consumo que a las del propio bienestar. La obligación de ostentar un determinado estatus genera comportamientos compulsivos, alentados por la publicidad que llevan a cubrir dudosas necesidades, las cuales desnaturalizan el concepto mismo de la calidad de vida [15].

Es importante recalcar el problema de la basura en el territorio nacional. Datos recientes señalan que de las 37.5 millones de toneladas de desechos que se generan al año, apenas 60% llega a los rellenos sanitarios establecidos en los municipios del país. El resto (40%) va a tiraderos a cielo abierto, corrientes de agua y sitios inadecuados, donde la basura contamina. Y en esa basura, el plástico es un componente muy importante.

La Asociación Nacional de Industrias del Plástico AC (ANIPAC), destacó que durante los primeros 10 meses del año 2013, el reciclaje de plásticos en el país aumentó 21%, debido a factores como el alto costo de la materia prima, entre otros.

De las 72 ramas de la actividad económica del país, la industria del plástico provee a 59, entre éstos la industria automotriz, eléctrica, electrónica, farmacéutica, agrícola y manufacturera [16].

El 50% de los materiales plásticos se dedican a la fabricación de envases y embalajes (plástico, cartón, Tetra Pak®), los cuales representan un 25-30% de los desechos domésticos [17].

El ingreso al mercado de los envases multicapa para bebidas se ha desarrollado en forma creciente, como informó la compañía Tetra Pak® internacional, sin embargo, en muchos países, todavía hay una falta de infraestructura para la gestión de los residuos domésticos generados que se eliminan a través de vertederos [18].

Los envases de cartón multicapa, son más livianos que el vidrio, no se quiebran fácilmente, permiten almacenar más tiempo las bebidas y son descartables sin posibilidad de reutilizarlo como envase de otras bebidas. Precisamente su condición de descartables ha originado el incremento de la basura en las ciudades donde es mayor el consumo, con la desventaja que sus componentes (75% cartón, 20% polietileno de baja densidad (PEBD) y 5% aluminio) no son biodegradables, y cada uno de estos materiales son reciclables [19].

El reciclaje mundial de envases de Tetra Pak® utilizados se ha incrementado en un 10% en 2012, desde 528 a 581 kilotoneladas, que es el 22.9% del total [20]. En 2013 se produjo 170 000 millones de envases, en las 42 plantas que tiene en todo el mundo, del cual, alrededor de 43 mil millones de envases fueron reciclados.

Tetra Pak® México informó que de 2003 al 2011 la tasa de reciclaje en México aumentó hasta cerca de un 14%. En 2010 se produjeron en México 6 000 millones de envases Tetra Pak®, de los cuales sólo se recicló 15% (13 500 toneladas) [21]. Para 2020 se espera duplicar el porcentaje de reciclaje de este tipo de envases de un 20 % a un 40 % a nivel mundial [22].

En México, al cierre del año 2013, en la planta de Querétaro se produjeron 6700 millones de envases; la compañía Tetra Pak® informó que colocó más de 590

millones de envases multicapa en México durante 2014 [23], de éstos se recicló cerca de 20 mil toneladas, los cuales se transformaron en papel reciclado y productos plásticos para usos múltiples [24]

Actualmente en la República Mexicana existen ocho empresas dedicadas al reciclaje de Tetra Pak®, cuatro están en el Estado de México, tres en el Distrito Federal, una en Querétaro, además de 24 centros de acopio alrededor del país. La distribución y futuros recicladores de dichos envases multicapa, se muestran en la Figura 2 [25].

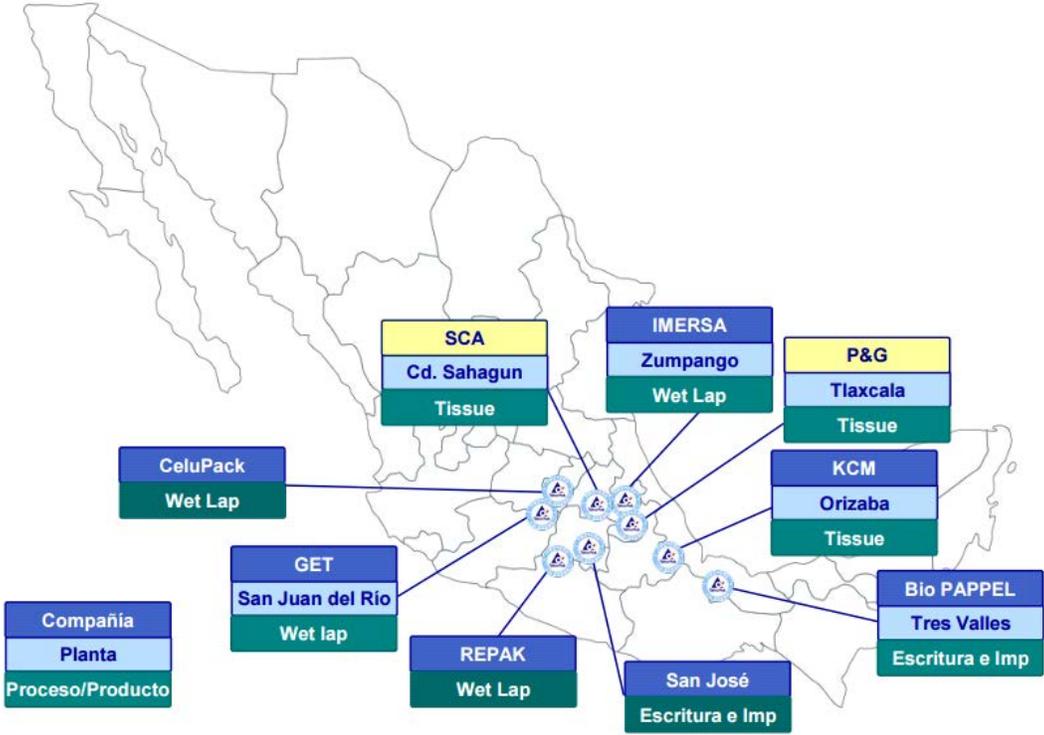


Figura 2. Actuales y Futuros recicladores Distribución Geográfica. [26]

### 1.3 Tetra Pak®.

Los cartones multicapa, llamados a menudo Tetra Pak® basado en el nombre de su primera y más grande empresa productora, son ampliamente utilizados como envases asépticos para bebidas como leche, jugo, vino, etc. (sin necesidad de refrigeración ni conservadores). Este sistema de embalaje permite que los productos sean distribuidos sin refrigeración durante períodos relativamente largos de tiempo [27].

Aunque la naturaleza del material compuesto de celulosa-polietileno-aluminio de envases de Tetra Pak® es esencial para la protección de toda la vida de los productos, por otro lado, esta misma naturaleza ha obstaculizado el reciclaje de los paquetes de post-consumo durante muchos años, ya que el reciclaje de los procesos diseñados para materiales compuestos multicapa requiere el desarrollo de tecnologías especiales para separar las capas que están hechos [28].

En la Figura 3, se muestra la estructura y la composición del envase de Tetra Pak®.

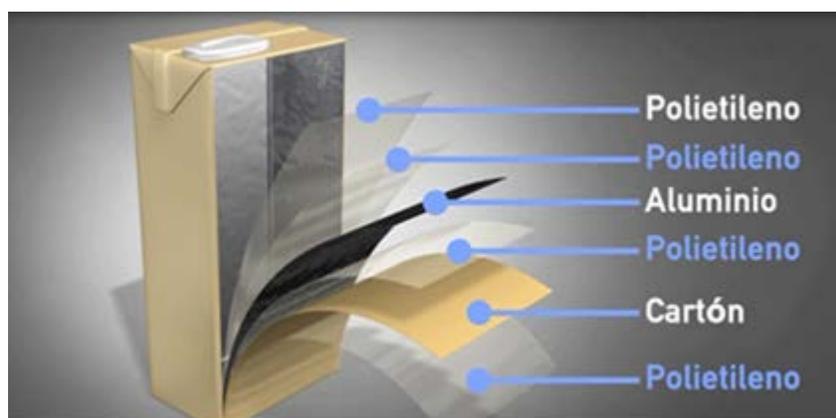


Figura 3. Barreras de protección del envase de Tetra Pak®. [29]

Del exterior al interior del envase las capas o barreras de protección son las siguientes:

- Primera: Polietileno, protección contra la humedad ambiental (tiene sólo 10  $\mu\text{m}$  de espesor).
- Segunda: Cartón, da forma, estabilidad, rigidez, resistencia, y en donde se realiza la impresión del diseño.
- Tercera: Polietileno, permite la adhesión entre el cartón y la capa de aluminio.
- Cuarta: Aluminio, con un espesor de 6.5  $\mu\text{m}$ , actúa como barrera contra la luz y el oxígeno, es la capa más importante del envase.
- Quinta: Polietileno, optimiza la adhesión del aluminio.
- Sexta: Polietileno, previene el contacto del producto con las otras capas del material de envases [30].

El envase que sólo consta de cuatro capas: 1, 2, 5 y 6 se denomina no aséptico; mientras que el aséptico cuenta con la capa número 4 de aluminio. En este trabajo se usó el envase aséptico Tetra Pak®.

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales empleados en la fabricación de envases multicapa se describen en las Tablas 1, 2, 3, correspondientes a PEBD, PE-Al y Al, respectivamente.

**Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del PEBD. [31]**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Punto de fusión.	110 °C
Densidad	
A 20° C	0.92 g/cm <sup>3</sup>
A 50°C	0.90 g/cm <sup>3</sup>
A 80°C	0.87 g/cm <sup>3</sup>
A 110°C	0.81 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young, (kg/cm <sup>2</sup> )	1.6
Resistencia a la tracción a (20°C, kg/cm <sup>2</sup> )	150
Dureza Brinell, (bola de 2mm Ø, y 3 kg)	2

**Tabla 2. Propiedades del polietileno-aluminio de los envases de Tetra Pak®.**

[32]

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Tensión a la ruptura, (MPa)	10.9
Elongación a la ruptura, (%)	38.8
Modulo elástico, (MPa)	177.6
Resistencia al impacto Izod, (MPa)	302.0
Conductividad eléctrica, (S/cm)	1.11x10 <sup>-8</sup>
Densidad, (g/cm <sup>3</sup> )	0.9

**Tabla 3. Propiedades del Aluminio. [33]**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad, (kg/cm <sup>3</sup> )	2.69
Punto de fusión, (°C)	660
Punto de ebullición, (°C)	2.51
Conductividad eléctrica, (S/m)	37.7x10 <sup>6</sup>
Conductividad térmica, (W/(km))	237
Módulo elástico, (GPa)	70

Los envases de Tetra Pak® son 100% reciclables y tienen un valor remanente. La revalorización a través del reciclaje, depende de que el subproducto pueda estar disponible para los recicladores y a su vez, que la sociedad pueda manejar integralmente los residuos que genera.

En el proceso de recuperación de envases Tetra Pak®, la reuso de Al-PEBD (polialuminio), es muy importante, representa aproximadamente el 25% del peso total del envase, pero el espesor del polialuminio, con un aproximado de 46.5 µm. Además, la alta resistencia de unión de 120 a 160 MPa entre las capas de Al y PEBD, lo cual hace difícil el reuso de cada uno de los compuestos [34].

Para entender mejor los procesos de reciclaje del Tetra Pak® a continuación se mencionan algunas generalidades de cada uno de los componentes de este tipo de envase, como es la celulosa, polietileno de baja densidad (PEBD) y el Aluminio.

### 1.3.1 Celulosa.

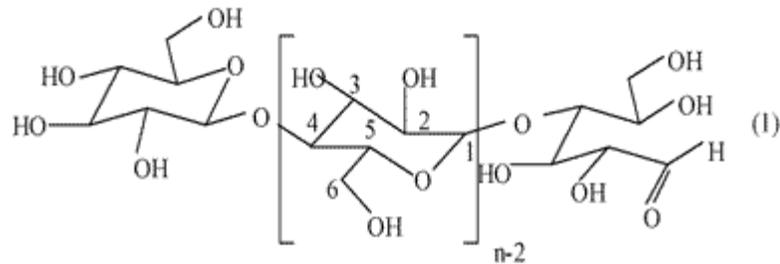
La celulosa, representa probablemente el polisacárido más abundante de todos en la naturaleza. Es el principal componente de los tejidos de sostén de los vegetales (componente estructural primario de las paredes celulares de las plantas, constituye de la mitad del carbono en la biosfera. [35]); la madera está constituida esencialmente de celulosa [36].

A diferencia de los polisacáridos de reserva, la celulosa y otros polisacáridos estructurales son moléculas extracelulares extruidas por las células que las sintetizan. Como la amilosa, la celulosa es un homopolisacárido lineal de residuos de glucosa, pero en la celulosa los residuos están conectados por enlaces glucosídicos  $\beta(1\rightarrow4)$  en lugar de enlaces  $\alpha(1\rightarrow4)$ . A través de los enlaces  $\beta(1\rightarrow4)$  se encuentran unidas las unidades  $\beta$ -D-glucopiranosas, así, se forman cadenas rectas reforzadas, además, por enlaces cruzados de puentes de hidrógeno. Por ser la celulosa un polímero lineal muy grande, se encuentra constituida hasta por 15,000 restos de D-glucosa (un glucano).

La celulosa puede encontrarse en forma de cadenas totalmente extendidas, de tal manera que cada residuo de glucosa presenta un giro de  $180^\circ$  respecto al residuo de al lado, de este modo las cadenas pueden formar cintas que se empaquetan una al lado de otra con una red de enlaces de hidrógeno dentro de ellas y entre ellas [37].

El papel utilizado en la elaboración de envases de Tetra Pak® está constituido químicamente por celulosa  $(C_6H_{10}O_5)_{200}$ , carbohidrato que se forma por la unión de moléculas de  $\beta$ -glucopiranosas mediante enlaces  $\beta$ -1,4 glucosídico [38].

En la Figura 4, se muestra la estructura molecular de la celulosa.



**Figura 4. Estructura molecular de la celulosa. [39]**

En el mundo se consumen 176 millones de toneladas de celulosa, siendo Estados Unidos el principal empleador de este insumo; por otra parte, el papel puede ser reciclado de tres a ocho veces, pero para ello necesita de celulosa [40].

Por cada tonelada que se recicla se recuperan 750 kilogramos de papel y se ahorran 3000 kW de energía eléctrica, 100 000 litros de agua y 221 kilogramos de combustible [41]. México en 1970 se recuperaban solo 350 000 toneladas de papel de desperdicio, pero ahora estos números han mejorado significativamente hasta colocar a México uno de los principales recicladores de papel.

La República Mexicana ocupa el tercer lugar a nivel mundial en reciclaje de papel, con 4.5 millones de toneladas de desperdicio al año, que representan 85% de la materia prima fibrosa utilizada [42].

### 1.3.2 Polietileno de Baja Densidad (PEBD).

El primer polímero comercial de etileno fue el polietileno ramificado, comúnmente denominado material de baja densidad o alta presión, llegó a ser en 1959 el primer plástico, con una producción superior a los 100 millones de lb, se produjo por primera vez en los laboratorios de Imperial Chemical Industries, Ltd. (ICI), Inglaterra, en un experimento fortuito en el que el etileno (y otras sustancias químicas que pertenecieron inertes) fue sometido a 1400 atm de presión a 170°C. Trazas de oxígeno hicieron que la polimerización tuviera lugar. El fenómeno fue descrito por primera vez por E. W. Fawcett [43].

El polietileno de baja densidad (PEBD) es un polímero que pertenece a la familia de los polímeros olefínicos, es decir que se deriva de la polimerización de las olefinas. Como su nombre lo indica, el polietileno está conformado por repetidas unidades de etileno. Se le considera un polímero de adición y su proceso de polimerización suele realizarse bajo presiones de 1500 a 2000 kg/cm<sup>2</sup> [44].

La estructura del PEBD es de cadenas muy ramificadas. Ésta característica hace que su densidad sea más baja en comparación con el polietileno de alta densidad (PEBD) [45]. En la figura 5, se presenta la síntesis que emplea etileno como monómero, así como su unidad funcional repetitiva.

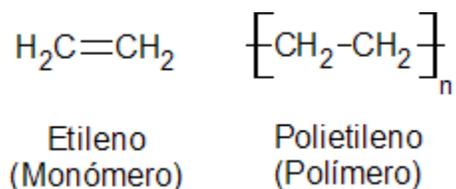


Figura 5. Estructura general del etileno y polietileno. [46]

### **1.3.2.1 Propiedades del polietileno de baja densidad (PEBD).**

El polietileno de baja densidad es un termoplástico comercial, semicristalino (un 50% típicamente), transparente y más bien blanquecino, flexible, liviano, impermeable, inerte (al contenido), no tóxico, tenaz (incluso a temperaturas bajas), con poca estabilidad dimensional, pero fácil procesamiento y de bajo costo [47]. Las propiedades físicas del polietileno son funciones de tres variables estructurales el peso molecular, la distribución de peso molecular o ramificación de cadena larga, y la ramificación de cadena corta.

La ramificación de cadena corta tiene un efecto predominante sobre el grado de cristalinidad y por consiguiente sobre la densidad del polietileno. En realidad, estas propiedades están influidas por la ramificación total de la cadena, pero el número de puntos de ramificación de cadena larga por molécula en los polietilenos típicos es tan pequeño con respecto al número de puntos de ramificación de cadena corta que el anterior puede despreciarse.) Las propiedades dependientes de la cristalinidad, tales como la rigidez, resistencia al desgarro, dureza, resistencia química, temperatura de reblandecimiento y el límite de deformación, aumentan con densidades crecientes o cantidades decrecientes de ramificación de cadena corta del polímero, en tanto que la permeabilidad a los líquidos y gases, la tenacidad y la resistencia a la flexión decrecen bajo las mismas condiciones.

El efecto del peso molecular se evidencia claramente en las propiedades del fundido y las propiedades que implican grandes deformaciones del sólido. Al crecer el peso molecular lo hace la resistencia a la tracción, desgarro; tenacidad a baja temperatura, reblandecimiento, resistencia al impacto y la resistencia al cuarteamiento por tensiones ambientales, mientras que la fluidez del fundido, la "ductilidad" del fundido y el coeficiente de fricción (película) disminuyen.

Estas propiedades se comparan sobre la base de los cambios en el índice de fusión, que varía inversamente con el peso molecular.

El efecto de la ramificación de cadena larga sobre las propiedades del polietileno se evalúa con frecuencia en función de la amplitud de la distribución de peso molecular  $M_w$  (peso molecular promedio en peso g/mol) /  $M_n$  (peso molecular promedio en número g/mol). Manteniendo constantes los demás parámetros estructurales, una disminución de  $M_w/M_n$  causa una disminución en la facilidad de procesado, pero también un aumento en la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia al impacto, temperatura de reblandecimiento y la resistencia al cuarteamiento por tensiones ambientales [48].

### **1.3.3 Aluminio (Al).**

En el año 1886, P. L. T. Heroult y C. M. Hall, descubren independientemente el procedimiento electrolítico para la obtención de aluminio a partir de alúmina ( $Al_2O_3$ ). Básicamente, el método consistía en poner la alúmina en una solución de criolita ( $Na_3AlF_6$ ) fundida; unos electrodos de grafito cumplían la doble función del baño fundido y descomponer electrolíticamente los óxidos de aluminio. Desde el año 1888, la obtención de alúmina a partir de bauxitas se lleva a cabo mediante el procedimiento patentado por K. J. Bayer [49].

El Aluminio es el elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Su ligereza, alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión le convierten en un material idóneo para multitud de aplicaciones, especialmente en aeronáutica. Sin embargo, la elevada cantidad de energía necesaria para su obtención dificulta su mayor uso; dificultad que puede compensarse por su bajo coste de reciclado, su dilatada vida útil y la estabilidad de su precio [50].

En México se consumen 277 608 toneladas de aluminio, reciclarlo representa un ahorro de 91% de la energía que se requiere para renovarlo [51].

#### 1.4 Reciclaje del Tetra Pak®.

El proceso más conocido para reciclar los envases multicapas es el hidropulpado. En este sistema se añade agua y los envases multicapas en un tanque en donde a través de la acción de alta velocidad de las hojas de corte montado sobre un rotor en la parte inferior del tanque permite separar las fibras de papel que se encuentran en un 75%, se agita entre 15 y 45 minutos convirtiéndola en una mezcla que por diferencia de densidades separa la celulosa queda suspendida en el agua, del polialuminio. El polietileno y el aluminio son retenidos posteriormente por una serie de filtros que dejan pasar el agua y la celulosa que se utiliza para nuevos productos de papel reciclado [52].

En la figura 6, se muestra el equipo hidropulpeador así como el proceso para reciclar envases multicapa.

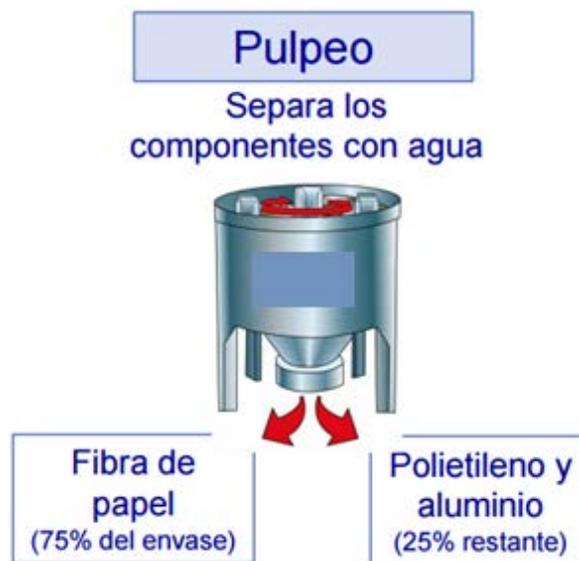


Figura 6. Hidropulpeador. [53]

El polialuminio representa el 25% del material reciclado, el cual se puede utilizar como materia prima para diferentes procesos de transformación de plástico, tales como: extrusión, moldeo por compresión, fabricación de materiales compuestos, mezclas con otros polímeros, rotomoldeo e inyección de plásticos.

La recuperación de polietileno-aluminio (polialuminio), resulta atractiva para muchos empresarios cuando se recuperan grandes cantidades de este material [54].

En la Figura 7, se puede observar el material de polietileno-aluminio, que resulta de la separación de la celulosa y la capa externa de polietileno [55].



**Figura 7. Polialuminio.** [56]

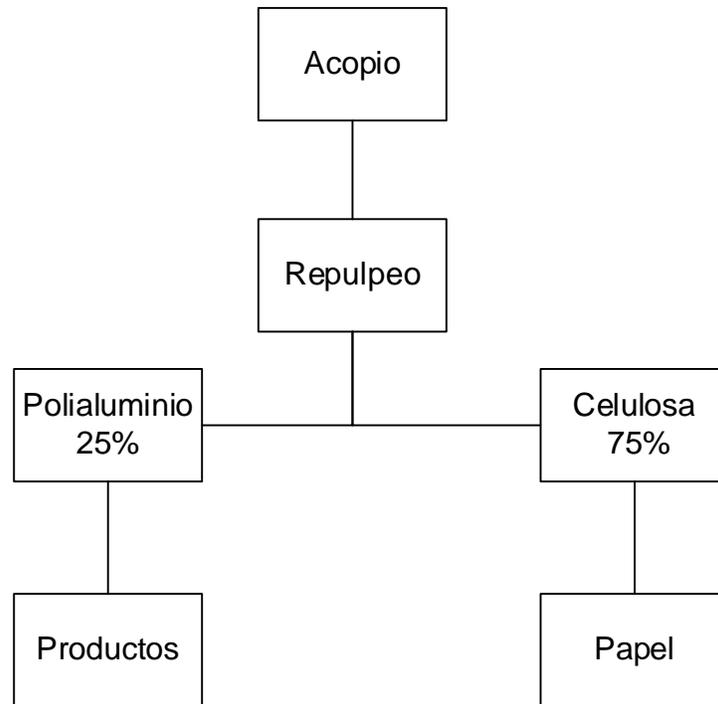
Otros procesos para la separación del aluminio del polietileno son:

- El reciclado mecánico mediante el hidropulpado, que permite que el polialuminio se separe de la celulosa y sirva como materia prima para producir artículos de plástico.
- El uso del plasma térmico, tecnología que utiliza energía eléctrica para producir un chorro de plasma a 15 000°C. El calor ioniza la mezcla de

plástico-aluminio, y da como resultado la transformación del plástico en parafina, y la recuperación del aluminio en forma pura.

- La incineración del polialuminio en hornos para producir energía y utilizarla en la industria del cemento; es decir el polialuminio es una alternativa de combustible, en sustitución del carbón. Durante el proceso de generación de energía se produce óxido de aluminio, material que se requiere para la fabricación del cemento. Esta operación significa ahorro de material primas. Cabe mencionar que en el proceso normal para la fabricación del cemento se utiliza bauxita, la cual al calentarse produce óxido de aluminio.
- Mediante pirólisis se separan estos materiales (PEBD y Al), recuperando aluminio de alta calidad. El polialuminio alimenta un horno rotativo donde el material se calienta en un ambiente inerte para evitar la combustión del polímero. El resultado de este proceso consiste en bloques de aluminio y gases pirolíticos [57].
- Con el uso de disolventes orgánicos, los materiales compuestos Al-PE se sumergen en una solución orgánica, agua, benceno etanol a 60°C [58].
- Por medio de aceite reusado. La separación del polímero respecto del aluminio utilizando el aceite vegetal, por medio de calentamiento hasta una temperatura de 140°C, posteriormente se lava tanto el aluminio como el polímero con alcohol etílico para eliminar el exceso de aceite y tratar el aluminio con alcohol en ebullición, además de utilizar etanol que posteriormente se reutiliza en el proceso [59].
- Mediante la sinergia de un proceso químico y una fuente de irradiación térmica. [60]

En la Figura 8, se puede observar un diagrama del proceso para el reciclaje del Tetra Pak®.



**Figura 8. Diagrama del proceso del reciclaje del Tetra Pak®.**

A continuación, se presentan los distintos procesos para el reciclaje de los componentes de Tetra Pak®

#### **1.4.1 Reciclaje de PEBD**

- Reciclaje físico o mecánico.
- Reciclaje químico o terciario.
- Reciclaje energético o cuaternario.

### **1.4.2 Reciclaje del Al**

Este proceso es muy sencillo, consiste en fundir al aluminio para volver a utilizarlo. Reciclarlo es más económico y además implica menor uso de energía que la propia producción de aluminio, que requiere electrólisis de alúmina. La energía precisa para reprocesar un envase de aluminio es menos de un 5% de la que se precisaría si se partiera de materias primas usadas para la síntesis del aluminio (bauxita) [61].

### **1.4.3 Reciclaje de la Celulosa**

El proceso de reciclado de papel se puede resumir en las siguientes etapas:

1.- El papel en contenedores de reciclado se lleva a la fábrica de papel donde se clasifica.

2.- El papel clasificado se lava con agua jabonosa para remover tintas de impresión que se encuentran adheridas a las fibras de celulosa y darle blancura y pureza, pero también para eliminar impurezas que no son fibras como películas plásticas, grapas y pegamentos. Las fibras se pueden limpiar de tinta progresivamente para obtener la pulpa pura, removiendo la tinta con un proceso de flotación en donde se sopla aire a la solución. La tinta se adhiere a las burbujas de aire que suben a la superficie donde se separa. Después de que la tinta ha sido removida, la fibra puede ser blanqueada usualmente con agua oxigenada. La pulpa resultante se filtra varias veces a fin de hacerla adecuada para la fabricación de papel. El papel sin tinta se coloca en un gran tanque donde se mezcla con agua para formar una pasta.

3.- De acuerdo con los materiales que se añadan a la pasta, se elaboran diferentes productos de papel- cartulina, papel periódico o papel para oficina. Con frecuencia se mezclan las fibras recuperadas con fibras vírgenes. Básicamente todos los

grados de papel se pueden producir basados por completo en papel recuperado. Sin embargo, para algunos papeles utilizados en publicaciones de alta calidad y en algunas publicaciones de empaque, sólo puede utilizarse papel recuperado de alta calidad mismo que generalmente no estará disponible en grandes cantidades.

4.- La pasta de papel se esparce utilizado para ello grandes rodillos para formar hojas delgadas extensas y continuas.

5.- Se seca el papel y luego se enrolla quedando listo para su corte y envío a los almacenes de venta [62].

### **1.5 Técnicas analíticas para la caracterización del Tetra Pak®.**

La definición generalmente aceptada de análisis térmico abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de un sistema (sustancia o un material) en función de la temperatura mientras se le somete a un programa de temperatura controlado. Se pueden distinguir más de una docena de métodos térmicos que difieren en las propiedades medidas y en los programas de temperatura. Estos métodos encuentran una amplia aplicación tanto en el control de calidad como en investigación de productos farmacéuticos, arcillas, minerales, metales, aleaciones, y polímeros.

Los efectos del calor sobre los materiales pueden ser varios y producir cambios en muchas de sus propiedades. En el análisis térmico, los cambios de peso configuran la base de la termogravimetría (TG), mientras que la medida de los cambios de energía constituye la base de la calorimetría diferencial de barrido.

La identificación de los productos obtenidos a través del reciclaje del Tetra Pak® se puede llevar a cabo por medio de técnicas analíticas. Entre los principales métodos para la caracterización se encuentran:

### **a) Técnicas térmicas**

- Calorimetría diferencial de barrido (DSC).
- Análisis termogravimétrico (TGA).

### **b) Técnicas microscópicas**

- Microscopía de fuerza atómica (AFM).
- Microscopía electrónica de barrido con análisis de energía dispersiva por rayos x (SEM-EDS).
- Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

A continuación, se presentan los fundamentos de las pruebas para la caracterización del Tetra Pak® empleadas en este trabajo de investigación.

#### **1.5.1 Calorimetría diferencial de barrido**

La calorimetría diferencial de barrido, comúnmente conocida como DSC, acrónimo del inglés “Defferential Scanning Calorimetry”, es la técnica experimental más directa y precisa para caracterizar sistemas moleculares bien definidos, cuyas estructuras están estabilizadas por numerosas fuerzas débiles y, por consiguiente, susceptibles de experimentar transiciones conformacionales y/o cambios de fase al modificar la temperatura.

El uso de la calorimetría diferencial de barrido permite medir la capacidad calorífica aparente de una disolución macromolecular como una función continua de la temperatura, obteniéndose así lo que comúnmente se denomina termograma. A partir de esta función es posible, si el sistema macromolecular está bien definido, determinar los parámetros termodinámicos asociados a la transición inducida por la temperatura: cambios de entalpía ( $\Delta H$ ), de entropía ( $\Delta S$ ), de energía de Gibbs ( $\Delta G$ ) y de la capacidad calorífica ( $\Delta C_p$ ) [63].

### **1.5.2 Análisis termogravimétrico (TGA).**

La termogravimetría es una técnica de análisis térmico en la que se determina la pérdida o ganancia de masa de una muestra en función a la temperatura. Se puede definir básicamente en tres tipos de análisis termogravimétricos:

- Análisis termogravimétrico isotérmico: en el que se mantiene la temperatura constante mientras se registran los cambios de la masa.
- Análisis termogravimétrico casi isotérmico: en el cual la muestra a analizar se calienta mientras la masa es constante y se estabiliza la temperatura mientras se van produciendo los cambios de masa.
- Análisis termogravimétrico constante: en el que la muestra se calienta en una atmósfera controlada con una rampa de temperatura previamente fijada [64].

### **1.5.3 Microscopía Electrónica de Barrido con Análisis de Energía Dispersiva por Rayos X (SEM-EDS).**

La espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) se utiliza para identificar la composición elemental de una muestra. Esta técnica se encuentra integrada a un SEM, ya que se aprovecha la energía característica de los rayos X emitidos debido a las interacciones de su haz de electrones con el material. La emisión de rayos X es utilizada para identificar la composición elemental de una muestra, ya que el átomo emite rayos X con cantidades únicas de energía durante este proceso de transferencia.

Así, midiendo las cantidades de energía presentes en los rayos X que son emitidas por un espécimen en particular durante el bombardeo de haz de electrones, es posible establecer la identidad del átomo del cual los rayos X fueron emitidos.

Un espectro de EDS exhibe normalmente los picos que corresponden a los niveles de energía para los cuales la mayoría de los rayos X han sido recibidos. Cada uno de estos picos es único a un átomo y por lo tanto corresponde a un solo elemento, es decir, el pico en un espectro corresponde a un elemento presente en un sólido. Las posiciones de las líneas (picos con energías apropiadas) dan la información sobre la composición cualitativa de la muestra. El número de cuentas de los rayos X corresponde a la concentración de los elementos (altura de pico) [65].

En la Figura 9, se observa el funcionamiento del microscopio electrónico de barrido.

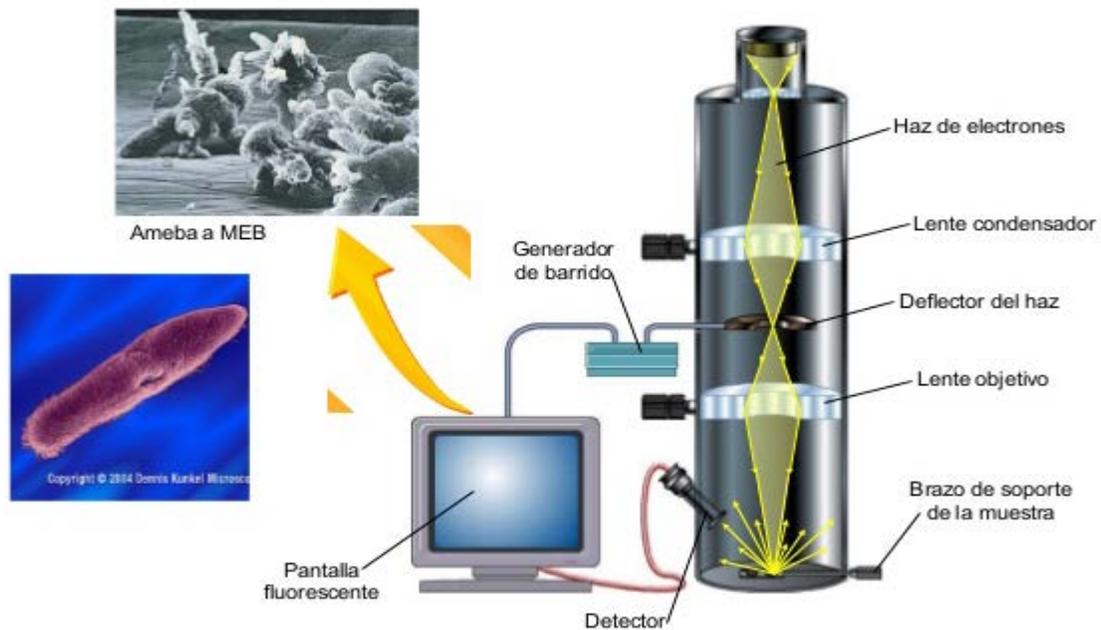


Figura 9. Esquema del funcionamiento del microscopio electrónico de barrido. [66]

#### 1.5.4 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

El microscopio de fuerza atómica (AFM de sus siglas en inglés Atomic Force Microscope), es un equipo de tipo sonda de barrido de muy alta resolución, que ha demostrado ser de fracciones de nanómetros, más de 1000 veces mejor que el límite de difracción óptica. El AFM es una de las principales herramientas para generar imágenes y medir propiedades a escala nanométrica. El término microscopio utilizado para este equipo es erróneo, ya que esto implica observación cuando en realidad la información es recopilada “sintiendo” la superficie con una sonda mecánica.

- **Modos de trabajo:**

a) Contacto: Mide la topografía de la muestra deslizando la punta sobre su superficie.

b) Tapping: También llamado contacto intermitente, mide la topografía de la muestra tocando intermitentemente su superficie.

c) No Contacto: Mide la topografía de acuerdo a las fuerzas de Van der Waals que existen entre la superficie de la muestra y la punta.

En la Figura 10, a) se presenta un esquema del funcionamiento del microscopio de fuerza atómica, b) un ejemplo del resultado de la prueba de AFM.

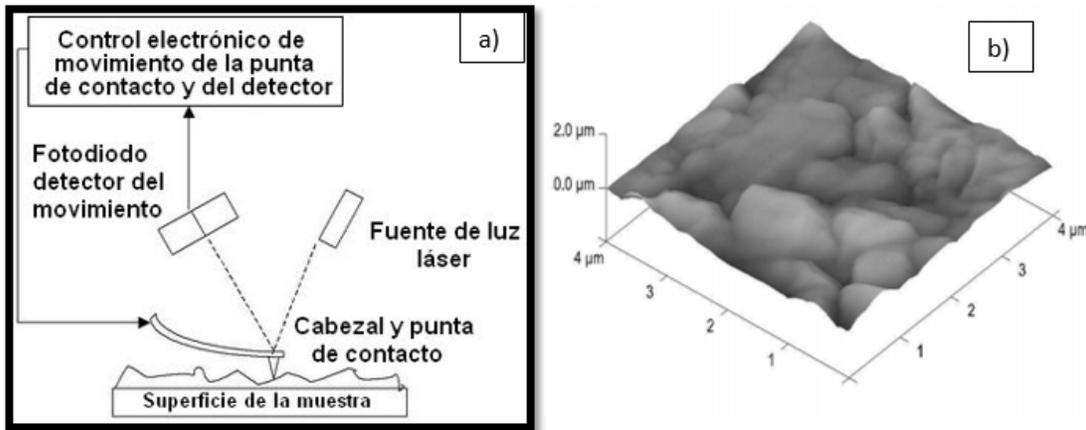


Figura 10. Esquema del funcionamiento de un microscopio de fuerza Atómica. [67]

### 1.5.5 Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

La microscopía confocal es una técnica relativamente nueva que está logrando excelentes resultados en diversas ramas de la ciencia (medicina, biología, materiales, geología, etc.). Aunque el principio de la microscopía confocal fue dado a conocer por Minsk en 1957. Su éxito se debe a las ventajas que ofrece frente a la microscopía óptica convencional (imágenes de mayor nitidez y contraste, mayor resolución vertical y horizontal, etc) y, sobre todo, a la posibilidad de obtener imágenes que permiten su estudio tridimensional.

Aunque el principio de la microscopía confocal fue patentado en 1957 por Minsk y los primeros microscopios basados en esta técnica que demostraron su validez fueron descritos por Petran et al. en 1968, su gran aceptación y espectacular desarrollo no ha tenido lugar hasta hace unos pocos años con el desarrollo del láser

y de los ordenadores personales. La mayor parte de las muestras observadas con microscopía óptica son traslúcidas o, en el caso de ser opacas, su superficie de reflexión no se encuentra perfectamente pulida. En ambos casos la luz interacciona con la muestra a varias profundidades por lo que la imagen que llega al observador presenta áreas borrosas debidas a la luz procedente de zonas fuera del plano de enfoque, lo que produce una degradación en el contraste y resolución de la imagen.

El principio de la microscopía confocal se basa en eliminar la luz reflejada o fluorescente procedente de los planos fuera de foco. Para ello se ilumina una pequeña zona de la muestra y se toma el haz luminoso que proviene del plano focal, eliminándose los haces procedentes de los planos inferiores y superiores [68].

En la Figura 11, se representa un esquema del funcionamiento del microscopio Confocal de Barrido Laser (CLSM).

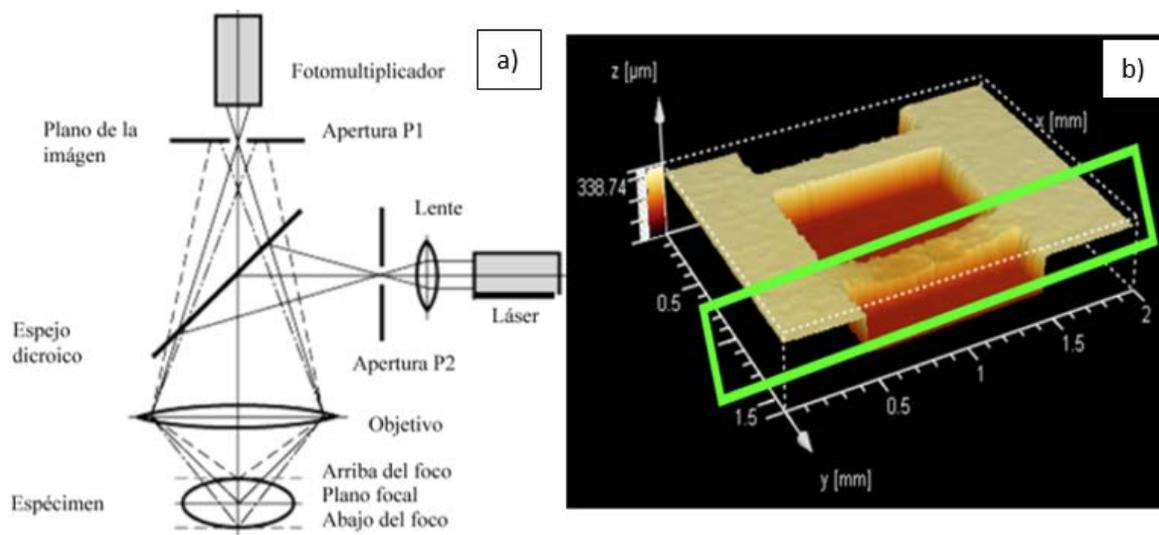


Figura 11. Esquema del funcionamiento de un microscopio Confocal de Barrido Laser (CLSM). [69]

# **CAPÍTULO II**

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO II

### MATERIAL Y MÉTODOS

#### 2.1 Material

- Envases Tetra Pak®, misma marca y presentación.
- Lata de aluminio

#### 2.2 Equipo

- Analizador térmico Netzsch modelo Jupiter STA 449 F3.

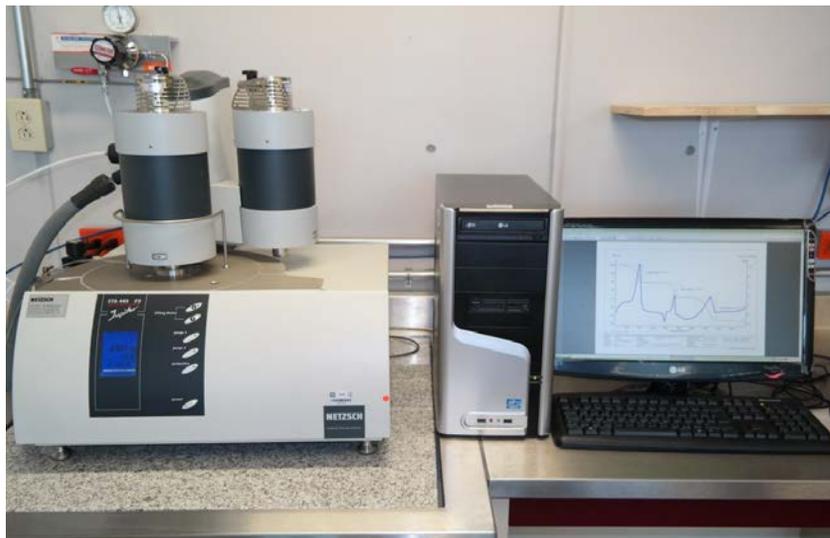
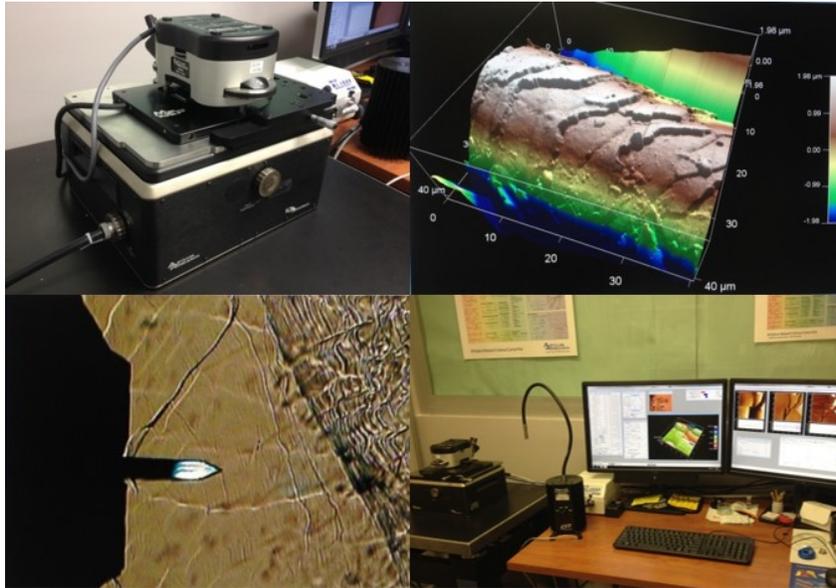


Figura 12. Analizador Térmico. [70]

- Microscopio de fuerza atómica marca VEECO modelo CP-II: SPM Digital.



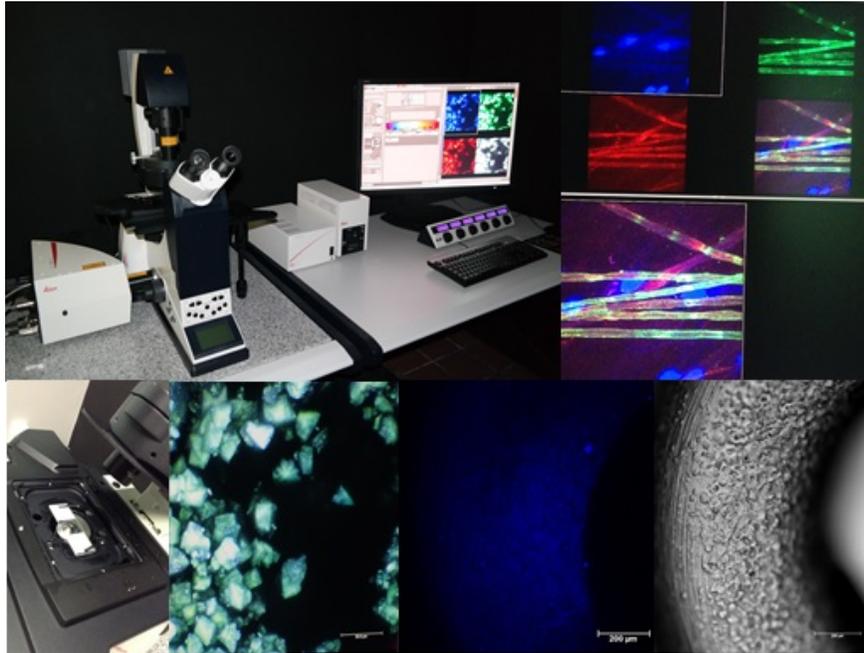
**Figura 13. Microscopio de Fuerza Atómica. [71]**

- Microscopio de Barrido Electrónico JEOL, JSM6010LA.



**Figura 14. Microscopio de Barrido Electronico. [72]**

- Microscopio Confocal de Barrido Láser (CLSM), modelo TCS SPE / CTR 4000, marca LEICA.



**Figura 15. Microscopio Confocal de Barrido Láser. [73]**

## 2.3 Desarrollo experimental

### 2.3.1 Diagrama de flujo

En la Figura 16, se muestran las diferentes etapas del proceso, las cuales se describirán en los puntos siguientes.

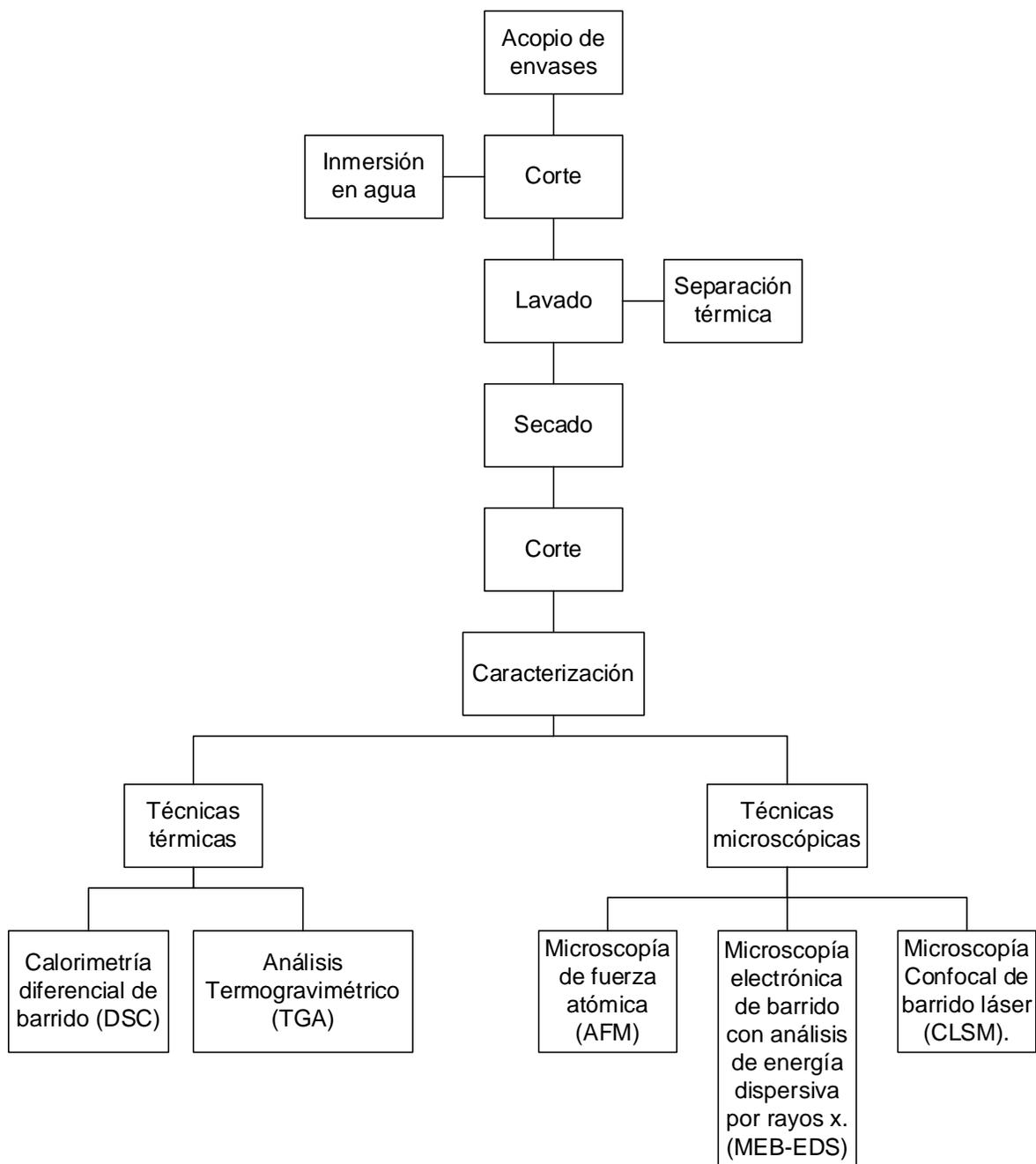


Figura 16. Diagrama de flujo.

Obtención de muestras para la caracterización de envases de Tetra Pak®.

### 2.3.1.1 Acopio y corte

Se reunieron cinco envases de Tetra Pak®, a lo que se les levantó las pestañas y se compactaron, según se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Envases de Tetra Pak®.

Posteriormente se cortaron los bordes superiores e inferiores y el sellado longitudinal del envase con las tijeras, según la Figura 18.

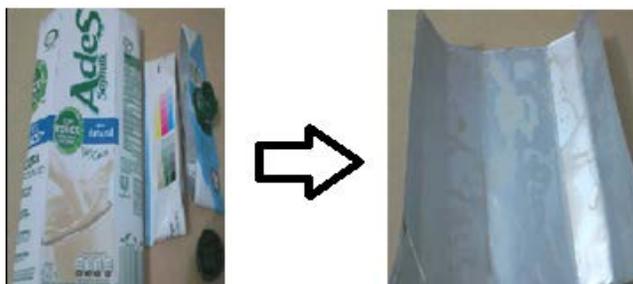


Figura 18. Corte de envases de Tetra Pak®.

### 2.3.1.2 Lavado y secado

Este proceso se añade agua y los envases multicapa en una cubeta para lavar la parte interna y externa de las muestras con jabón y una esponja suave, para quitar cualquier residuo.

Posteriormente, para el secado de las muestras, éstas se ponen al sol, por aproximadamente tres horas, como se observa en las Figuras 19 y 20.



Figura 19. Procedimiento de lavado de Tetra Pak®.



Figura 20. Procedimiento de secado de Tetra Pak®.

### **2.3.1.3 Obtención de polialuminio.**

Para la obtención del polialuminio, se realizó en una cubeta de 20L, donde las muestras quedaron sumergidas en agua, en promedio con una medida de 28 cm x 19 cm, se agregó 15L de agua potable y se dejó reposar por 48h con agitación. Poco a poco se va desprendiendo la celulosa de la muestra de tal forma que queda suspendida en el agua en la parte superior de la cubeta.

Posteriormente, se sacaron las muestras de la cubeta, se ponen al sol, por aproximadamente tres horas, como se observa en la Figura 21.



**Figura 21. Muestra Polialuminio.**

### **2.3.1.4 Separación térmica, para obtener el aluminio del Tetra Pak®**

Para determinar la composición del Aluminio, se procedió a la separación del metal mediante pirolisis, consiste en colocar la muestra en el mechero para la incineración de la celulosa y el PEBD.

## **2.4 Desarrollo de las pruebas para la caracterización.**

### **2.4.1 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Termogravimétrico (TGA), simultáneos.**

La preparación de las muestras (Tetra Pak® y polialuminio) para el análisis termogravimétrico se llevó a cabo adicionando una cantidad relativamente pequeña de éstas sobre una cápsula de aluminio, la cual se soporta mediante un alambre en forma de gancho quedando finalmente en el interior del horno que a su vez está aislado del exterior mediante un tubo de vidrio. Cabe mencionar que se utilizó la termobalanza del equipo para pesar las masas iniciales de cada muestra.

Enseguida, las muestras se colocaron dentro del horno a condiciones de atmosfera y temperatura controladas (para evitar reacciones indeseadas con otros gases). Para el último parámetro, el intervalo se estableció de acuerdo a la temperatura de fusión tanto de la celulosa (270°C) como del polietileno (110°C).

Durante el proceso, la electrobalanza registró las pérdidas de masa que se producían en las muestras por efecto del calentamiento producido. Los datos fueron captados por el sensor y la formación sobre la mesa ó pérdida de la masa son procesados por el sistema y son mostrados en una pantalla del equipo en forma de una curva termogravimétrica.

Las condiciones experimentales que se consideraron se describen a continuación:

- 1) Condiciones de barrido: 25°C a 550°C con una velocidad de calentamiento lineal de 10°C/min.
- 2) Atmósfera: nitrógeno de ultra alta pureza 99.997% con flujo de 20 mL/min.
- 3) Tipo de crisoles: aluminio de 5 mm de diámetro.

- 4) Análisis: Se corrió el blanco previo a la muestra con el crisol vacío bajo las mismas condiciones que la muestra. Posteriormente se colocó la muestra en el crisol, procurando que estuviera lo más posible en contacto con el fondo del crisol; se selló con la prensa y entonces se realizó el programa de calentamiento.

#### **2.4.2 Microscopía electrónica de Barrido con Análisis de Energía Dispersiva por Rayos X (SEM-EDS).**

La gran ventaja del MEB es que se pueden analizar muestras sin apenas preparación, y si es lo suficientemente pequeña de aproximadamente 3mm x 3mm para entrar en la cámara de vacío, se puede realizar el análisis sin necesidad de alterar su estado físico en forma alguna.

Después que las muestras se cortaron para el análisis, deben estar perfectamente limpios y libres de grasa para evitar contaminación superficial, éstas deben estar convenientemente adheridas a dicho soporte, para ello se suele emplear una cinta con doble cara adhesiva.

Casi todas las muestras de materiales cerámicos y de polímeros suelen ser no conductoras, por lo que su observación con electrones secundarios es difícil o imposible debido a la acumulación de carga que se produce en su superficie. La acumulación de carga produce una zona de carga espacial que deflecta el haz incidente produciendo zonas blancas excesivamente brillantes durante la observación, la conducción de la muestra es tal que su observación por SEM no requiere más que una buena adhesión entre la muestra y el porta muestras.

### 2.4.3 Microscopia de Fuerza Atómica (AFM)

La ventaja del microscopio de fuerza atómica AFM, es la versatilidad del mismo. Se utilizó a temperatura ambiente, la muestra de aproximadamente 3 mm x 3 mm, se coloca en un portaobjetos no requiere una preparación especial, para que se pueda adaptar al portamuestras del AFM. El modo que se utilizó fue el tapping, éste trabaja en atmósfera ambiente mediante oscilación del cantiléver a su frecuencia de resonancia o cercana a ella utilizando un cristal piezoeléctrico. El movimiento del piezoeléctrico provoca que el cantilever oscile con una elevada amplitud (en general mayor de 20 nm) cuando la punta no está en contacto con la superficie. Para obtener buenos resultados con AFM, es necesario un aislamiento perfecto de vibraciones, las especificaciones con las que se trabajó son las que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Especificaciones de las muestras para el Análisis de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).**

Datos	Tetra Pak®	Polialuminio	Aluminio	Aluminio lata
Líneas de exploración	448	448	448	448
Puntos de escaneo	448	448	448	448
Velocidad de barrido	0.28 Hz	0.27 Hz	0.28 Hz	0.28 Hz
Tamaño de escaneo	60 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$

### 2.4.4 Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM).

Las muestras fueron las misma que las de AFM, solo que se debe poner un cubre objetos.

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder llevar a cabo la caracterización del envase Tetra Pak® se realizó un proceso previo como se indica en la sección 2.5.1.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de caracterización empleadas en cada uno de los materiales (Tetra Pak®, Polialuminio y Aluminio).

#### 3.1 Caracterización del Tetra Pak®

##### 3.1.1 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

El análisis de DSC se realizó en un rango de temperatura comprendido de los 25°C a los 550°C. Específicamente en el caso del Tetra Pak®, los resultados obtenidos se muestran en la figura 22 donde se pueden observar tres picos: el primero indica la fusión del PEBD (106°C); el segundo es posible que corresponda a la descomposición de la celulosa (358.2°C) en tanto que el último, denota la descomposición del PEBD (482°C).

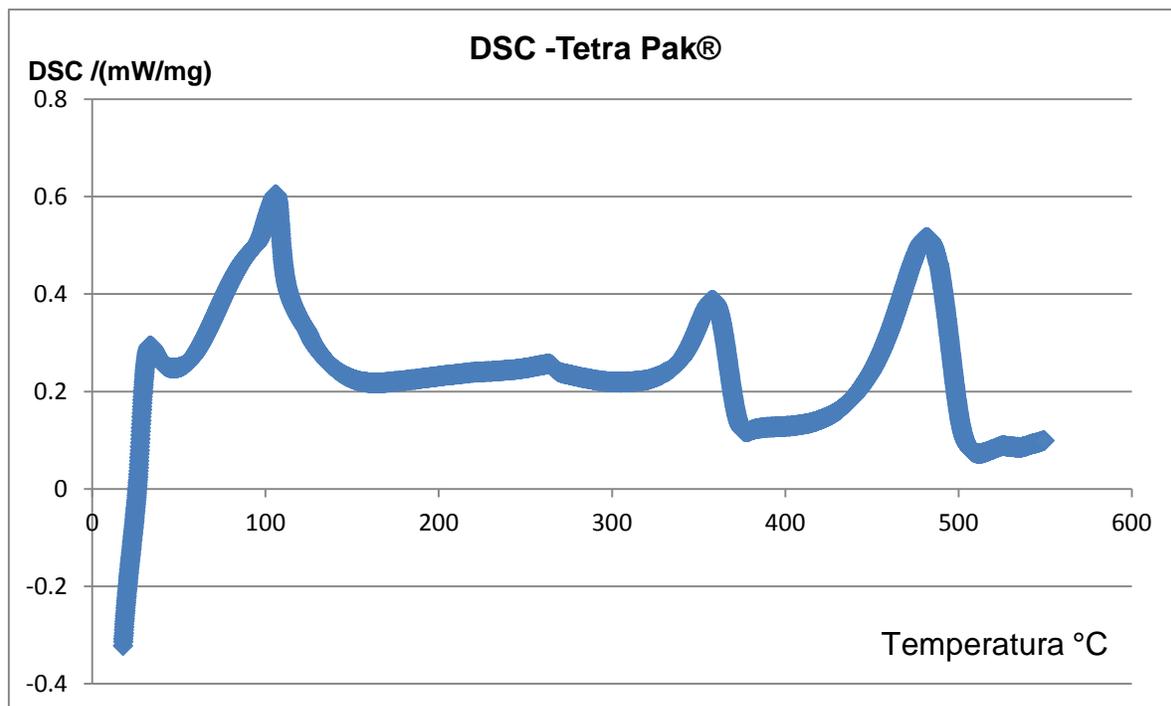


Figura 22. Termograma obtenido por DSC para la muestra de Tetra Pak®

### 3.1.2 Análisis Termogravimétrico (TGA).

El análisis de TGA se realizó en el mismo intervalo de temperatura que el DSC. Para la muestra de Tetra Pak®, los resultados obtenidos se muestran en la figura 23.

De acuerdo a la curva se observa que la primera pérdida es del 6% de masa (restando un 94%). Lo anterior puede ser resultado de la merma por humedad en la muestra aunada a la fusión del PEBD. La segunda pérdida que se presenta es del 43%, dada por descomposición de la celulosa (quedando una masa remanente del 49%); la tercera pérdida (26%) es debido a la descomposición del PEBD obteniendo una masa total final del 75%. El 24% de masa restante corresponde al aluminio ya que no hubo pérdida por fusión dado que la temperatura necesaria para lograr el cambio de fase es de 660°C, la cual no se alcanzó en el análisis. El 1% puede ser debido a alguna contaminación, como lo muestra el análisis elemental en la Tabla 5 (ver pág. 52).

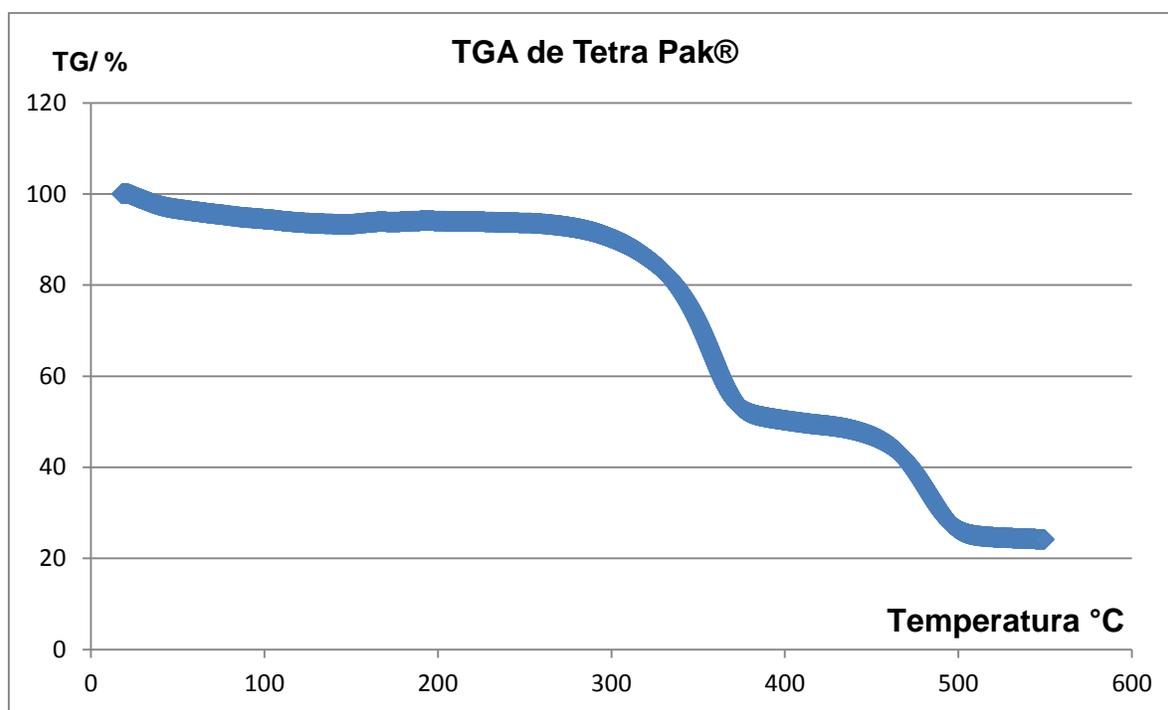


Figura 23. Termograma obtenida por TGA para la muestra de Tetra Pak®.

### 3.1.3 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).

El resultado de la caracterización de la película de polialuminio se muestra en la figura 24, donde se aprecia su topología.

En las cuatro micrografías se observan las líneas marcadas del aluminio, en la figura 24(a), se aprecian tres colores muy marcados el verde, azul, y un pequeño punto rojo. La zona azul está entre los rangos 1.3-1.65  $\mu\text{m}$  [figuras 24(b) y 24(d)]; en este caso los picos de aluminio alcanzan una altura entre 7.60- 10.4  $\mu\text{m}$ , a pesar de que es una muestra de envase multilaminado, no es uniforme, En la figura 24(c), se puede observar una no uniformidad en la muestra, por lo cual, es posible inferir la presencia de celulosa, por las irregularidades de la micrografía. El promedio de la altura es de 10.40  $\mu\text{m}$ .

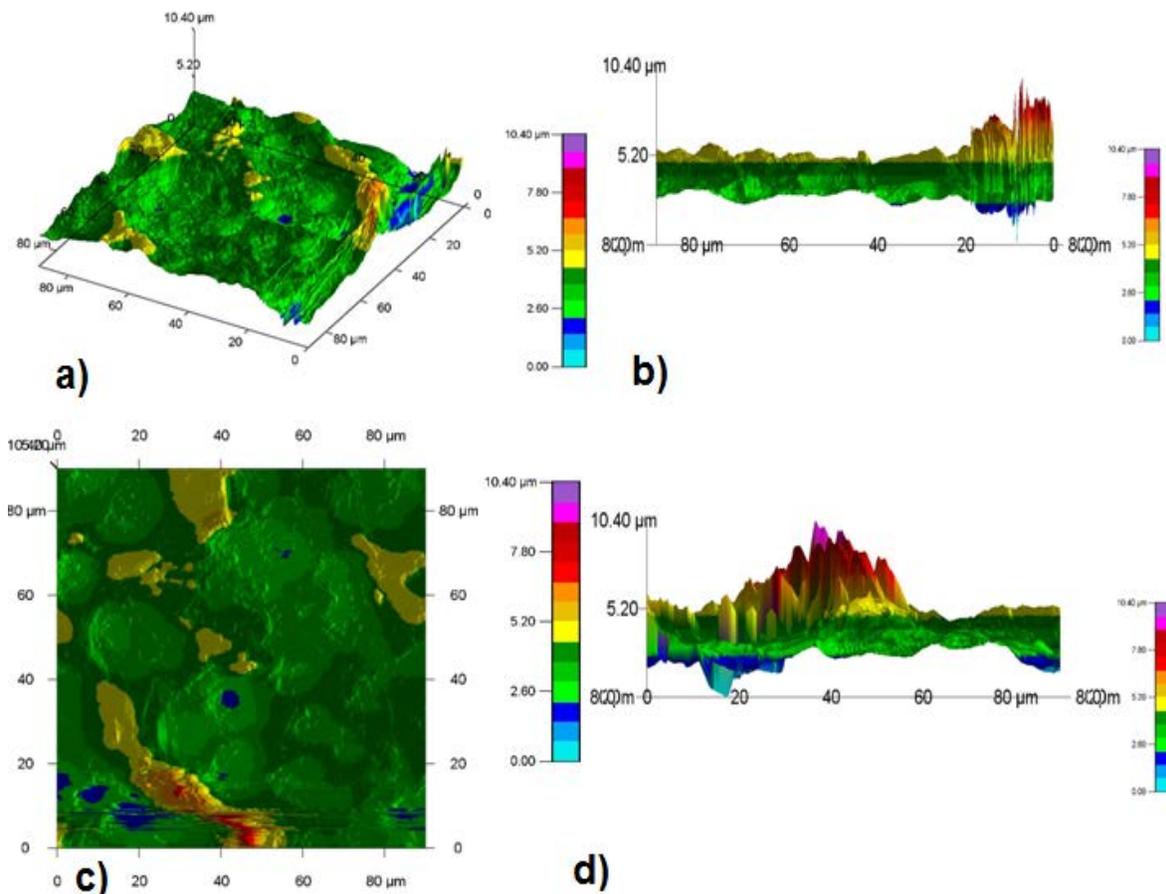


Figura 24. Distintos cortes de Tetra Pak® obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal.

### 3.1.4 Microscopía Electrónica de Barrido.

La figura 25 muestra la morfología del Tetra Pak®, donde se observan 5 capas del envase (de un total de 6). El número 1 corresponde a la más externa del material (cuya composición es PEBD), la segunda se asocia a la celulosa, la tercera capa de un polímero, la cuarta se puede identificar bien al aluminio y por consiguiente la quinta es un polímero (PEBD), entre la segunda y tercer capa se observa la adherencia entre el cartón y polietileno, el polietileno para unirse con el cartón, se introduce en las fibras de celulosa, esto es porque la unión de las capas se realiza a 106°C en la que el polietileno hace la función, lo que permite que este se introduzca en las fibras de celulosa y al momento de enfriarse, el polietileno adquiere su estado sólido.

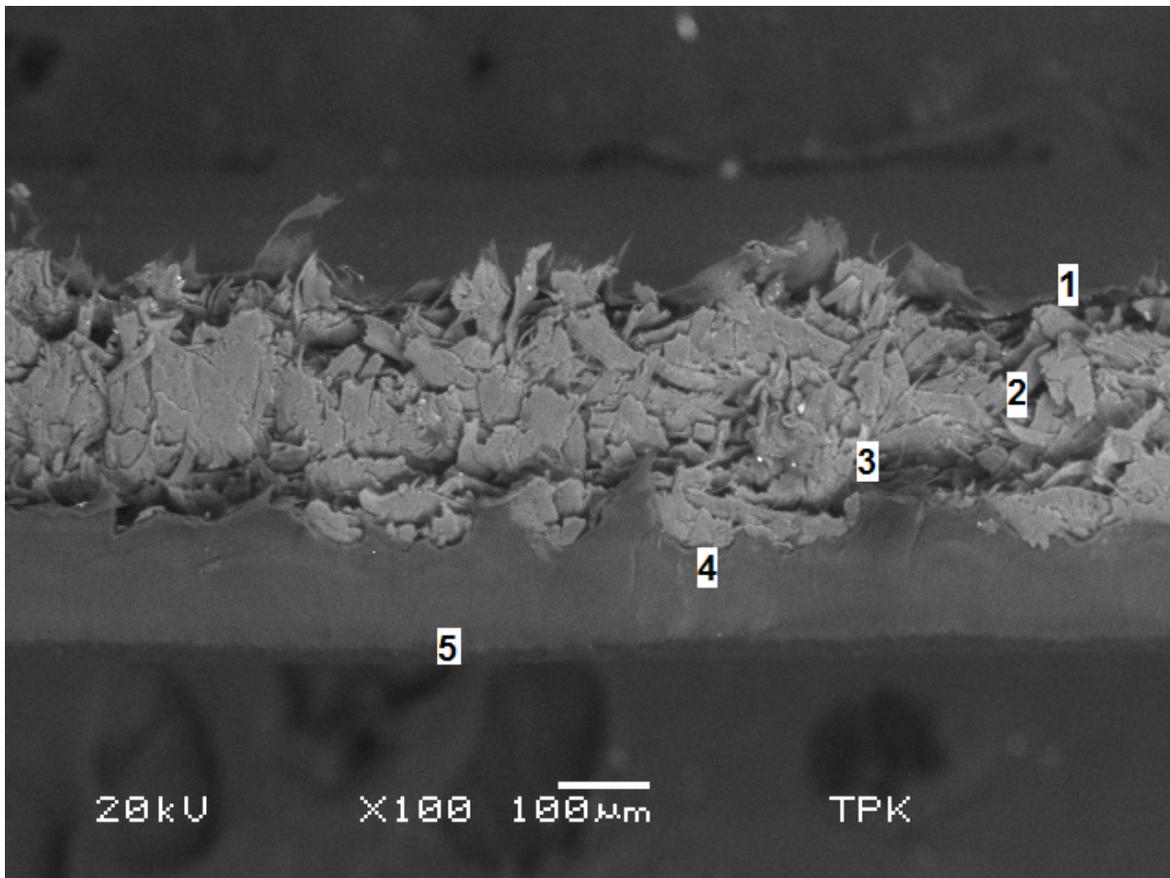
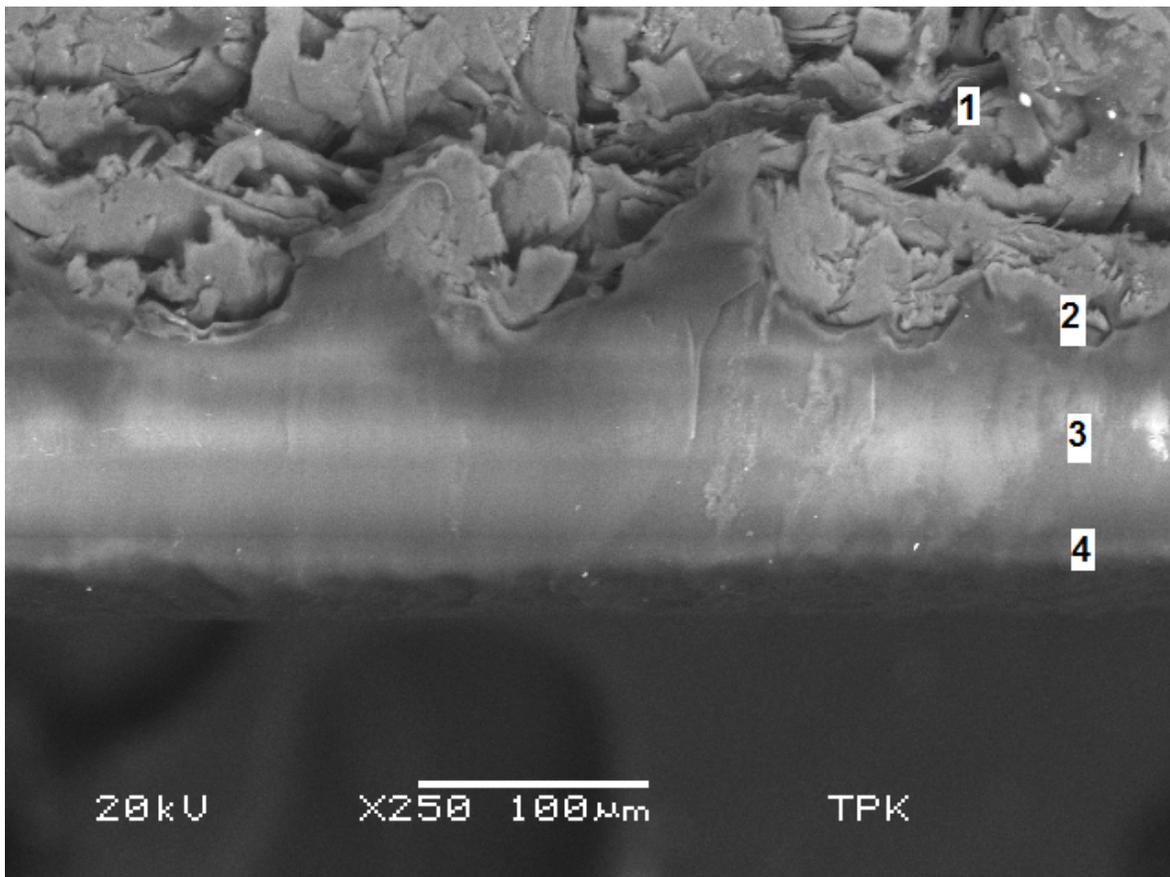


Figura 25. Micrografía obtenida por SEM del Tetra Pak®.

En la figura 26 se presenta la descripción morfológica del Tetra Pak® a un acercamiento a 250X donde se observan 4 capas, la primera es celulosa, la segunda es polietileno de baja densidad (PEBD), la tercera es aluminio (Al), la cuarta polietileno, entre la primera, segunda y tercer capa se observa la adherencia entre el cartón, polietileno y aluminio, el polietileno para unirse con el cartón, se introduce en las fibras de celulosa, esto es porque la unión de las capas se realiza a 106°C en la que el polietileno hace la función de un adhesivo, lo que permite que este se introduzca en las fibras de celulosa, y al mismo tiempo al aluminio.



**Figura 26. Micrografía obtenida por SEM del Tetra Pak® a 250X.**

En la Figura, 27 y Tabla 5, se presenta el resultado del análisis elemental por EDS, así como la composición química en porcentaje atómico del Tetra Pak®, donde se observa una concentración alta de carbono (C), oxígeno (O), y aluminio (Al), lo cual confirma la presencia de un polímero.

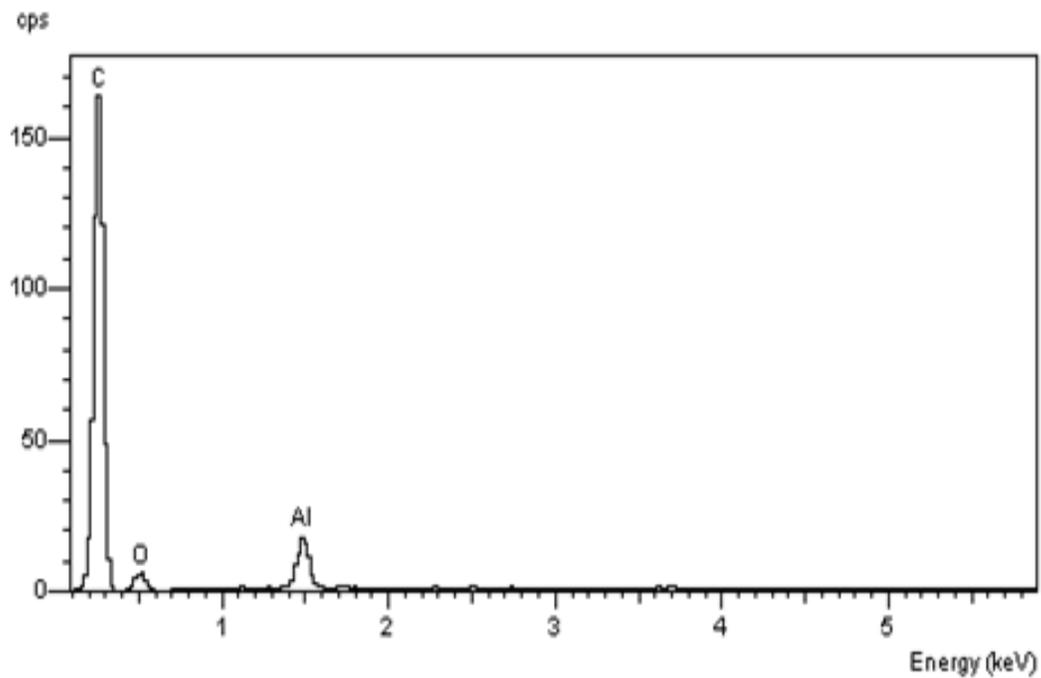


Figura 27. Análisis elemental por EDS del Tetra Pak®.

Tabla 5. Composición química de Tetra Pak®, por análisis elemental.

Elemento	%
C	81.184
O	15.701
Al	3.114

### 3.1.5 Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM).

Las micrografías comparativas de fluorescencia, tiene tres tipos de longitudes, azul 405 nm, verde 488 nm, rojo 532 nm, en la figura 28(a)(b)(c)(d) se observa que tiene un poca de fluorescencia, por la presencia de aluminio (Al) ya que es un material que tiene poca fluorescencia, en el envase de Tetra Pak®. En las cuatro micrografías se tiene poca fluorescencia, ya que es un material compuesto.

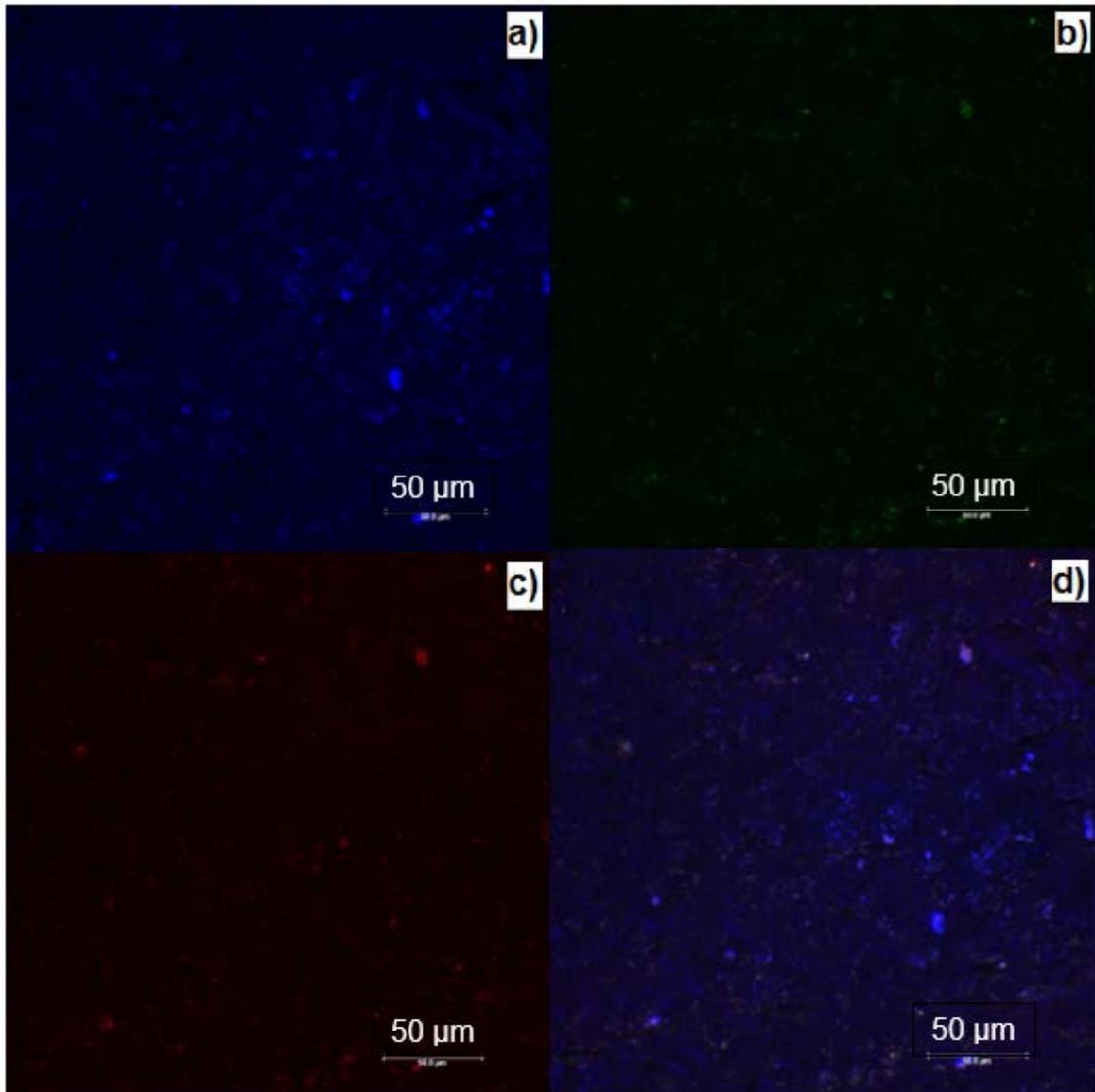


Figura 28. Micrografía por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

### 3.1.6 Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM) de la Celulosa.

Se analizó la película de celulosa y PEBD, del envase de Tetra Pak®, las micrografías comparativas de fluorescencia, tiene tres tipos de longitudes, azul 405 nm, verde 488 nm, rojo 532 nm, se puede observar que en la figura 29(a)(b)(c)(d), que la celulosa tiene buena fluorescencia, por lo cual se puede apreciar las fibras de la celulosa, gracias al PEBD, que también es fluorescente.

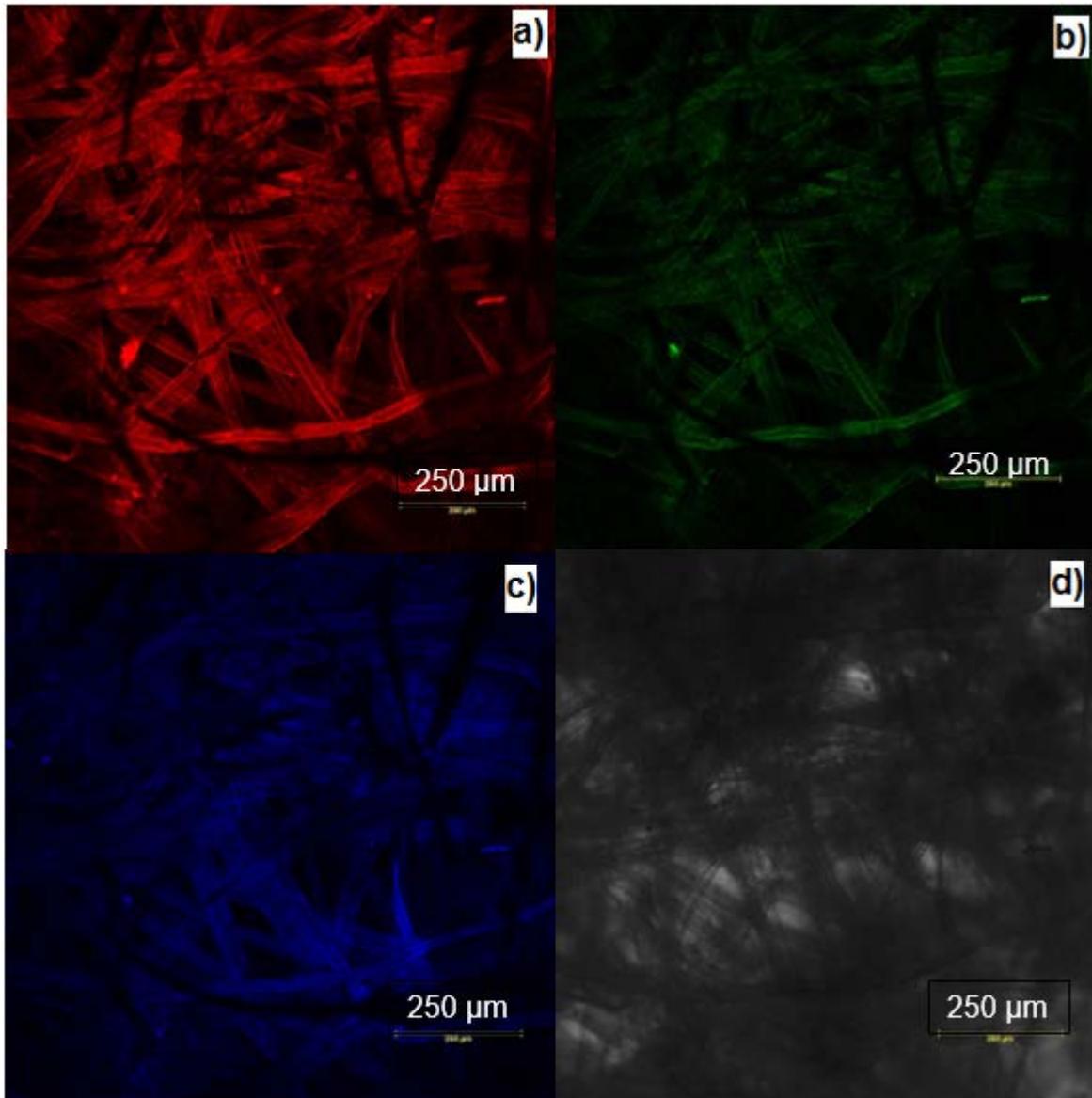


Figura 29. Micrografía por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

### 3.2 Caracterización del Polialuminio.

#### 3.2.1 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

Los resultados obtenidos para el análisis por DSC, se muestran en la figura 30 en la cual se aprecian dos picos: el primero correspondiente a la fusión del PEBD (104.7°C) y el segundo, relacionado con la descomposición del PEBD (482°C).

Cabe mencionar que no se observa la fusión del aluminio, porque ésta temperatura se alcanza a los 660°C y la prueba se corrió hasta 550°C.

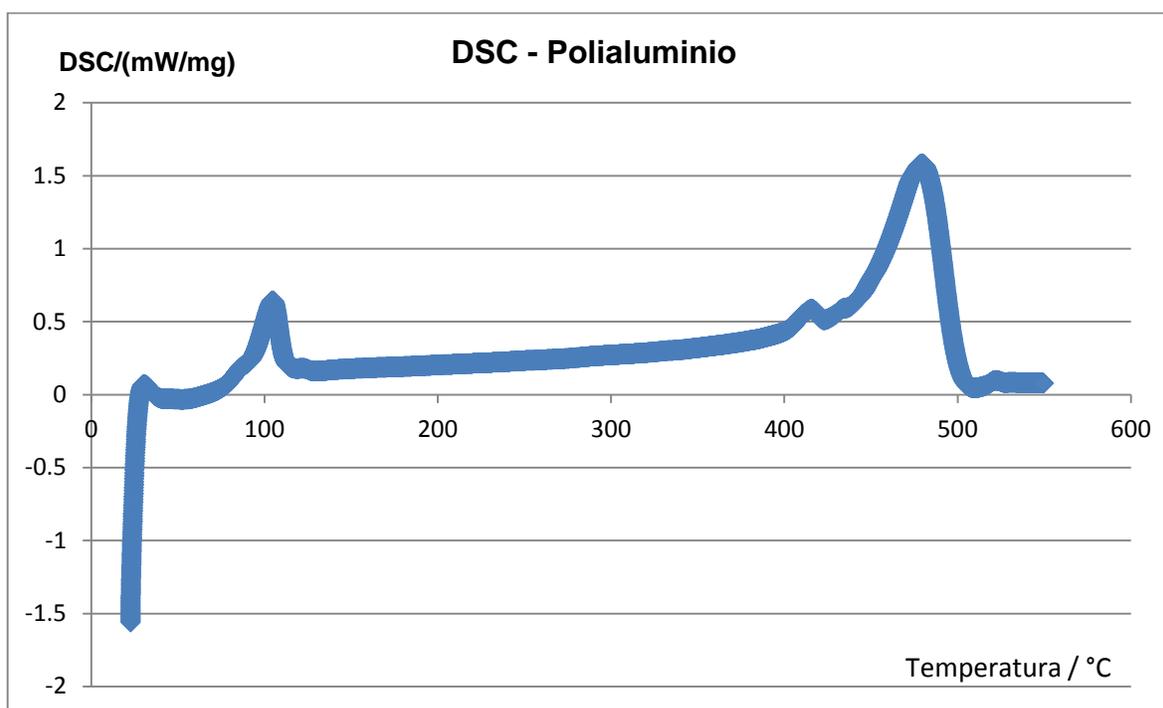


Figura 30. Termograma obtenida por DSC para la muestra de Polialuminio.

### 3.2.2 Análisis Termogravimétrico (TGA).

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 31; se puede notar la pérdida de masa del polialuminio a los 104°C, con una reducción del 9.50% (por fusión del PEBD), comparativamente en la curva de DSC se observa que hay una descomposición los 479°C del PEBD, (pérdida de masa del 70.32%) quedando una masa remanente del 20.1%, que corresponde al aluminio.

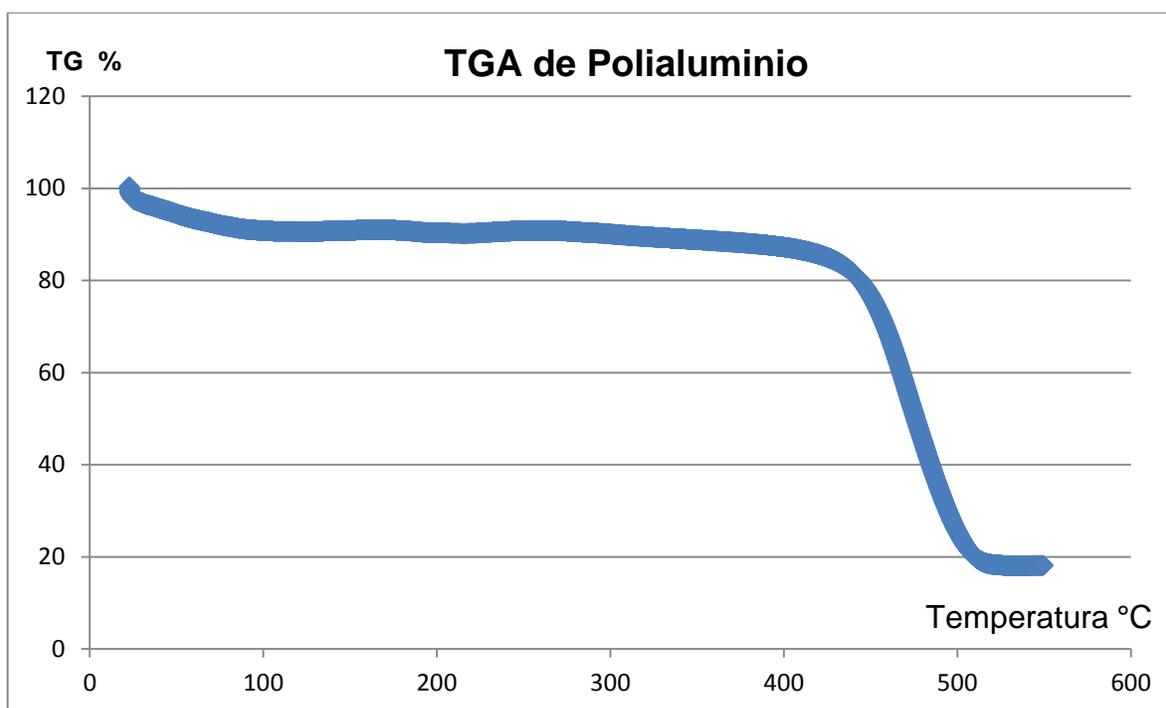


Figura 31. Termograma obtenida por TGA para la muestra de Polialuminio.

### 3.2.3 Microscopía de Fuerza Atómica.

Los resultados de la caracterización por microscopía de fuerza atómica de polialuminio se observan en la micrografía en la figura 32.

En la figura 32(a), aporta que el relieve no es uniforme. Las zonas de color azul están por debajo de  $1.35 \mu\text{m}$ , en 32(b) y 32(d), se puede apreciar que la altura del pico que está entre  $3.65\text{-}5.62 \mu\text{m}$ ,

La micrografía correspondiente a 32(c) corresponde a una vista superior de barrido, donde todavía se aprecia presencia o restos de celulosa.

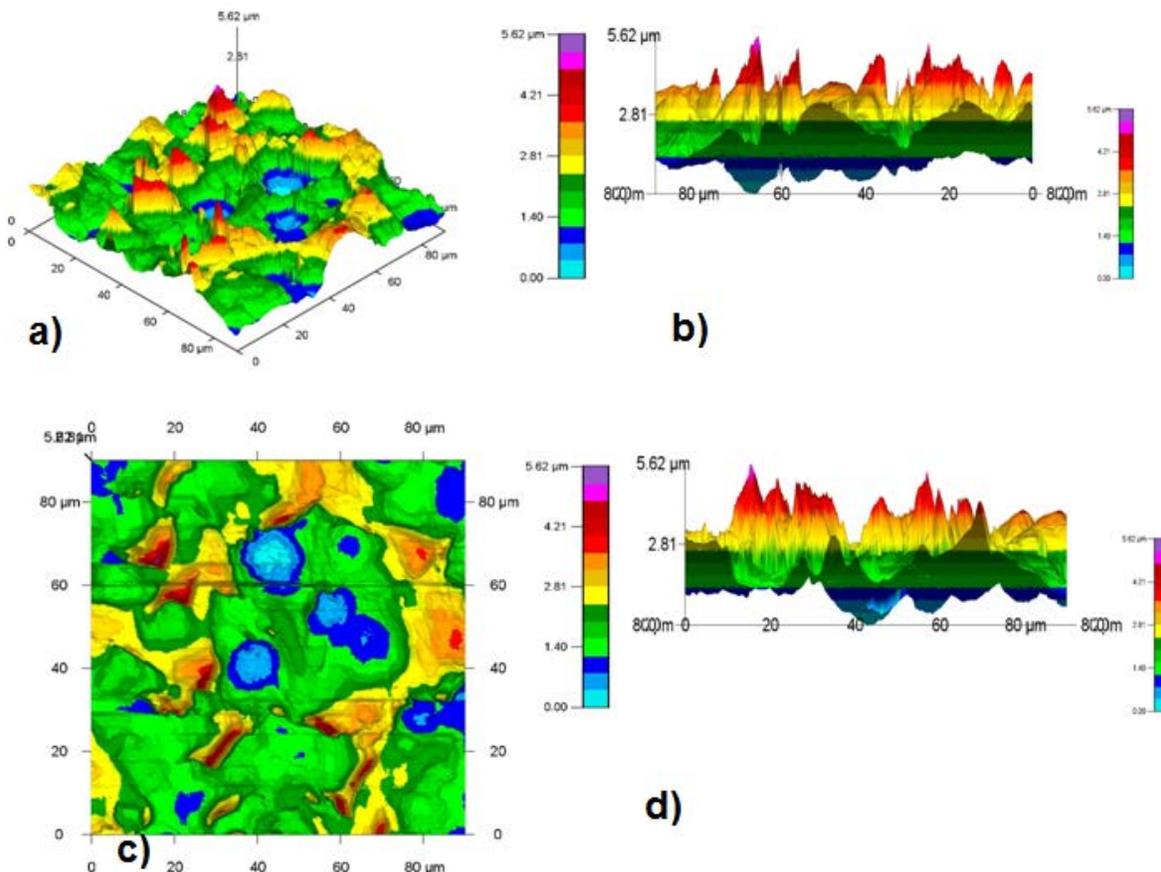


Figura 32. Distintos cortes de Polialuminio obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal.

### 3.2.4 Microscopía Electrónica de Barrido.

Se puede observar en la figura 33 la morfología de la película obtenida, se aprecian canales cilíndricos, las partes más brillantes se considera que corresponde al aluminio (Al), mientras que las partes restantes son de restos de celulosa y polímero.

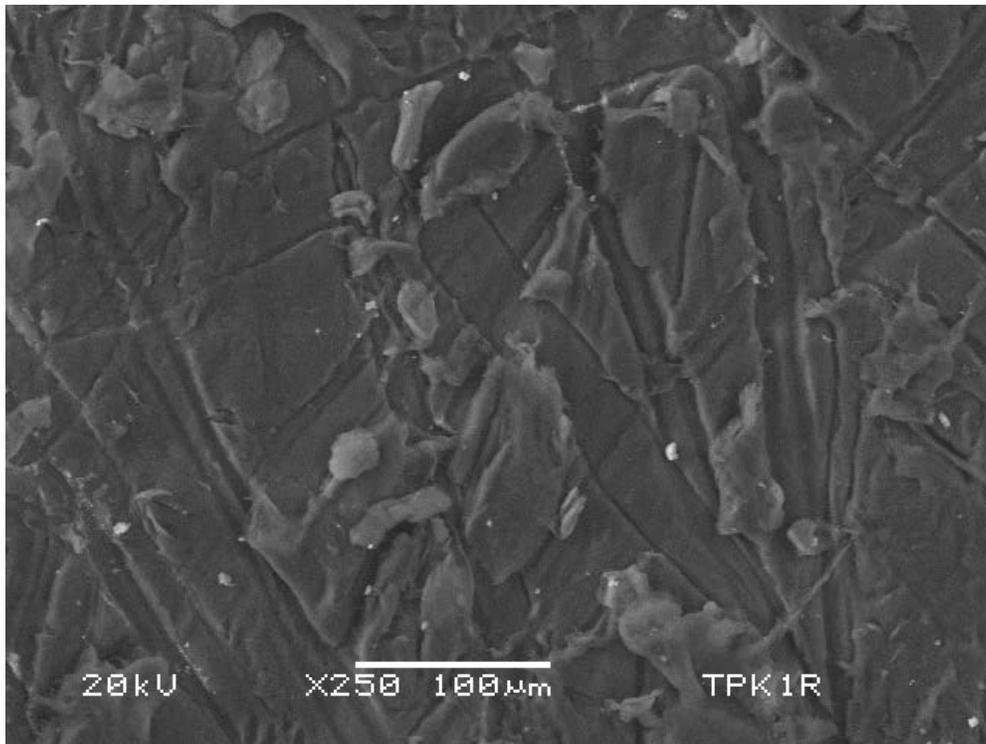


Figura 33. Micrografía obtenida por SEM de Polialuminio a 250X.

La Figura 34 así como la Tabla 6 muestran el resultado del análisis elemental por EDS, así como la composición química en porcentaje atómico respectivamente.

Para el Polialuminio se observa que hay una concentración alta de carbono (C) y oxígeno (O), que corresponden a la presencia de restos de celulosa y polímero.

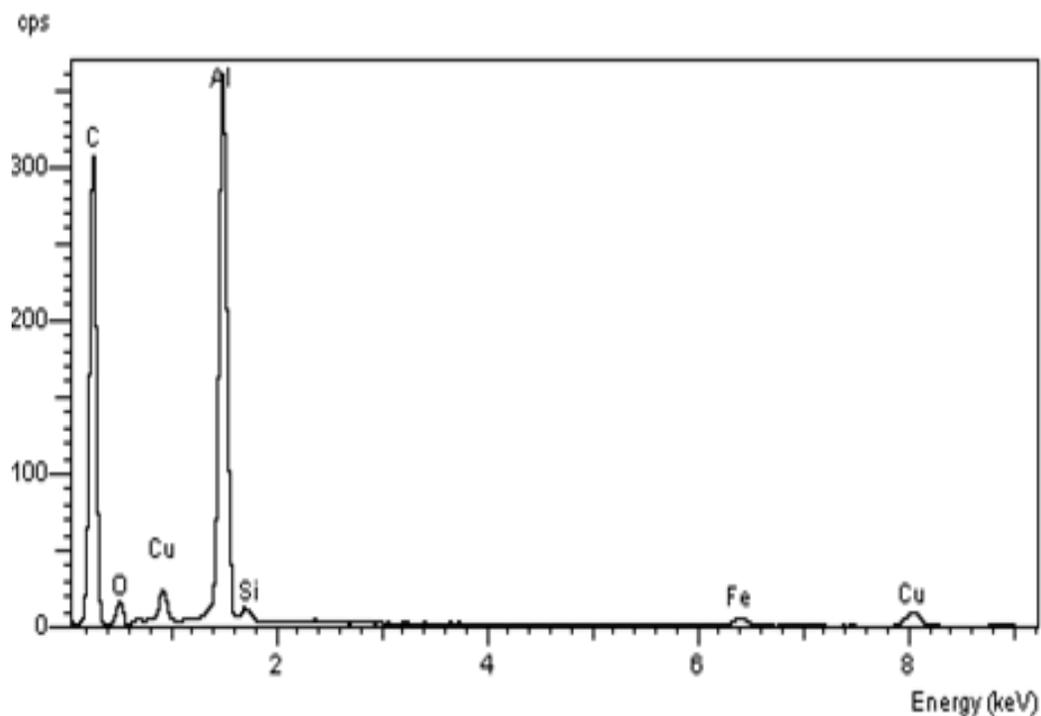


Figura 34. Análisis elemental por EDS de Polialuminio.

Tabla 6. Composición química de Polialuminio por análisis elemental.

Elemento	%
C	72.085
O	8.102
Al	14.895
Si	0.411
Fe	1.050
Cu	3.454

### 3.2.5 Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM).

Las micrografías comparativas de fluorescencia, tiene tres tipos de longitudes, azul 405 nm, verde 488 nm, rojo 532 nm, en la figura 35(a), hay cuatro puntos luminosos, esto es por el PEBD, y ve rugoso probablemente por la celulosa, en la figura 35(b), la misma rugosidad se ve fluorescente que confirma que son restos de celulosa, en el inciso 35(c)(d), se notan unos puntos muy marcados, igualmente por el PEBD.

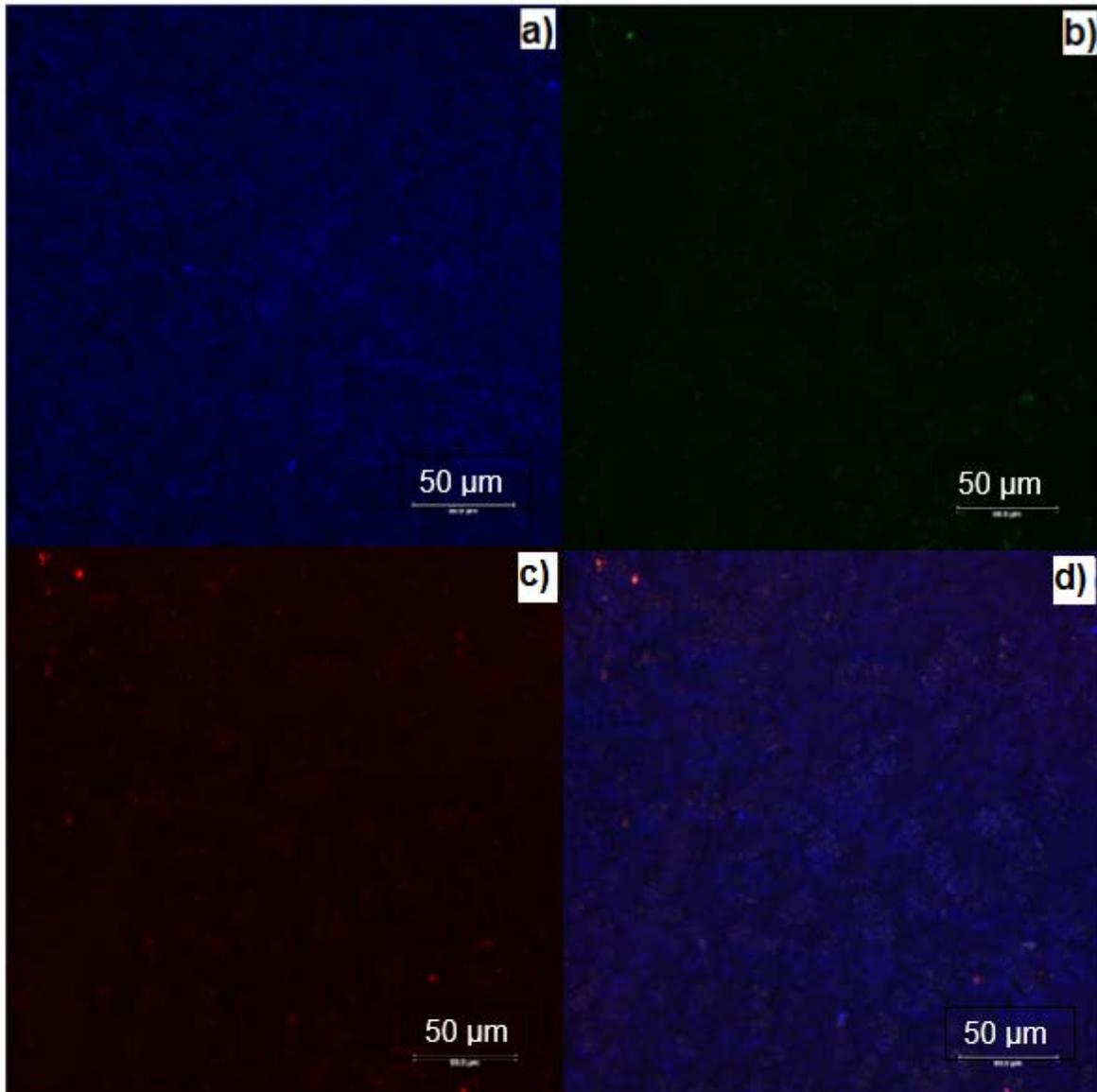


Figura 35. Micrografía por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

### 3.3 Caracterización de Aluminio

#### 3.3.1 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).

El resultado de la caracterización por AFM de la película de aluminio se presenta en la figura 36.

En las cuatro micrografías se puede apreciar líneas muy marcadas, también se distingue que la película no es uniforme, esto se debe a la incineración del polietileno de baja densidad (PEBD), la zona más alta alcanza una altura de 2.48  $\mu\text{m}$ , que se observa con los colores más claros y la zona más baja aproximadamente 2  $\mu\text{m}$ , que son con los colores más oscuros. La película de aluminio no es totalmente lisa, como se observa en la figura 36, el promedio de la altura de la película de aluminio es de aproximadamente de 1.86  $\mu\text{m}$ .

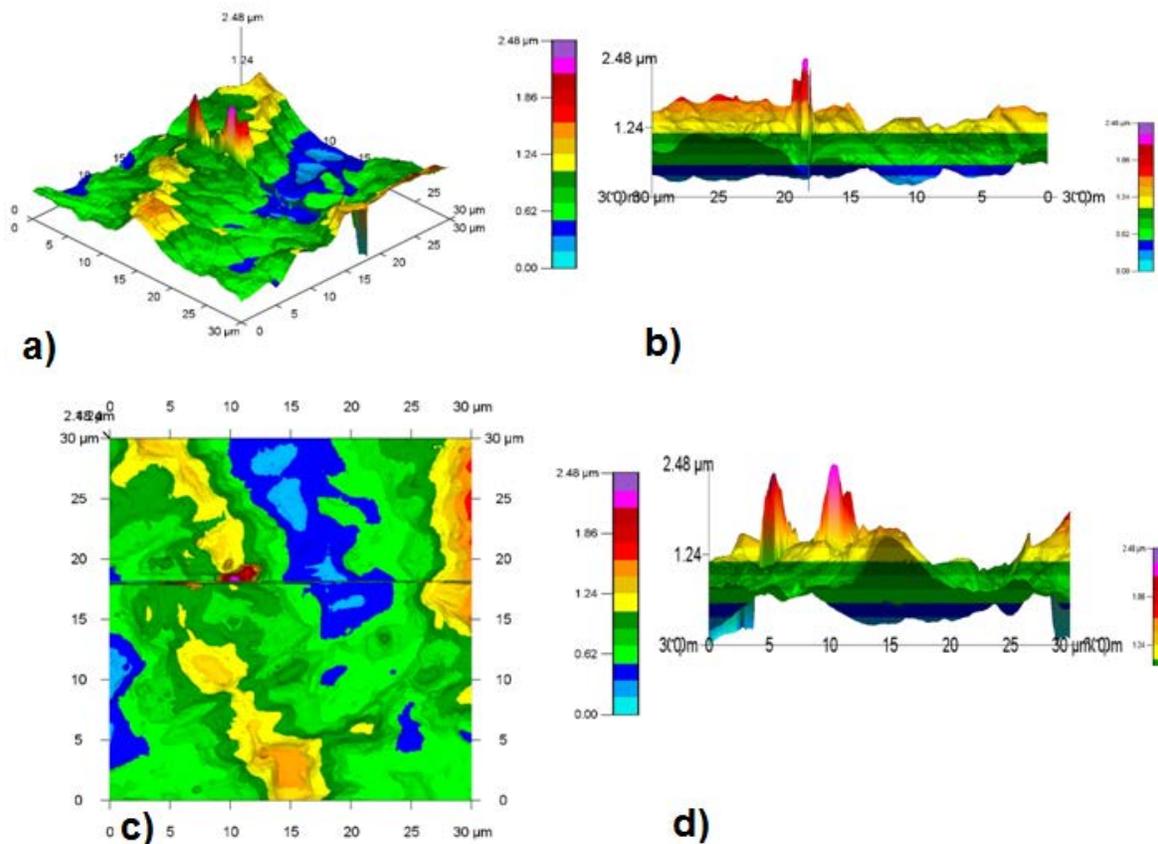


Figura 36. Distintos cortes de aluminio obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal

### 3.3.2 Microscopía Electrónica de Barrido.

El resultado de la caracterización por MEB se observa en la figura 37, donde se presentan unos pequeños huecos (que pueden ser a causa de la incineración (proceso por el cual se obtuvo el aluminio del Tetra Pak®), pero también unas marcas tipo hexagonales, que puede ser celulosa por la estructura química de esta), y una disposición plana continua que se atribuye a la presencia de aluminio.

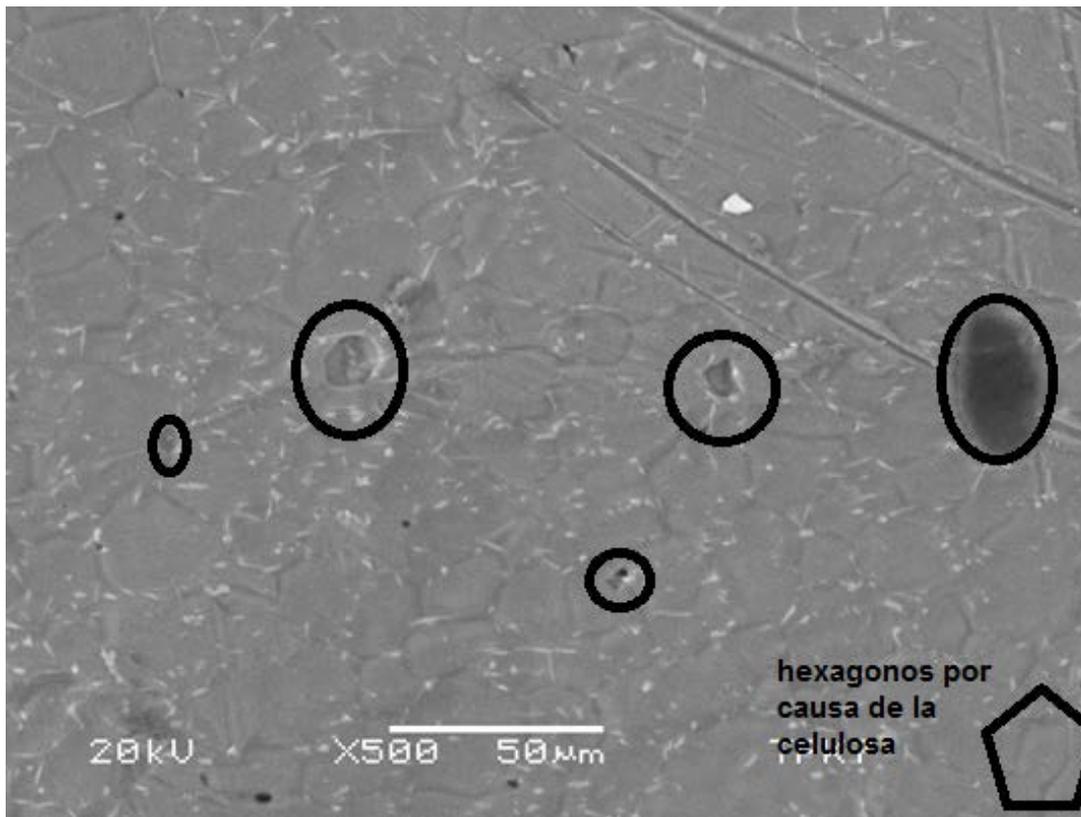
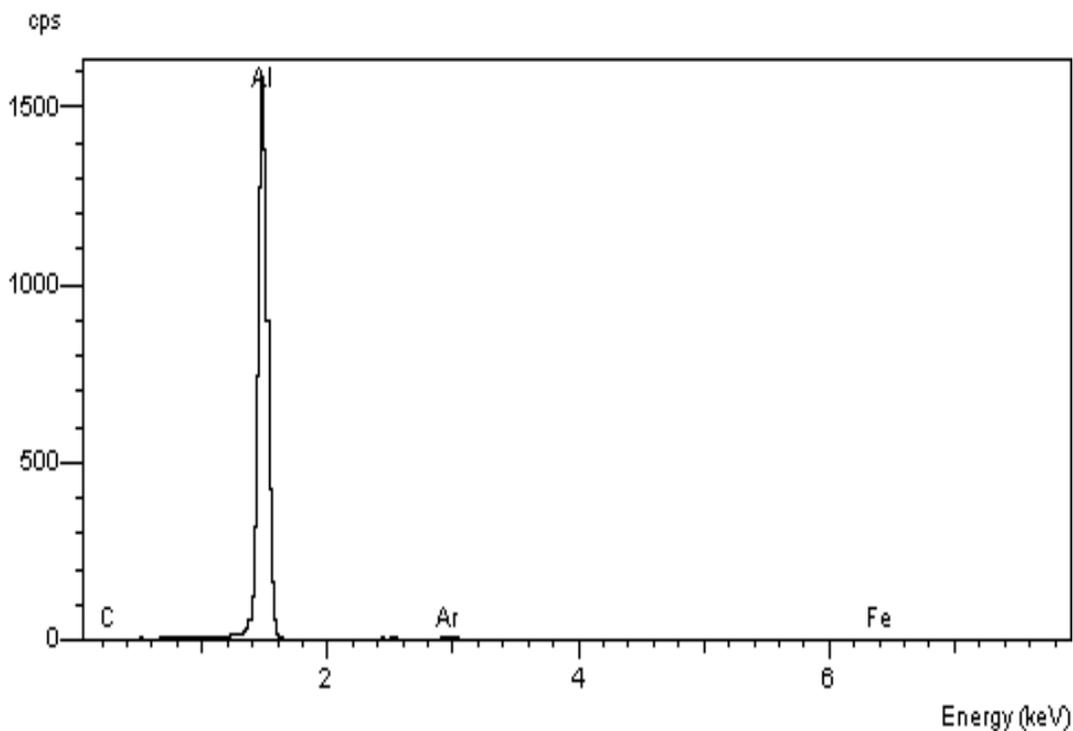


Figura 37. Micrografía obtenida por MEB-EDS de aluminio.

La figura 38, muestra el resultado del análisis elemental por EDS, para la muestra de aluminio.



**Figura 38. Micrografías obtenidas por SEM-EDS de Aluminio.**

La tabla 7 muestra la composición química expresada como porcentaje atómico, se observa que hay una concentración alta de aluminio. También se detectó carbón (C) en un 10.148%, argón y hierro en una menor cantidad.

**Tabla 7. Composición química de Aluminio (Al), por análisis elemental.**

<b>Elemento</b>	<b>Elemento %</b>
<b>C</b>	10.148
<b>Al</b>	88.189
<b>Ar</b>	0.661
<b>Fe</b>	1.000

### 3.3.3 Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM).

Las micrografías comparativas de fluorescencia, tiene tres tipos de longitudes, azul 405 nm, verde 488 nm, rojo 532 nm, en la figura 39 en los cuatro incisos, se observa que el material analizado es opaco, también tiene una rugosidad tipo porosa, esto se debe que para separar el PEBD del Al, se incinero el PEBD y probablemente sea el caso del porque se tiene esa rugosidad.

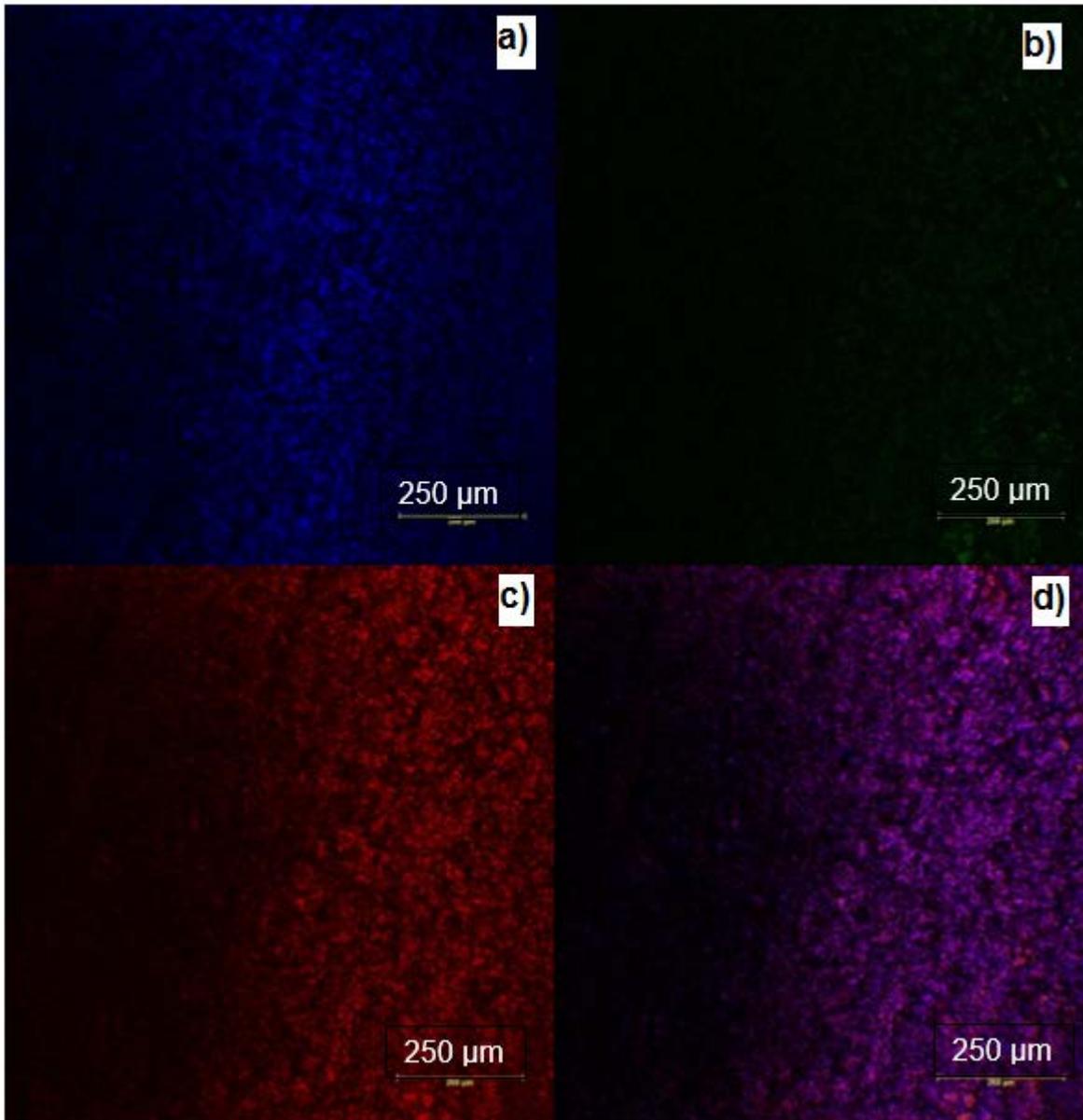


Figura 39. Micrografías obtenidas por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

Para efectos de comparación entre resultados de las pruebas de caracterización realizadas al aluminio del Tetra Pak®, también se efectuaron análisis topográficos por MEB-EDS, microscopía confocal y AFM, a aluminio obtenido a partir de una lata. Estos resultados se muestran a continuación.

### 3.4 Caracterización de Aluminio de lata.

#### 3.4.1 Resultados de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).

El envase se aluminio de lavó, secó y cortó en forma cuadrada de 5 cm\* 5 cm, el proceso para la elaboración de prueba se define en la sección 2.5.1.

En la micrografía obtenida por AFM (figura 40) se observa la topología del metal. En las cuatro imágenes se pueden apreciar líneas muy marcadas, esto se debe al proceso para la fabricación de la lata de aluminio.

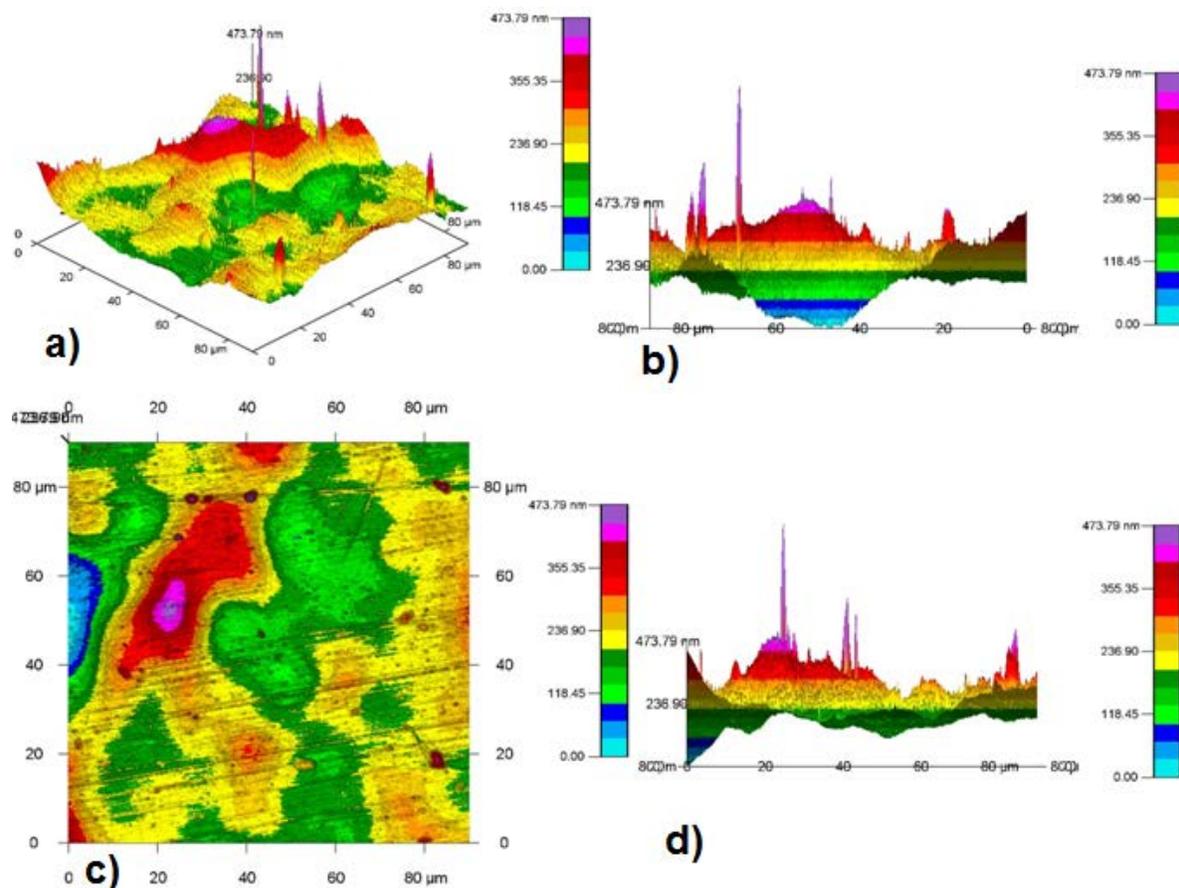


Figura 40. Distintos cortes de aluminio obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) (a) Isométrico; (b) Lateral; (c) Superior; (d) Frontal.

### 3.4.2 Microscopía Confocal de Barrido Láser (CLSM).

Las micrografías comparativas de fluorescencia, tiene tres tipos de longitudes, azul 405 nm, verde 488 nm, rojo 532 nm, por lo que se observa, que el material de la figura 41, es opaco, ya que tiene poca fluorescencia, igualmente en la figura 41(a), también se observa craqueada la imagen, en la 41(b)(c)(d), se observa algunos puntos, pero esto puede ser por el barniz que se aplica a las botellas para proteger el interior de la lata y el aluminio.

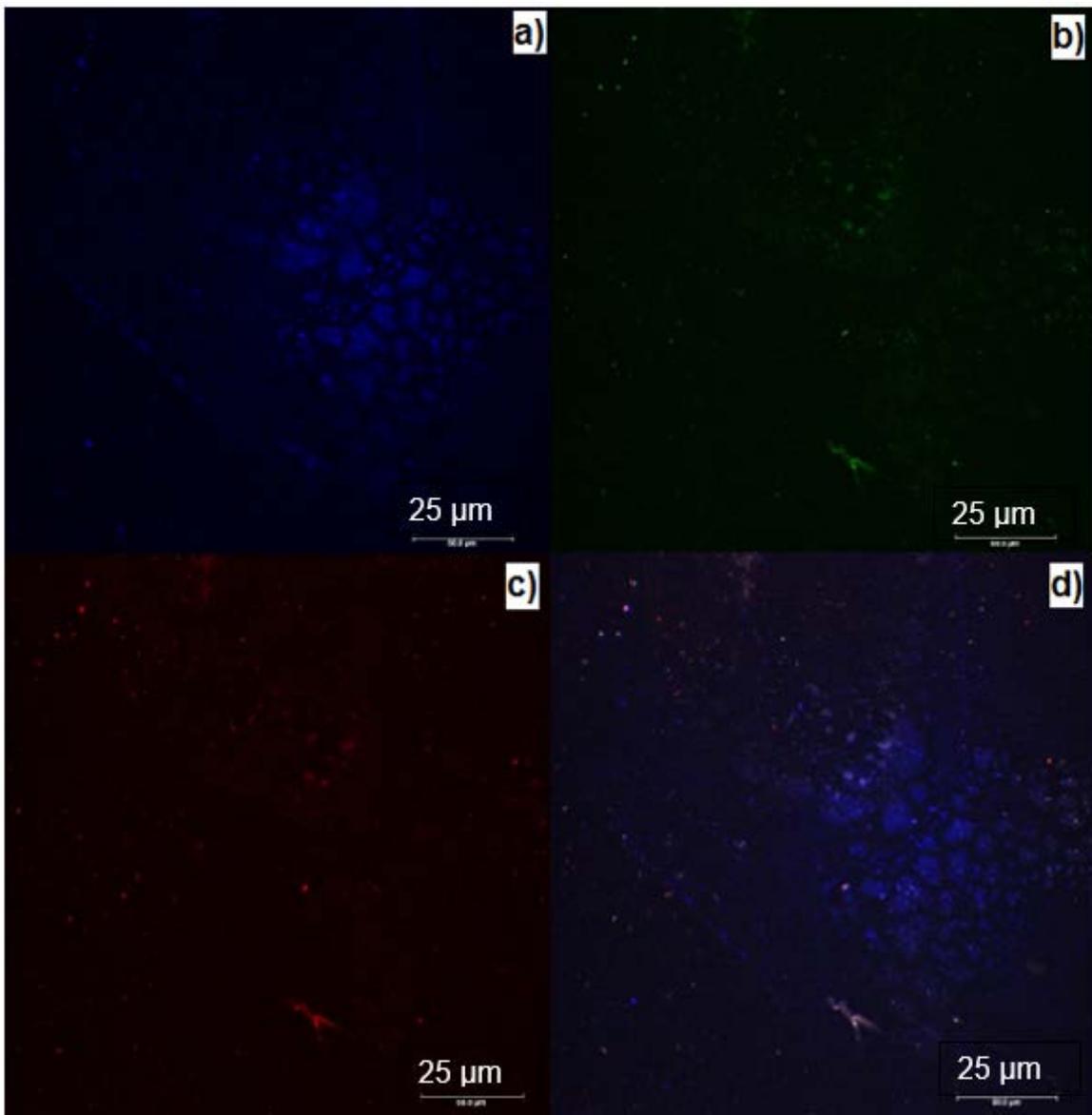


Figura 41. Micrografías obtenidas por Microscopía Confocal de Barrido Laser (CLSM).

# CONCLUSIONES

- El tipo de caracterización que se realizó al Tetra Pak®, apporto información de cada uno de sus componentes, en el caso del análisis de CLSM, aportó poca información, con respecto al aluminio, pero en el análisis de la celulosa, se pudo observar cómo está constituida, por lo cual eso ayuda a mejorar algún proceso de reciclaje, como podría ser el hidropulpeo.
- En el caso del MEB-EDS, por proporcionó información de que componentes y a su vez si está contaminado por algún otro elemento, el envase de Tetra Pak®, esto ayuda al reciclaje mediante algún disolvente, aceite, etc, para no alterar su grado de pureza de algún elemento constituido del envase.
- En los análisis termogravimétricos, facilita mucha información, sobre cómo actúa el envase compuesto de Tetra Pak®, aplicando temperatura. En este caso nos proporciona información para el método de separación de PEBD-Al, por pirolisis.
- En el AFM, provee información acerca de la topología del envase, esto ayuda, a saber, que tan rugoso está el material y que tan penetrado esta cada uno de los componentes del envase Tetra Pak®.
- Cada uno de los análisis para la caracterización, aporta muy buena información, para proponer algún proceso para separar al 100% cada uno de los componentes de Tetra Pak®, pero también que este proceso fácil, económico y sobre que no contamine más, que la fabricación del envase.

# GLOSARIO

## **A**

Alúmina: Es el óxido de aluminio., 25

## **B**

Bauxitas: Roca blanda formada principalmente por hidróxido de aluminio, 20

Biodegradables: Que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales., 10

## **C**

Capacidad calorífica ( $\Delta C_p$ ): es la energía necesaria para aumentar la temperatura de una determinada sustancia en una unidad de temperatura., 27

Caracterización: Se refiere al establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales, etcetera., 1

Coefficiente de fricción: Expresa la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto., 19

## **E**

Energía de Gibbs ( $\Delta G$ ): es un potencial termodinámico, es decir, una función de estado extensiva con unidades de energía, que da la condición de equilibrio y de

espontaneidad para una reacción química (a presión y temperatura constantes). Se simboliza con la letra G mayúscula., 27

Entalpía ( $\Delta H$ ): es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno., 27

Entropía ( $\Delta S$ ): es una magnitud física que, mediante cálculo, permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo., 27

## **F**

Fluorescencia: Propiedad que tienen algunas sustancias de reflejar luz con mayor longitud de onda que la recibida, cuando están expuestas a ciertos rayos del espectro., 51

## **I**

Inyección: es un proceso que consiste en inyectar un polímero, cerámico o un metal en estado fundido (o ahulado) en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado compuerta. En ese molde el material se solidifica, comenzando a cristalizar en polímeros semicristalinos. La pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada, 22

## **M**

Moldeo por compresión: Es un proceso de conformado de piezas en el que el material, generalmente un polímero, es introducido en un molde abierto al que luego se le aplica presión para que el material adopte la forma del molde y calor para que el material reticule y adopte definitivamente la forma deseada., 22

Morfología: En términos generales cuando se habla de morfología se está refiriendo al estudio de las formas externas de algo., 2

## **O**

Olefinas: Grupo de hidrocarburos, incluyendo etileno y propileno, de especial importancia como insumo a la industria química., 18

## **P**

Peletizado.: Es un proceso que consiste en la elaboración de material reciclado, en forma de gránulos. Se emplean máquinas y equipos complementarios que contribuyen al proceso. • Para hablar de peletizado, debemos referirnos, antes, al reciclaje de polímeros., 5

Pirólisis: Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (y de cualquier halógeno). Involucra cambios simultáneos de composición química y estado físico, los cuales son irreversibles., 7

Polisacárido: Los polisacáridos son biomoléculas formadas por la unión de una gran cantidad de monosacáridos. Se encuentran entre los glúcidos, y cumplen funciones diversas, sobre todo de reservas energéticas y estructurales, 16

## **R**

Resistencia a la tracción: Cuando un material se estira de manera que la longitud aumenta y disminuye la sección transversal, resistencia a la tracción es la cantidad de estrés que el material es capaz de soportar., 19, 20

Rotomoldeo: Es un proceso de conformado de productos plásticos en el cual se introduce un polímero en estado líquido o polvo dentro de un molde y éste, al girar en dos ejes perpendiculares entre sí, se adhiere a la superficie del molde, creando piezas huecas., 22

## **T**

Temperatura de reblandecimiento: Temperatura a partir de la cual un material plástico pasa de un estado rígido a un estado gomoso y blando., 19

Tenacidad: Fuerza que impulsa a continuar con empeño y sin desistir en algo que se quiere hacer o conseguir., 20; Fuerza que impulsa a continuar con empeño y sin desistir en algo que se quiere hacer o conseguir., 19

Termoplástico: Que se ablanda por la acción del calor y se endurece al enfriarse, de forma reversible., 19

# REFERENCIAS

- 
- 1 Húngaro Berenguer Mónica, Moncada Trista José J, Yero Deas Douglas, TYJOURTI - EL RECICLAJE, LA INDUSTRIA DEL FUTUROPY -2006RP - IN FILET2 - Ciencia en su PCVL - IS - 3SN - 1027-2887 UR - <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181322792005ER>.
  
  - 2 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, Reciclaje de Plásticos, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 131.
  
  - 3 Besednjak Dietrich Alejandro," materiales compuestos", Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones,1ra Edición, septiembre 2005, Edicion de la Universidad Politecnica de Catalunya, S.L, Pp 15
  
  - 4 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, Reciclaje de Plásticos, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 124.
  
  - 5 VARGAS, Yolanda; Adolfo Eduardo Obaya Valdivia, Guadalupe Iveth Vargas Rodríguez, Virginia Gómez-Vidales, José Alvaro Chávez Carvayar, Arturo García Bórquez"Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores dentro del Observatorio Virtual Ixtli, UNAM" Revista Digital Universitaria [en línea]. 1 de mayo de 2013, Vol. 14, No.5 [Consultada:]. Disponible en Internet: <<http://www.revista.unam.mx/vol.14/num5/art07/index.html>> ISSN: 1607-6079.

- 
- 6 Martínez González Ana Citlalic, "Reciclaje", TY - JOURTI - Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México PY -2001RP - IN FILESP - 17-26T2 - Gaceta EcológicaVL - IS - 58SN - 1405-2849 UR - <http://google.redalyc.org/articulo.oa?id=53905802ER>
- 7 Atila Murathan, Ayşe Selek Murathan, Metin Gürü, Muza feBalbas, Manufacturing low density boards from waste cardboards containing aluminium, 11 September 2006, 28 (2007) 2215–2217
- 8 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, Reciclaje de Plásticos, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 102.
- 9 Castellanos Ramos Pedro, "reciclaje químico", Gestión del medio ambiente (1996-2005), Ediciones universidad de Salamanca, 2005. pp 316.
- 10 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, Reciclaje de Plásticos, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 102.
- 11 Fernández Ladreda, Manual para la formación del medio ambiente, "Concepto de medio ambiente", Editorial Lex Nova, primera edición 2008, España, pag 42.
- 12 Tetra Pak®, Informe de Sustentabilidad Actualizado 2014 PDF, pág 12.
- 13 Manfredi Michele, Giuseppe Vignali, Comparative Life Cycle Assessment of hot filling and aseptic packaging systems used for beverages, 21 de Septiembre de 2014.

- 
- 14 Fernández Ladreda, Concepto de Medio Ambiente, Manual para la formación en medio ambiente, 1ra Edición noviembre de 2008, Editorial Lex Nova, S.A, pp 42.
- 15 Virginie Manuel, 1ra Edición marzo de 2011, Nuevos Emprendimientos Editoriales S.L, Consumo de usar y tirar basura, Los Caminos del Reciclaje, pp 17.
- 16 García Georgina, “Producción de envases de Tetra Pak®”, 25 de marzo de 2014, México desperdicia miles de MDD anuales en plástico, Informador mx, ([www.informador.com.mx](http://www.informador.com.mx)).
- 17 Schwanssee Elvira, 12 enero 2007, “El Mexicano y su botella de PET”, Medio ambiente, conservación y puntos intermedios, ([playambiental.wordpress.com](http://playambiental.wordpress.com)).
- 18 Rodríguez-Gómez J.E., Silva-Reynoso, Y.Q. Varela-Guerrero V, Núñez-Pineda A., Barrera-Díaz C.E., Development of a process using waste vegetable oil for separation of aluminum and polyethylene from Tetra Pak®, 26 September 2014.
- 19 Ayırlmis N, Candan Z, Hiziroglu S. Mater Des 2008;29:1897–903.
- 20 Rodríguez-Gómez J.E., Silva-Reynoso, Y.Q. Varela-Guerrero V, Núñez-Pineda A., Barrera-Díaz C.E., Development of a process using waste vegetable oil for separation of aluminum and polyethylene from Tetra Pak®, 26 September 2014.
- 21 Rodríguez Ivet, 27 de Julio de 2011, Tetra Pak®: materia prima para industria, CNNEXPANSIÓN, ([www.cnnexpansion.com](http://www.cnnexpansion.com)).

- 
- 22 La República, Colombia, 14 de marzo de 2001, Tetra Pak® se propone reciclar el 40% de sus envases para 2020, Logística, Revistas Énfasis, ([www.logisticamx.enfasis.com](http://www.logisticamx.enfasis.com)).
- 23 ERP, 03 de marzo de 2015, Tetra Pak®, eslabón en la distribución de desayunos escolares, El economista, ([eleconomista.com.mx](http://eleconomista.com.mx))
- 24 “Reciclaje Tetra Pak®”, En 2014 Tetra Pak® recicló 20 mil toneladas de envases, Manufactura información estratégica para la industria, ([www.manufactura.mx/industria/2015/05/15/en-2014-tetra-Pak-®-reciclo-20-mil-toneladas-de-envases](http://www.manufactura.mx/industria/2015/05/15/en-2014-tetra-Pak-®-reciclo-20-mil-toneladas-de-envases)).
- 25 Rodríguez Gómez Juan, “envases Tetra Pack”, Eduardo, Desarrollo de un proceso de separación Aluminio-Polímero a partir de Tetra Pack, junio 2013 Tesis
- 26 Román Alfredo, “Distribución de reciclaje de Tetra Pak®”, Esperiencias en el reciclado - Tetra Pak®, XIX Congreso Internacional Ambiental CONIECO, septiembre 28, 2011
- 27 J. Haydary, D. Susa, J. Dudáš, Pyrolysis of aseptic packages (tetraPak®) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition, Febrero 2013.
- 28 Mourad Anna Lucia, E.C. Garcia Eloisa Braz Vilela Gustavo, Von Zuben Fernando, Influence of recycling rate increase of aseptic carton for long-lifemilk on GWP reduction, 24 October 2007, Resources, Conservation and Recycling 52 (2008) 678–689
- 29 “Las 6 barreras de protección del envase”, Tetra Pak®, ([www.tetraPak-®.com](http://www.tetraPak-®.com)), octubre 10, 2014.

- 
- 30 Agilar Pacheco Luis, Barreras de protección del envase de Tetra Pak®, Informe de sostenibilidad Tetra Pak® España, 2004, pp 8.
- 31 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, “Propiedades físicas y mecánicas del PEBD, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 129.
- 32 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, “Propiedades del polietileno-aluminio de los envases de Tetra Pak®”, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 129.
- 33 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, “Propiedades del Aluminio “, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 130.
- 34 Sufeng Zhang, Ke Luo, Lulu Zhang, Xingxian Mei, Shumiao Cao and Baiji Wang Interfacial separation and characterization of Al –PE composites during delamination of post-consumer Tetra Pak® materials, 10 November 2014, DOI 10.1002/jctb.4573.
- 35 Donald Voet, Judith G. Voet, Charlotte W. Prat, “Celulosa”, Fundamentos De Bioquímica, La vida a nivel molecular. 2da Edición, editorial panamericana 2007, pp 217.

- 
- 36 Peña Díaz Antonio, Arrollo Begovich Ángel, Gómez Puyou Armando, Tapia Ibergüengoytia Ricardo, "Celulosa", 2004, undécima reimpresión de la segunda impresión, Editorial Lumisa S.A de C.V, México DF, pp146.
- 37 Melo Ruiz Virginia, Cuamatzi Tapia Óscar, "Celulosa", Bioquímica de los procesos metabólicos, reverté ediciones S.A de C.V, 2006, Pp 67
- 38 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, "Celulosa", Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 130.
- 39 Virginia Melo, Oscar Cuamatza, Celulosa, Bioquímica Procesos Metabolicos, Polisacáridos Estructurales. Mexico DF reverté 2006, pp 67.
- 40 Investigación y Desarrollo (ID), "Celulosa como materia prima", Obtienen celulosa de envases de desecho, Ciudad de México 14 de octubre de 2011, El informador.mx, ([www.informador.com.mx](http://www.informador.com.mx)).
- 41 Muñoz Árlenne, "Reciclaje Tetra Pak®", Tetra Pak®, verde desde su nacimiento, RSE Redacción Mundo Ejecutivo, 03 de Julio de 2012. ([mundoejecutivo.com.mx](http://mundoejecutivo.com.mx)).
- 42 Investigación y Desarrollo (ID), "El negocio creciente del reciclado del papel", Oportunidades de negocios en México, 21 de febrero 2012, ([www.mexicanbusinessweb.mx](http://www.mexicanbusinessweb.mx)).

- 
- 43 W. Billmeyer Fred, "Propiedades de Polietileno de Baja Densidad", Ciencia de los Polímeros, Edición Wiley-Interscience, a Division of John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, reimpresión octubre 2004 España, pp 385
- 44 Thornton Morrison, Boyd Robert Neilson, Química orgánica, quinta edición, "Polietileno", Editorial person Addison Wesley, pág 329.
- 45 "Propiedades de PEBD", Características y aplicaciones del polietileno de baja densidad (LDPE), enero de 2011, (<http://www.quiminet.com>).
- 46 Ramírez Regalado Víctor Manuel, "Estructura general del etileno y polietileno", Química General, 1ra Edición Ebook México 20014, Grupo Editorial Patria, pp 401.
- 47 Unshelm Báez Carlos, "Propiedades de polietileno de baja densidad", Plastic waste: The residues and wastes plastics from the tourist activities in the moors merideños in the municipality rangel. State Merida-Venezuela, 2014.
- 48 W. Billmeyer Fred, "Propiedades de Polietileno de Baja Densidad", Ciencia de los Polímeros, Edición Wiley-Interscience, a Division of John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, reimpresión octubre 2004 España, pp 388.
- 49 García Guinea Javier, Martínez Frías Jesús, "Método de obtención de aluminio", Recursos Minerales de España 1992, Consejo Superior de Investigaciones científicas, Madrid España, pp 197

- 
- 50 Elías Castells Xavier, "Aluminio", Diccionario de términos ambientales: Reciclaje de residuos industriales, ediciones Díaz de Santos, Madrid España 2012, pp 1160.
- 51 González Escárcega Oscar, "Reciclaje de Aluminio", Reciclaje de Aluminio negocio poco explotado, 05 de diciembre de 2011, El Universal mx, (<http://archivo.eluniversal.com.mx>).
- 52 I.Q. ZENIL RODRÍGUEZ ARIADNA, "Potencial de reciclaje de envases multicapas de las estaciones de transferencia Coyoacán y Xochimilco del distrito federal" Tesis 2011.
- 53 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, "Celulosa", Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 130.
- 54 Hidalgo Salazar Miguel A., Luiz Neves Fernando, Baena Eduardo. Possibilities of fabrication of aluminium polyethylene obtained from multilayer package recycling. Ferbrero 2013.
- 55 Núñez Álvarez Lysset minerva, El envase de cartón laminado tipo Tetre Brick: un problema ambiental y sus posibilidades de aprovechamiento. Tesis
- 56 Martino Horacio, "Polialuminio, Reciclado de Cartón, envases de Tetra Pak®, Diario y Papel", Reciclaje de Envases Tetra Pak® Argentina y Chile, pp 11, ([www.esquel.org.ar](http://www.esquel.org.ar)).

- 
- 57 Martínez Barrera Gonzalo, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Teresa López Lara, Carmina Menchaca Campos, 1ra edición 2015, OmniaScience, “pirolisis”, Materiales sustentables y reciclados en la construcción, pp 130.
- 58 Sufeng Zhang, Ke Luo, Lulu Zhang, Xingxian Mei, Shumiao Cao and Baiji Wang. Interfacial separation and characterization of Al –PE composites during delamination of post-consumer Tetra Pak® materials. Mayo 2014
- 59 Rodríguez-Gómez J.E., Y.Q. Silva-Reynoso, Varela-Guerrero V, Núñez-Pineda, A, Barrera-Díaz C.E, Development of a process using waste vegetable oil for separation of aluminum and polyethylene from Tetra Pak®, septiembre 2014.
- 60 Sánchez Sandoval Danaé Samara, "desarrollo de una tecnología de separación sustentable del envase multilaminado así como la separación de sus componentes y sus posibilidades de subproductos comerciales", Instituto Politécnico Nacional, 2013, Tesis.
- 61 Elías Castells Xavier, “Reciclaje de Aluminio”, Reciclaje de Residuos Industriales, Aplicación a la fabricación de materiales para la construcción, Ediciones Díaz de Santos, S. A, Madrid España 2000, pp 458-459.
- 62 Pérez Salazar Salvador Mosqueira, “Celulosa”, Introducción a la Química y el ambiente, 1ra Edición Ebook, México 2014, Grupo Editorial Patria, S.A. de C. V, pp 439-440

- 
- 63 Sabin Fernández Juan D. “Calorimetría diferencial de barrido”, Estabilidad Coloidal de Nanoestructuras Liposómica, Tesis Doctoral. Enero 2007, pp 75-76. (books.google.com.mx).
- 64 Gómez Ruiz Santiago, Sierra Alonso María Isabel, Pérez Quintanilla Damián, “Termo gravimetría”. Análisis Instrumental, editorial netbiblo, 2010, pp 207
- 65 F.Egger, J. Henkel, Exprim.Techn.d. Physik, 34(1986)201.
- 66 [www.google.com.mx/search?q=funcionamiento+microscopia+electronica+de+barrido](http://www.google.com.mx/search?q=funcionamiento+microscopia+electronica+de+barrido)
- 67 Análisis Termogravimétrico (TGA), nitcharacter Measuring the carácter of you nonoparticles, <http://www.nitcharacter.com>, Octubre 15, 2014.
- 68 Arenas Alatorre Jesús A, “Microscopía confocal de Barrido Laser (CLSM)”, 10 de Julio de 2005, Vol. 6, N°7, Revista digital universitaria.
- 69 Guarneros García Orlando, de Vicente y Oliva Jesús, Ocaña Moreno José Luis, Maya Méndez Mauro Eduardo', Rodríguez Reyna, función de un microscopio confocal de barrido laser, “Uso del microscopio confocal para la caracterización dimensional en micromecanizados (step height)”, Sociedad de Ingeniería mecánica de México, Vol. 4, N°2, 2012
- 70 Analizador térmico, CCIQS, Centro Conjunto de Investigación de Química Sustentable UAEM-UNAM, ([www.cciqs.uaemex.mx](http://www.cciqs.uaemex.mx)).

---

71 Microscopio de fuerza atómica, CCIQS, Centro Conjunto de Investigación de Química Sustentable UAEM-UNAM, ([www.cciqs.uaemex.mx](http://www.cciqs.uaemex.mx)).

72 Microscopio de Barrido Electrónico, ININ, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, ([www.inin.gob.mx](http://www.inin.gob.mx)).

73 Microscopio Confocal de Barrido Láser, CCIQS, Centro Conjunto de Investigación de Química Sustentable UAEM-UNAM, ([www.cciqs.uaemex.mx](http://www.cciqs.uaemex.mx)).