

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE METALES EN DISCOS COMPACTOS
MEDIANTE PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA SU REUTILIZACIÓN**

DIRECTORA: Ph. D. DIANA ENDARA DRANICHNIKOVA
diana.endara@epn.edu.ec

CO DIRECTORA: MSC. MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL
maria.aldas@epn.edu.ec

ALYSON MARGARITA MONCAYO DE LA CUEVA
alyson.moncayo@epn.edu.ec

VANESSA ALEJANDRA VÁZQUEZ BORRERO
vanessa.vazquez@epn.edu.ec

Quito, octubre 2018

DECLARACIÓN

Nosotros, Alyson Margarita Moncayo De La Cueva y Vanessa Alejandra Vázquez Borrero, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**ALYSON MARGARITA
MONCAYO DE LA CUEVA**

**VANESSA ALEJANDRA
VÁZQUEZ BORRERO**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el siguiente trabajo fue desarrollado por Alyson Margarita Moncayo De La Cueva y Vanessa Alejandra Vázquez Borrero, bajo nuestra supervisión.

Ph. D. DIANA ENDARA
DIRECTORA DE PROYECTO

Msc. MARÍA BELÉN ALDÁS
CODIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud, ser mi fuerza y guía en cada paso que doy y cada acción que tomo.

A mis abuelitos Beatriz y Vicente, que en vida fueron y serán mi inspiración para seguir adelante.

A mi madre Margarita por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional y su apoyo en cada momento.

A mi padre Francisco, por ser el cómplice de mis aventuras, por enseñarme a levantarme y seguir adelante.

A mi hermana María Beatriz por ser la persona que me hace ser mejor cada día.

A mi nana Tachi por cuidarme y amarme como una hija.

A mi ñaño Iván por ser ejemplo de lucha, tranquilidad, amor y lealtad.

A mi mejor amiga Mónica por ser una hermana conmigo, por los consejos, lealtad y no dejarme sola en esta etapa de mi vida.

A las personas más importantes que conocí en la universidad; Gabo por ser la persona que no ha dejado que me derrumbe, gracias por el apoyo y cariño. Y Diego, por ser el mejor amigo que me ha apoyado en los buenos y malos momentos, que con una sonrisa todo soluciona y hace de los días malos algo bueno.

A Flavio, el hermano que nunca tuve, por cuidarme y guiarme en todo momento, de seguro la carrera no hubiera sido igual sin ti.

A todos mis amigos de la universidad, en especial a Tatiana y Steeven, por compartir momentos inolvidables conmigo, regalarme sonrisas y ser un apoyo en los momentos difíciles.

A mi compañera de tesis Vanessa, por su colaboración, entusiasmo, fe, entrega y dedicación en el transcurso de este proceso, más que compañera, una amiga y persona inigualable.

A todas y cada una de las personas del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, en especial al Ingeniero Sebastián Gámez que siempre estuvo ahí para responder cualquier inquietud durante la realización de este proyecto.

A la Ph.D, Diana Endara, directora del proyecto, por haberme dado la oportunidad y confianza de realizar este proyecto y sobre todo por saberme guiar en cada etapa del mismo.

A la Msc. María Belén Aldás, codirectora del proyecto, por aconsejarme, guiarme y darme ánimos durante la realización de este trabajo.

Alyson Margarita Moncayo de la Cueva

AGRADECIMIENTOS

Si bien el fin de esta etapa me ha permitido formarme como profesional, fueron las personas que se cruzaron en esta fase las que me hicieron ser un mejor ser humano.

Por ello deseo dar gracias primero a Dios que puso ángeles en mi camino, quienes me guiaron en cada paso que daba. Gracias por haber sido mi más grande refugio y por permitirme estar hoy aquí.

A mis padres, Max Vázquez y Paola Borrero, que han sido un pilar fundamental en mi vida. No serán suficientes las palabras que pueda expresar en papel, por eso espero que la vida me alcance para agradecerles el amor tan grande que me han dado. Soy el reflejo de una pequeña parte de la grandeza de seres humanos que son ustedes. Este éxito es por ustedes y para ustedes. Gracias por mostrarme que todo es posible en esta vida.

Gracias a mis hermanos, Ana Paula, Daniela y Max por ser mi inspiración más grande y mis ganas de querer ser mejor cada día para ustedes. Verlos es conocer de cerca la bondad de Dios, son el regalo más preciado que me dio la vida.

Gracias a Daniel Sosa, que ha sido un hombre maravilloso para mi madre y hermanas, y por ser quien nos dio una alegría inmensa que llena nuestros días con verla a los ojos.

A Giuseppe Espinel, que ha sido una bendición en mi vida, el lugar donde encuentro calma y respaldo siempre. Mi complemento.

Gracias a Alyson Moncayo, mi compañera de tesis, porque más allá del presente trabajo que hemos logrado desarrollar juntas, has sido una amiga para mí, un apoyo en cada batalla que librábamos en clases y fuera de ella.

Gracias a mi directora y codirectora, Diana Endara y María Belén Aldás, que fueron luz de esperanza cuando las cosas no salían como esperábamos, por su paciencia y dedicación en este trabajo del cual forman parte también.

A cada una de las personas del DEMEX que nos recibieron con tanta acogida y cariño, gracias por colaborarnos en el desarrollo de este proyecto y por habernos permitido ser testigos de la gran familia que es el Departamento de Metalurgia Extractiva.

Gracias a mis abuelos, Efraín, Richard, Leonor y Conchi, a quienes tengo una gran admiración por ser para mi un ejemplo de sabiduría, cuya grandeza se ve reflejada en la humildad de cada uno de ellos.

Gracias a toda mi familia, tíos y primos, que son extraordinarios seres humanos de quienes aprendo cada día.

A los amigos que la vida me dio, el colegio, los del barrio, los de las aulas de clases, comité ejecutivo y aquellos que llegaron de una u otra forma, gracias porque hicieron que esta etapa de mi vida universitaria estuviera llena de alegría y anécdotas que dibujaran una sonrisa en el futuro al recordarlas.

Gracias a todos los profesores con quienes compartí las aulas, es por ustedes que hoy soy parte de su cúmulo de conocimientos.

A mi alma mater, la Escuela Politécnica Nacional y las personas que la conformamos.

Gracias a todos ustedes que son el reflejo de que todavía hay bondad en el corazón del hombre.

Vanessa Alejandra Vázquez Borrero

DEDICATORIA

A mis padres, hermana, tío Iván, abuelitos y Tachi, quienes han estado presentes en cada etapa de mi vida, apoyándome con amor y ternura. Sin ustedes este logro no hubiera sido posible.

Alyson Margarita Moncayo De La Cueva

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres y hermanos

Que son el motor de mi vida.

Vanessa Alejandra Vázquez Borrero

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS	III
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA	VII
DEDICATORIA	VIII
CONTENIDO	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XVI
ÍNDICE DE ANEXOS	XVII
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XVIII
RESUMEN.....	XX
ABSTRACT.....	XXII
PRESENTACIÓN	XXIV
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	4
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 DISCOS COMPACTOS	6
2.1.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DEL DISCO COMPACTO.....	8
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS	10

2.1.3 PROBLEMÁTICA DE LOS DISCOS COMPACTOS.....	11
2.1.4 PROCESO DE RECICLAJE DE LOS DISCOS COMPACTOS.....	12
2.2 POLICARBONATO	12
2.2.1 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL POLICARBONATO.....	13
2.2.2 APLICACIONES DEL POLICARBONATO.....	14
2.2.3 RECICLAJE DEL POLICARBONATO.....	15
2.3 METALES	16
2.3.1 ALUMINIO.....	16
2.3.2 PLATA.....	17
2.3.3 TITANIO	18
2.4 MÉTODOS DE ENSAYO	20
2.4.1 METODOLOGÍA VINYLOOP.....	21
2.4.2 CRITERIOS DE SOLUBILIDAD DE POLÍMEROS	23
2.4.3 SOLVENTES ORGÁNICOS	24
2.4.4 ACETONA.....	25
2.4.5 ACETATO DE ETILO.....	25
2.5 ENSAYO DE FUSIÓN.....	26
2.6 ENSAYO DE LIXIVIACIÓN	28
2.7 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTES DE LOS DISCOS COMPACTOS.....	29
2.7.1 ESPECTROFOTOMETRÍA DE INFRARROJO POR TRANSFORMADAS DE FOURIER (FTIR)	29
2.7.2 ESPECTROSCOPIA DE RUPTURA INDUCIDA POR LÁSER (LIBS).....	30
2.7.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)	31
2.7.4 FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)	33
2.7.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	34
2.7.6 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA).....	35
CAPÍTULO III.....	37
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	37
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS DISCOS COMPACTOS	38

3.2 ENSAYOS METODOLOGÍA VINYLOOP	40
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POLIMÉRICO RESULTANTE	42
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA OBTENIDA	43
3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA MEDIANTE ENSAYO AL FUEGO	45
3.6 RECUPERACIÓN DE METALES MEDIANTE LIXIVIACIÓN	48
3.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS METALES OBTENIDOS EN LA LIXIVIACIÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO.	50
3.9 BALANCE DE MATERIA.....	51
3.8 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	51
CAPÍTULO IV	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS.....	53
4.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS DISCOS COMPACTOS.....	53
4.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA DE LOS DISCOS COMPACTOS	54
4.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA PLÁSTICA DE LOS DISCOS COMPACTOS	55
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLICARBONATO RESULTANTE LUEGO DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP	56
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA OBTENIDA	59
4.4 ANÁLISIS DEL DORÉ OBTENIDO POR FUSIÓN EN EL ENSAYO AL FUEGO	63
4.5 ANÁLISIS DE LOS METALES OBTENIDOS POR LIXIVIACIÓN DE LAS LÁMINAS METÁLICAS.	65
4.6 BALANCE DE MATERIA.....	67
4.6.1 BALANCE DE MATERIA DEL ACETATO DE ETILO	67
4.6.2 BALANCE DE MATERIA DE LA ACETONA.....	68

4.6.3 BALANCE DE MATERIA POR PROCESOS	69
4.7 EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES REALIZADAS PARA CADA SOLVENTE	73
4.8 EFICIENCIA DE CADA SOLVENTE ORGÁNICO UTILIZADO EN LA METODOLOGÍA VINYLOOP	75
4.9 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA	76
CAPÍTULO V	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
5.1 CONCLUSIONES	81
5.2 RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DISOLVENTES DEL POLICARBONATO A TEMPERATURA AMBIENTE	22
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS SOLVENTES ORGÁNICOS EN FAMILIAS.....	23
TABLA 3. COMPOSICIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS.....	53
TABLA 4. ELEMENTOS MAYORITARIOS DE LOS DISCOS COMPACTOS MEDIANTE ANÁLISIS LIBS.....	54
TABLA 5. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	59
TABLA 6. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X	60
TABLA 6. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X	60
TABLA 7. RESULTADOS DE LA RECUPERACIÓN DE METALES POR LIXIVIACIÓN.....	65
TABLA 8. RESULTADOS OBTENIDOS EN ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DEL PRECIPITADO DE LA LIXIVIACIÓN	67
TABLA 9. EFICIENCIA TOTAL DE CADA SOLVENTE EN LOS 25, 50 Y 75 GRAMOS.....	75
TABLA 10. COSTOS DE ACETONA Y ACETATO DE ETILO UTILIZADOS.....	76
TABLA 11. COSTO DEL HIDRÓXIDO DE SODIO UTILIZADO EN LA LIXIVIACIÓN	77
TABLA 12. COSTOS DE ENERGÍA DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA CALCINACIÓN Y FUSIÓN.....	77
TABLA 13. COSTOS CARGA FUNDENTE	78
TABLA 14. COSTOS TOTALES POR PROCESO	79

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISCO COMPACTO	8
FIGURA 2. ESQUEMA DE LA ELABORACIÓN DEL DISCO COMPACTO	10
FIGURA 3. UNIDAD DE REPETICIÓN DEL PC	13
FIGURA 4. REACCIÓN QUÍMICA DE FORMACIÓN DEL PC	13
FIGURA 5. DESPOLIMERIZACIÓN DEL PC POR METANÓLISIS	16
FIGURA 6. FÓRMULA QUÍMICA DE LA ACETONA	25
FIGURA 7. FÓRMULA QUÍMICA DEL ACETATO DE ETILO	26
FIGURA 8. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA SPECTROFOTOMETRÍA DE INFRARROJO CON TRANSFORMADAS DE FOURIER	29
FIGURA 9. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESPECTROSCOPIA DE RUPTURA INDUCIDA POR LÁSER.....	31
FIGURA 10. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	32
FIGURA 11. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	34
FIGURA 12. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	35
FIGURA 13. FUNDAMENTO DE LA ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	36
FIGURA 14. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN DE METALES CONTENIDOS EN DISCOS COMPACTOS	37
FIGURA 15. REMOCIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA DEL DISCO COMPACTO	38
FIGURA 16. TIPOS DE DISCOS COMPACTOS	39
FIGURA 17. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA DE RUPTURA POR LÁSER INDUCIDO	39
FIGURA 18. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA LÁMINA PLÁSTICA	40
FIGURA 19. REDUCCIÓN DE TAMAÑO DEL DISCO COMPACTO	41
FIGURA 20. ENSAYO VINYLOOP UTILIZANDO ACETONA.....	41
FIGURA 21. ENSAYO VINYLOOP UTILIZANDO ACETATO DE ETILO	42

FIGURA 22. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA LÁMINA PLÁSTICA ESULTANTE.....	43
FIGURA 23. LÁMINAS METÁLICAS OBTENIDAS EN LA METODOLOGÍA VINYLOOP (CO1).	44
FIGURA 24. LÁMINAS METÁLICAS CALCINADAS (LAM1).....	44
FIGURA 25. HOMOGENEIZACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE	45
FIGURA 26. MUESTRA COLOCADA EN LA LINGOTERA.....	46
FIGURA 27. FASE ESCORIA	46
FIGURA 28. FASE METÁLICA	47
FIGURA 29. DEFORMACIÓN DEL RÉGULO DE PLOMO.....	47
FIGURA 30. DORÉ DE PLATA.....	48
FIGURA 31. LIXIVIACIÓN DEL ALUMINIO CON HIDRÓXIDO DE SODIO	49
FIGURA 32. FILTRACIÓN DE LA MUESTRA LIXIVIADA CON HIDRÓXIDO DE SODIO	49
FIGURA 33. SOLUCIÓN FUERTE (derecha) Y SOLUCIÓN DE LAVADO (izquierda) OBTENIDA EN LA LIXIVIACIÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO	50
FIGURA 34. DORÉ OBTENIDO CON LAS LÁMINAS CALCINADAS (izquierda) Y CON LAS LÁMINAS EN PEDAZOS PEQUEÑOS (derecha)	63
FIGURA 35. FOTOGRAFÍA DEL DORÉ ANALIZADO EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.....	64
FIGURA 36. BALANCE DE MATERIA DEL ACETATO DE ETILO	68
FIGURA 37. BALANCE DE MATERIA DEL ACETONA.....	69
FIGURA 38. BALANCE DE MATERIA DE LA RECOLECCIÓN Y LIMPIEZA DE LOS DISCOS COMPACTOS EN DESUSO	70
FIGURA 39. BALANCE DE MATERIA DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LOS DISCOS COMPACTOS Y PESAJE	70
FIGURA 40. BALANCE DE MATERIA DE LA APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP.....	71
FIGURA 41. BALANCE DE MATERIA DE LA LIXIVIACIÓN	72
FIGURA 42. BALANCE DE MATERIA DEL ENSAYO DE FUSIÓN	72

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. COMPARACIÓN ENTRE LA LÁMINA PLÁSTICA DEL DISCO COMPACTO Y EL ESPECTRO PATRÓN.....	55
GRÁFICA 2. ESPECTRO FTIR DE LA MUESTRA SIN TRATAMIENTO (a) Y LA MUESTRA TRATADA CON ACETATO DE ETILO (b)	57
GRÁFICA 3. ESPECTRO FTIR DE LA MUESTRA SIN TRATAMIENTO (a) Y LA MUESTRA TRATADA CON ACETONA (c)	58
GRÁFICA 4. ANÁLISIS QUÍMICO EDS DEL DORÉ OBTENIDO EN LA FUSIÓN	64
GRÁFICA 5. ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS DEL DORÉ OBTENIDO EN LA FUSIÓN DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN	66
GRÁFICA 6. EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES DEL ACETATO DE ETILO PARA LA REMOCIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE.....	73
GRÁFICA 7. EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES DE LA ACETONA PARA LA REMOCIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE	74

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. PROFORMA REACTIVOS	91
ANEXO 2. CÁLCULO DEL COSTO DE ACETONA Y ACETATO DE ETILO	92
ANEXO 3. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN PORCENTUAL PROMEDIO DEL DISCO COMPACTO	93
ANEXO 4. DIFRACTOGRAMAS DEL ANÁLISIS LIBS	94
ANEXO 5. RESULTADOS OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS LÁMINAS METÁLICAS EN DIFRACCIÓN DE RAYOS X	98
ANEXO 6. ANÁLISIS OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS LÁMINAS METÁLICAS EN FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	99
ANEXO 7. ANÁLISIS OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS SOLUCIONES DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN MEDIANTE ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	100
ANEXO 8. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X DEL PRECIPITADO DE LA LIXIVIACIÓN	101
ANEXO 9. EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES PARA CADA SOLVENTE	102
ANEXO 10. EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE PARA CADA SOLVENTE ORGÁNICO	104
ANEXO 11. DATOS DE LOS ENSAYOS DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP	106
ANEXO 12. CÁLCULO DEL DORÉ DE PLATA PARA LAS CONDICIONES ÓPTIMAS.....	110
ANEXO 13. CÁLCULO DE LAS TONELADAS DE DISCOS COMPACTOS PARA LA OBTENCIÓN DE 22 KILOS DE PLATA	111

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

\$	Dólares americanos
%	Porcentaje
Ag	Plata
Al	Aluminio
CD	Disco Compacto
CD-R	Compact Disc Recordable
CD-ROM	Compact Disc Read-Only Memory
CD-RW	Compact Disc Rewritable
DRX	Difracción de Rayos X
EAA	Espectrometría de Absorción Atómica
EDS	Detector de Rayos X
FRX	Fluorescencia de Rayos X
FTIR	Fluorescencia de Infrarrojo por Transformadas de Fourier
g	Gramos
GB	Gigabytes
J	Joule
kg	Kilogramos
kWh	Kilovatio hora
L	Litros
LIBS	Espectroscopia de Ruptura por Láser Inducido
M	Molaridad
MB	Megabytes
Me	Metal
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
ml	Milímetros
OMS	Organización Mundial de la Salud
PC	Policarbonato
PCBs	Bifenilos Policlorados

pH	Potencial Hidrógeno
PVC	Policloruro de Vinilo
Q	Calor de reacción
R-PCV	Policloruro de Vinilo Reciclado
UV	Ultra Violeta

RESUMEN

El presente trabajo propone estudiar la recuperación de metales en discos compactos aplicando el principio de la metodología Vinyloop, seguido de procesos de lixiviación y fusión, para su reutilización en la industria metalúrgica.

En la aplicación del principio de la metodología Vinyloop, se utilizó 2400 ml de acetona y de acetato de etilo respectivamente, con lo cual fue posible tratar 226 discos compactos y separar las láminas metálicas de las láminas poliméricas. Para cada solvente se realizaron ensayos con 25 g, 50 g y 75 g de discos compactos cortados en pequeños pedazos, cada uno con 300 ml de solvente. El ensayo se realizó 10 veces reutilizando el solvente.

Las láminas metálicas obtenidas en la metodología Vinyloop fueron caracterizadas mediante ensayo al fuego, con tres procedimientos diferentes: utilizando láminas metálicas enteras, laminas metálicas cortadas en pequeños pedazos y una muestra de láminas metálicas calcinadas. Luego las láminas metálicas pasaron a un proceso de lixiviación con 200 ml de hidróxido de sodio. Con las láminas residuales que resultaron del proceso de lixiviación, se realizó un ensayo de fusión para obtener un doré de plata.

En la aplicación de la metodología Vinyloop el solvente más eficiente fue el acetato de etilo con una eficiencia del 92,43%, mientras que la acetona presentó una eficiencia del 89,43%. Para los ensayos realizados con 25 g, se obtuvo una eficiencia del 100% con el acetato de etilo y de 82,41% con la acetona. En los ensayos realizados con 50 g, el acetato de etilo presentó una eficiencia de 85,54% y la acetona de 91,32%. Finalmente, en los ensayos realizados con 75 g, la eficiencia fue de 93,81% para el acetato de etilo y 90,55% para la acetona. Las reutilizaciones del solvente no afectaron a la eficiencia del proceso.

En el ensayo al fuego, se tomaron muestras de 8,26 g de láminas metálicas para cada prueba, obteniendo un doré de 0,105 g cuando las láminas fueron previamente calcinadas, un doré de 0,103 g cuando las láminas se colocaron en trozos pequeños y un doré de 0,074 g cuando se colocaron las láminas enteras. La composición del doré fue de 98,54% de plata y 1,46% de aluminio, cuyo resultado fue obtenido mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

El doré obtenido después de aplicar el proceso de lixiviación, fue de mayor pureza, con 99,2% de plata y 0,8% de aluminio, cuyos resultados se obtuvieron mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

Conforme al análisis de costos, la metodología propuesta permitiría extraer 91,35 g de láminas metálicas a partir de 226 discos compactos, con lo cual podría obtenerse utilizando acetona un doré de 0,57 g a \$1528,8 y un doré de 0,59 g con acetato de etilo a un costo de \$1552,4.

ABSTRACT

The present work proposes to study the recovery of metals in compact disks applying the principle of the Vinyloop methodology, followed by leaching and melting processes, for its reuse in the metallurgical industry.

In the application of the Vinyloop methodology, 2,400 ml acetone and ethyl acetate were respectively used, with it was possible to treat 226 compact discs and separate the metal sheet from the polymeric sheet of each one. For each solvent, tests were carried out with 25 g, 50 g and 75 g of compact disks cut into small pieces, each with 300 ml of solvent. The test was performed 11 times by reusing the solvent.

Part of the metallic sheets obtained in the Vinyloop methodology, were characterized by fire test, with three different procedures: using whole metal sheets, metal sheets cut into small pieces and a sample of calcined metal sheets. The other part of the metal sheets, passed to a leaching process with 200 ml of sodium hydroxide, to increase the purity of the extracted silver. With the residual sheets from the leaching process, a fusion test was carried out to obtain a silver dore.

In the application of the Vinyloop methodology, the most efficient solvent was ethyl acetate with an efficiency of 92.43% while acetone showed an efficiency of 89.43%. For the tests carried out with 25 g, an efficiency of 100% was obtained with ethyl acetate and 82.41% with acetone. In the tests carried out with 50 g, the ethyl acetate showed a total efficiency of 85.54% and the acetone obtained an efficiency of 91.32%. Finally, in the tests carried out with 75 g, the efficiency was 93.81% for ethyl acetate and 90.55% for acetone. The reuse of the solvent did not affect the efficiency of the process.

In the fire test, for each test were taken samples of 8.26 g, obtaining a dore of 0.105 g when the sheets were previously calcined, a dore of 0.103 g when the sheets were placed in small pieces and a dore of 0.074 g when the whole slices were placed. The composition of the dore was 97.43% of silver and 2.57% of aluminum. These results were obtained by atomic absorption.

The dore obtained after applying the leaching process was of greater purity, achieving a dore of 99.2% of silver and 0.8% of aluminum. These results were obtained by Scanning Electron Microscopy.

According to the analysis cost, the proposed methodology would allow to extract 91.35 g of metal sheets from 226 compact discs and obtain dore of 1.16 g at a cost of \$1528,8 with acetone and \$ 1552,4 in case of using ethyl acetate.

PRESENTACIÓN

En este trabajo se realizó un estudio de la recuperación de metales en los discos compactos, aplicando el principio fundamental de la metodología Vinyloop con el uso de acetona y acetato de etilo. Además, se realizó la lixiviación y fusión de las láminas metálicas obtenidas en la separación. Se consideran 5 capítulos que se detallan a continuación.

El primer capítulo está constituido por introducción, antecedentes, objetivo general, objetivos específicos y justificación.

El segundo capítulo contempla el marco teórico donde se aborda las generalidades de los discos compactos, así como la problemática y reciclaje de los mismos, características y propiedades del policarbonato y de los metales y características de la acetona y acetato de etilo. También, contiene información sobre la metodología Vinyloop, ensayo de lixiviación y de fusión y técnicas de caracterización de las partes de los discos compactos.

El tercer capítulo de la metodología trata sobre el desarrollo experimental utilizado en el estudio, abordando ensayos de la metodología Vinyloop, utilizando acetona y acetato de etilo como solventes orgánicos y ensayos de lixiviación y fusión. Además, se describen métodos de análisis químicos para la caracterización del material antes y después de realizar la experimentación.

El cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos y la discusión de éstos en el estudio de la recuperación de metales en discos compactos, utilizando procesos fisicoquímicos para su reutilización y evaluando dichos resultados respecto a estudios realizados por otros autores. Finalmente, presenta un análisis de costos del proyecto de investigación.

El quinto capítulo presenta las conclusiones del estudio, respondiendo a los objetivos planteados y las recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La invención del disco compacto, surge de la necesidad de buscar una solución a la impresión excesiva en papel y de poder almacenar una mayor cantidad de información de lo que la capacidad de los disquetes podían proporcionar (Planetica, 2011). Con el pasar de los años, estos dispositivos electrónicos se empezaron a fabricar con un enfoque desechable, de manera que no podían ser reutilizados para regrabar, lo que ha provocado su acumulación excesiva (Segura et al., 2007).

Las empresas y la comunidad empezaron a buscar soluciones para reciclar los discos compactos, siendo pionera la empresa Bayer, que desde 1991 ha sido precursora del reciclaje de discos compactos a escala industrial (Redacción PU, 2003). El reciclaje empezó a incrementar con el desarrollo de varias empresas con el mismo objetivo, tales como Cederika desde el año 2006 (Cederika, 2009) y Retro Cd que son las más destacadas a nivel global (RetroCD, 2018).

Sin embargo, todas las empresas recicladoras de discos compactos se enfocan en recuperar el plástico que es el componente que se encuentra en mayor proporción, un 98% aproximadamente, ya que es el recurso más accesible de aprovechar (Elías, 2012). La técnica comúnmente utilizada es mediante trituración y remoción de laca y metales por procesos químicos, y el líquido residual resultante contaminado es destinado a un gestor (Cederika, 2009).

Hasta el momento, no existe alguna empresa, entidad, organización o afines, que se enfoquen en recuperar la parte más contaminante del disco compacto que es la capa de metal, que puede ser de aluminio, titanio o plata; la cual, al momento de quedar expuesto al ambiente, se convierte en un agente tóxico para el suelo,

agua y fauna (Cortés et al., 2015). En el caso del aluminio, la acidificación del suelo hace que este metal migre con facilidad a los cuerpos de agua alcanzando aguas superficiales y subterráneas, donde los iones de aluminio reaccionan con los fosfatos y disminuyen su disponibilidad para los organismos acuáticos (Torrellas, 2012). La plata a pesar de tener baja toxicidad para los seres humanos, presenta un alto riesgo para la comunidad microbiana e invertebrados que se desarrollan en ecosistemas acuáticos y cuando ésta llega al suelo, dependiendo del estado en el que se encuentre, puede provocar cambios en el mismo, comprobándose que la presencia de nanopartículas de plata reduce la actividad enzimática (Remtavares, 2010).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la recuperación de metales en discos compactos mediante procesos físico-químicos para su reutilización en la industria metalúrgica.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los discos compactos mediante Espectrofotometría de Infrarrojo y Espectroscopia de Ruptura Inducida por Láser, para poder comparar el estado inicial y final de sus componentes.
- Recuperar los metales contenidos en el disco compacto mediante la separación del material polimérico de la lámina metálica, aplicando el principio de la metodología Vinyloop con el uso de acetato de etilo y acetona, para determinar la eficiencia de los solventes orgánicos.
- Analizar las características del material resultante, las láminas metálicas y el material polimérico; por medio de Espectrofotometría de Infrarrojo, Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X, para identificar su composición química.
- Aplicar procesos de lixiviación y fusión utilizando hidróxido de sodio y carga

fundente respectivamente para recuperar los metales contenidos en las láminas metálicas.

- Analizar los metales obtenidos por medio de Microscopía Electrónica de Barrido y Absorción Atómica, para identificar su composición química.
- Analizar la factibilidad económica de esta metodología, a través de una comparación de costos con los balances de materia y energía, para determinar su posible aplicación.

1.3 ALCANCE

El reciclaje de los discos compactos permitirá contribuir a una mejor gestión de basura electrónica que genera un impacto visual al paisaje, reducirá las emisiones de bisfenol A que genera la degradación del policarbonato en el mar (EFE, 2010), contrarrestará la acidificación del suelo, aguas superficiales y subterráneas (Torrellas, 2012) y contribuirá a compensar la actividad enzimática en ecosistemas acuáticos (Remtavares, 2010).

Su reciclaje permitirá que los metales y policarbonato estén aptos para ser usados nuevamente como materia prima. Además, el promover la recuperación de metales contenido en estos componentes electrónicos, representará un ahorro en el consumo de energía (The Economist, 2007) y en la generación de dióxido de carbono del 95%, comparado al proceso de extracción desde su fuente de origen (Das, 2010).

El presente trabajo dará una nueva alternativa a las empresas recicladoras de residuos electrónicos en el Ecuador, tales como Recimax y Vertmonde, para aprovechar no solo el policarbonato sino también los metales contenidos en el disco compacto, de manera que el aluminio, plata o titanio puedan ser integrados al sistema de gestión de residuos de cada empresa y ser reutilizados nuevamente como materia prima en favor de la comunidad y el ambiente (Recimax & Vertmonde, 2018).

1.4 JUSTIFICACIÓN

La metodología Vinyloop permite la obtención de productos reciclables de alta calidad, dándoles un nuevo valor en su vida útil. Ésta es una alternativa sustentable para el tratamiento de basura ya que evita la acumulación en rellenos sanitarios y la incineración (Vinyloop, 2013).

El principio de la metodología Vinyloop se basa en separar cualquier material adherido a un polímero haciendo uso de solventes orgánicos, es por ello que la presente investigación pretende validar dicha metodología en discos compactos para extraer las láminas metálicas adheridas al policarbonato, usando acetato de etilo y acetona (PALRAM, 2010); acompañado de procesos fisicoquímicos como la lixiviación y fusión para recuperar en un 90% aproximadamente los distintos metales existentes en ellos como aluminio, titanio, plata, entre otros, y llegar a tener eficiencias del proceso en un 80 a 100%.

La caracterización de los discos compactos se realizará de manera individual para cada componente. Para el material polimérico se utilizará el equipo PerkinElmer FT-IR/NIR Spectrometer, cuyo fundamento es la Espectrofotometría de Infrarrojo por Transformadas de Fourier, el cual tiene como ventaja la posibilidad de analizar materiales opacos y duros con superficies irregulares (Norian Corporation, 2014), mientras que para determinar los metales existentes se usará la Espectroscopia de Ruptura Inducida por Láser (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), la cual permite obtener un análisis de manera inmediata y tiene un amplio rango de elementos para su lectura.

Para realizar la separación del polímero y la lámina metálica aplicando el principio de la metodología Vinyloop, se tomará tres pesos diferentes con un mismo volumen de cada solvente, y así poder determinar con cual se podrá obtener una mayor eficiencia de separación.

Para determinar la calidad de la lámina metálica obtenida después de la

separación de la metodología Vinyloop se utilizará Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X. La Difracción de Rayos X permitirá la determinación de compuestos existentes en la lámina metálica en un breve periodo de tiempo, haciendo uso del equipo D8 Advance Bruker, para los resultados de este análisis se utilizarán los softwares EVA y TOPAS (Bruker, 2018). Para la fluorescencia de Rayos X se utilizará el equipo Bruker Q4 TASMÁN, que presenta una alta precisión elemental y un bajo tiempo de análisis (Spectro, 2011). Para evaluar la calidad final de la lámina plástica, se utilizará el equipo PerkinElmer FT-IR/NIR Spectrometer, cuyo fundamento es la Espectrofotometría de Infrarrojo por transformadas de Fourier.

Se realizará un proceso de lixiviación con hidróxido de sodio de las láminas metálicas para separar los metales; las soluciones obtenidas en el proceso se analizarán por Espectrometría de Absorción Atómica con el equipo PerkinElmer Aanalyst 300. Después, se realizará un proceso de fusión con las láminas resultantes de la lixiviación. Dentro de la fusión, se va a obtener un doré que se analizará por Microscopía Electrónica de Barrido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 DISCOS COMPACTOS

Un disco compacto es un objeto digital circular que se usa para guardar cualquier tipo de información como fotografías, documentos, videos y audios (Universia, 2012). También se llama disco láser, disco óptico o CD (compact disc) por sus siglas en inglés; tiene una capacidad de almacenamiento de 650 MB o 700 MB, y se basa en la norma ISO 9660, la misma que establece un formato estándar para conocer las estructuras de volumen y archivos de los discos compactos, en especial para los discos que solo son de lectura (IBM Knowledge Center, s.f), estableciendo así una forma que le permite ser compatible con diferentes sistemas operativos existentes en el mercado (Hermida et al., 2014).

La composición de los discos compactos suele variar en función de su capacidad de almacenamiento o de su uso, sin embargo, existe una composición base de todos los discos compactos (Casas, 2013), que se detalla a continuación:

Plástico

El disco compacto está compuesto en un 98% (Elías et al., 2012) por una capa gruesa de policarbonato de 1.2 milímetros (Casas, 2013) y un peso de 15 gramos (Elías et al., 2012) el cual, al ser un termoplástico resistente, sirve de soporte al disco compacto. Además, el elevado índice de refracción del policarbonato (Quiminet, 2006) le permite tener una calidad óptica elevada para el lector láser (Terra, 2005). En el caso de los discos compactos pregrabados, es en el policarbonato donde se aloja la información.

Capa reflectante de metal

Sobre los 15 gramos de policarbonato (Elías et al., 2012) se coloca una capa reflectante de metal, la cual puede ser aluminio o titanio en la mayoría de casos, que servirá para reflejar la luz láser y obtener una mayor durabilidad de los datos (Noticias de Taiwán, 2003). Para los discos compactos grabables o regrabables, la capa metalizada está compuesta de plata, ya que este metal, por sus propiedades, permite una mayor reflexión para atravesar las capas donde se encuentra la información (Terra, 2005).

Capa de laca

Para evitar que la capa metalizada se deteriore o que el disco compacto pierda su pigmento metalizado debido a la exposición a los rayos ultravioletas, se coloca una capa de laca o barniz (Terra, 2005).

Colorantes

Los discos compactos grabables o regrabables, requieren de colorantes adicionados a la capa gruesa de policarbonato para poder codificar la información. Para ello, las industrias disqueras más grandes han recurrido a algunos colorantes como la cianina (azul) por su alta sensibilidad a los rayos ultravioleta, a la oftalocianina de color verde por su estabilidad o el metal-azo con excelentes resultados, pero a un costo elevado (Terra, 2005).

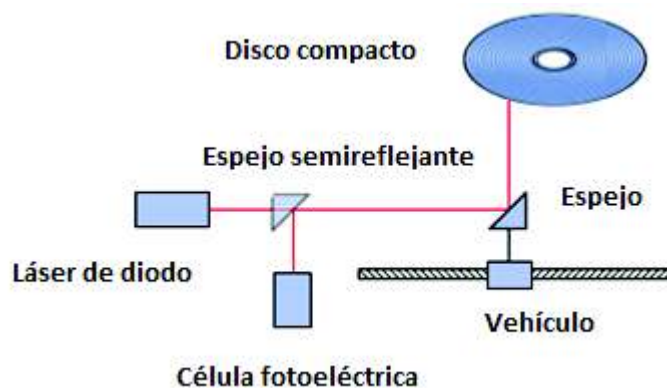
Para su funcionamiento, se graban muescas microscópicas en el recubrimiento metálico con la ayuda de un rayo láser de alta precisión, estas muescas forman secuencias que se pueden leer con equipos reproductores de discos compactos (Nucleotécnico1, 2013).

La información del disco compacto se puede leer en un reproductor o cabezal de lectura que tiene un diodo láser, lentes y espejos de alta precisión. El láser

proyecta un haz luminoso fino que atraviesa el divisor de rayo y rebota en el espejo para luego pasar por el lente hasta llegar a la pista del disco en rotación. La cara interna del disco está formada por muescas minúsculas separadas por zonas lisas formando un camino en espiral, la zona que contiene muescas produce una dispersión de luz diferente de las que no la tienen. La luz es captada por células fotosensibles que envían la señal al fotodetector, transmitiendo un impulso electromagnético hasta un microprocesador, que es el encargado de convertir la secuencia binaria en sonidos e imágenes como se muestra en la Figura 1 (CCM, 2018).

FIGURA 1.

ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISCO COMPACTO



FUENTE: CCM, 2018

2.1.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DEL DISCO COMPACTO

Como se muestra en la Figura 2, el proceso comienza con la elaboración de un disco máster. Este es un disco de cristal de 120 mm de diámetro sobre el cual se graba la información deseada, para después poder transferir los datos a los discos compactos de policarbonato (Bitcoin, 2008).

Para dar inicio a la elaboración del disco máster, primero se graba la información seleccionada sobre una fina lámina de cristal utilizando un rayo láser de escritura. Una vez transferida la información se aplican dos productos químicos: una

imprimación y una capa resistente a la luz. Para que se sequen los químicos aplicados, el disco es ubicado en un horno durante 30 minutos. Después, el disco pasa a un revelador que contiene dos chorros, el uno coloca agua desionizada y el otro pulveriza una solución para revelar los datos impresos en el cristal. De esta manera la información queda grabada en el disco (Noticias de Taiwán, 2003).

La siguiente etapa consiste en colocar una fina capa de metal de níquel y vanadio y sumergir el cristal en una solución química durante 70 minutos. El cristal se extrae para darle la forma que se necesita y los restos son dispuestos en un área específica para reciclaje. Una vez con la forma, el disco máster es transferido al departamento de prensado (Terra, 2005).

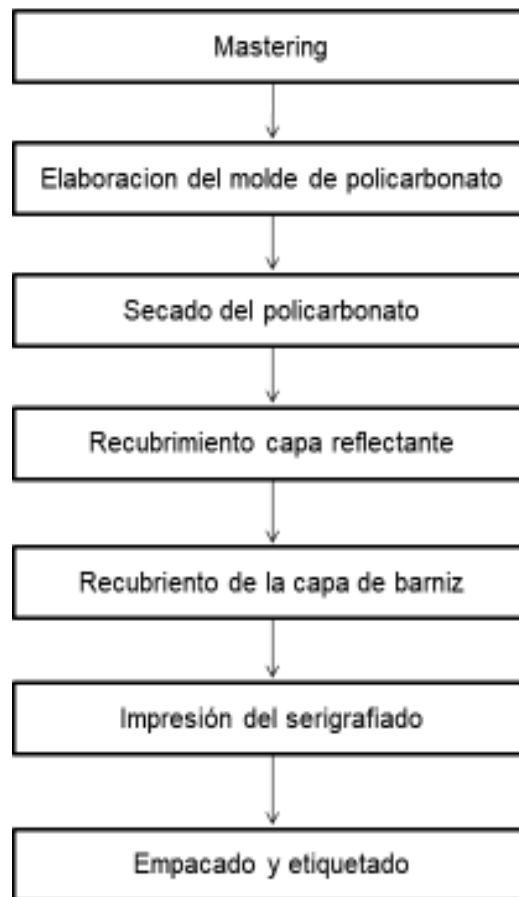
En el departamento de prensado, se dispone el disco master en el molde, con el previo chequeo visual y se procede a inyectar policarbonato líquido donde tomará la forma circular del prototipo. Se deja enfriar durante aproximadamente 20 minutos y se extrae el disco transparente y rígido (Terra, 2005). Después el disco es recubierto de una capa reflectante de metal, seguido de la aplicación de una capa de barniz, para proteger el metal y facilitar el pegado del diseño serigrafiado (Bitcoin, 2008).

En el caso de los discos compactos grabables y regrabables, el procedimiento es similar. Se elaboran los discos compactos en moldes circulares con el policarbonato líquido, se deja enfriar durante 20 minutos y se coloca sobre el molde de policarbonato sólido un colorante que servirá para grabar la información (Terra, 2005). Por último, se adiciona la laca y la capa de titanio, aluminio o plata y se prensa el diseño serigrafiado (Noticias de Taiwán, 2003).

Es importante destacar que la producción de discos compactos se debe realizar en cuartos blancos completamente limpios, sin presencia de polvo, ya que cualquier interferencia puede afectar a la funcionalidad del mismo (Bitcoin, 2008).

FIGURA 2.

ESQUEMA DE LA ELABORACIÓN DEL DISCO COMPACTO



FUENTE: Bitcoin, 2008

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS

2.1.2.1 CD-R (Compact Disc Recordable)

Es un disco compacto grabable en el cual se puede guardar información una sola vez y los datos almacenados no se pueden eliminar (García, 2006). Además, este disco puede ser leído por cualquier programa o dispositivo convencional y presenta la ventaja de guardar la información sin poseer un gran conocimiento en el campo de la informática (Abadal, 2001). Un ejemplo de estos discos compactos es el Blu Ray, el cual es un disco óptico que se parece externamente a un DVD,

pero tiene una mayor capacidad de almacenamiento que puede llegar hasta 200 GB (UNED, 2008).

2.1.2.2 CD-RW (Compact Disc Rewritable)

Es un disco compacto regrabable de lectura y escritura, es decir, en éste se puede guardar información varias veces gracias a que los datos ya almacenados anteriormente pueden ser eliminados (Hermida, 2014).

2.1.2.3 CD-ROM (Compact Disc Read-Only Memory)

Es un disco compacto ya grabado, en el cual los datos no se pueden ni editar ni eliminar. Tiene una capacidad de almacenamiento de 640 megabytes y se los utiliza para archivos multimedia y programas de computación, entre otros (Electrónica y Servicio, 2014).

2.1.3 PROBLEMÁTICA DE LOS DISCOS COMPACTOS

En principio, la creación de discos compactos resultaba ser una solución para el consumo excesivo de papel por la cantidad de información que permite almacenar (Planetica, 2011). Sin embargo, en la actualidad es un problema ambiental, ya que al momento de quedar obsoletos son desechados sin seguir una buena disposición final, acumulándose a nivel mundial aproximadamente 350.000 toneladas anuales en vertederos de basura (Elías, 2012).

En el caso de la parte plástica del disco compacto, el policarbonato, cuando se degrada en presencia de un medio acuático, genera emisiones de bisfenol A que puede alterar el sistema endócrino de los organismos acuáticos (EFE, 2010). Además, la capa reflectante del disco compacto está compuesta de metales como plata, titanio o aluminio (Noticias de Taiwán, 2003), los cuales cuando quedan expuestos al ambiente se convierten en un agente tóxico para el suelo, agua y fauna. Aunque no se han detectado efectos negativos para el ambiente en el caso del titanio; la plata y el aluminio sí resultan nocivos. La plata por ejemplo presenta

un alto riesgo para la comunidad microbiana e invertebrados ya que su presencia de nanopartículas reduce la actividad enzimática (Remtavares, 2010). Por otro lado, los iones de aluminio cuando se encuentran en medios acuáticos reaccionan con los fosfatos existentes y disminuye su disponibilidad para los organismos (Torrellas, 2012).

2.1.4 PROCESO DE RECICLAJE DE LOS DISCOS COMPACTOS

El reciclaje de los discos compactos presenta los siguientes pasos (Cederika, 2009):

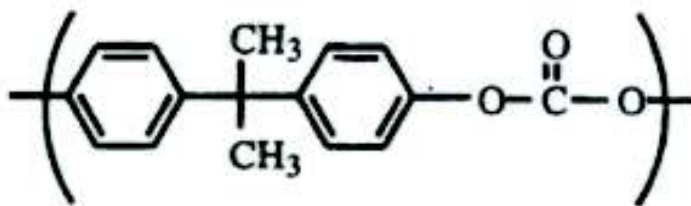
- Selección y recolección: en esta etapa se recolectan los discos compactos en desuso y si es están dentro de estuches se los separa.
- Tratamiento: los discos compactos se someten a un proceso de separación de la lámina metálica, la laca y el policarbonato, a través de procesos físicos y químicos.
- Separación: los componentes que no pueden ser tratados, son destinados a un gestor autorizado.
- Finalización: los componentes que pueden ser reutilizados como el policarbonato pasan por procesos de limpieza y granceado, el mismo que consiste en cortar el plástico con una cuchilla giratoria dando como resultado un grano de plástico reciclado. De esta manera se obtiene una materia prima lista para ser empleada en otros procesos.

2.2 POLICARBONATO

El policarbonato es un poliéster de ácido carbónico (Seymour et al., 2002), cuya unidad de repetición se muestra en la Figura 3.

FIGURA 3.

UNIDAD DE REPETICIÓN DEL PC

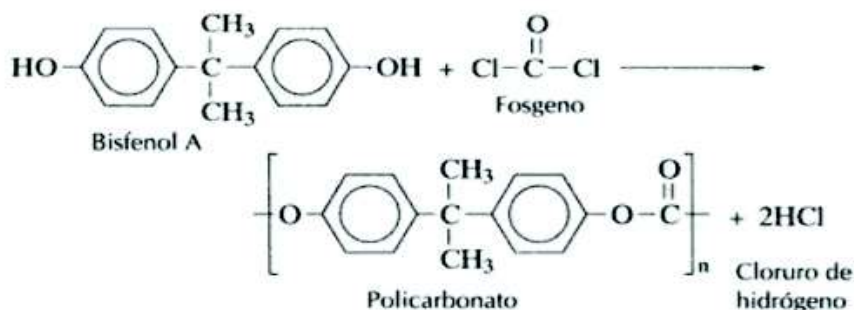


FUENTE: Seymour et al, 2002

Este polímero se obtiene a partir de la reacción del fosgeno con el bisfenol A (Figura 4), aunque también es posible obtener policarbonato por intercambio de ésteres entre el carbonato de difenilo y el bisfenol A.

FIGURA 4.

REACCIÓN QUÍMICA DE FORMACIÓN DEL PC



FUENTE: Seymour et al, 2002

2.2.1 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL POLICARBONATO

El policarbonato es un termoplástico cristalino, amorfo, muy versátil, autoextinguible y reciclable (Kalpakjian, et al., 2002). Presenta propiedades eléctricas y mecánicas como una buena resistencia a la termofluencia, una alta tenacidad y estabilidad de oxidación y una baja absorción de humedad. Es muy resistente al calor ya que soporta temperaturas cercanas a los 125°C y su punto de ebullición es a los 230°C (Groover, 1997).

Ante un impacto es resistente, no solo por su rigidez sino también por su flexibilidad (Landscapeforms, 2011). Por otro lado, es un plástico que puede reemplazar al vidrio por ser transparente, puede soportar variables climáticas extremas, lo que hace que sea utilizado en aplicaciones a la intemperie y en interiores (Ferplast, 2018).

2.2.2 APLICACIONES DEL POLICARBONATO

El policarbonato se usa en (Ferplast, 2018 & Groover, 1997 & Kalpakjian, et al., 2002 & Seymour et al., 2002):

- Equipos de protección y seguridad: cascos y gafas.
- Cubiertas y claraboyas.
- Elementos publicitarios: portaprecios, portafotos, peanas con impresión, grabados, vending, dispensadorés de folletos, carteles, displays.
- Moldes y protecciones para maquinaria.
- Equipos de procesamiento de alimentos.
- Componentes eléctricos.
- Componentes de oficina.
- Rotulación.
- Protección para pantallas.
- Termoconformados.
- Urnas pequeñas y grandes.
- Vitrinas y armarios a escala para diferentes modelos de automóviles, barcos, trenes y artículos de coleccionismo en general.
- Aislamiento acústico con paneles de diferentes formatos y antivandálicos.
- Acristalamientos de seguridad: mamparas para centros comerciales, colegios, gimnasios, zonas de paso, aeropuertos.
- Protecciones anti choque.
- Paredes divisorias, acristalamientos.
- Letras para rotulación, protecciones neón.

- Laterales de pistas deportivas.
- Protecciones industriales.
- Parabrisas y accesorios para náutica.
- Muebles y decoración: estanterías, soportes para mesas, esculturas.
- Construcción: cubiertas, fachadas, balcones.
- Mobiliario urbano, cabinas telefónicas.
- Colectores solares.
- Dispositivos ópticos: discos compactos.
- Aparatos médicos.

2.2.3 RECICLAJE DEL POLICARBONATO

Según los datos proporcionados por Interpresas, se registró en Duisburg, Alemania, que en el año 2003 se reciclaban 1400 millones de discos compactos anuales, lo que representa aproximadamente 2000 toneladas de policarbonato (Redacción Pu, 2003).

Las prácticas de reciclaje del policarbonato existentes más utilizadas hasta el momento son trituración y despolimerización por metanólisis.

2.2.3.1 TRITURACIÓN

La empresa Bayer es el mayor fabricante y reciclador de policarbonato, donde el proceso de reciclado se realiza mediante trituración. Esta técnica permite reciclar hasta 13 gramos de policarbonato por cada disco compacto (Redacción Pu, 2003).

El proceso inicia con la clasificación entre los policarbonatos que poseen una capa metalizada y los que no, ya que los que poseen el recubrimiento de metal siguen un proceso con productos químicos alcalinos vía húmeda. Para ello se procede a una trituración seguida de un lavado de los trozos. El lavado se realiza en presencia de agentes emulsionantes que favorecen junto con la agitación, la

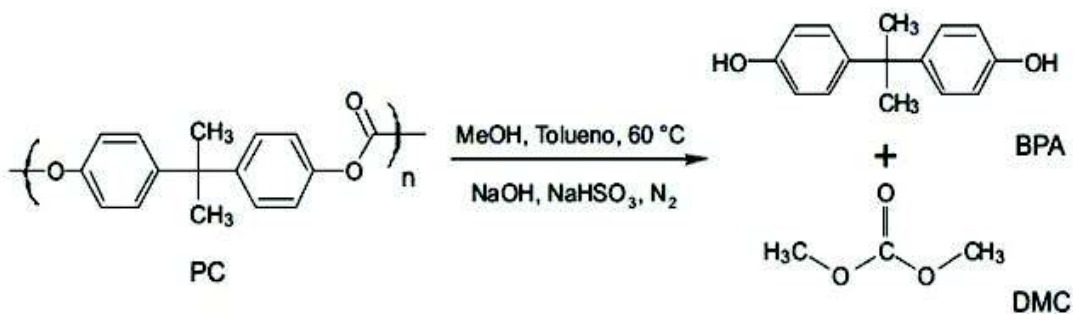
remoción de las capas de metal y laca que se encuentren adheridas al policarbonato (Elías et al., 2012). Esta capa metalizada precipita y es posible extraer las láminas de policarbonato para ser limpiadas y secadas para su disponibilidad como materia prima (Márquez et. al., 2010).

2.2.3.2 DESPOLIMERIZACIÓN POR METANÓLISIS

Esta metodología permite a partir de los desechos de policarbonato generar monómeros para fabricar nuevos polímeros (Suasnavas, 2017). Como se muestra en la Figura 5, el procedimiento consiste en degradar el policarbonato a altas presiones y temperatura ambiente en presencia de tolueno, etanol, etilenglicol o propilenglicol, haciendo uso de catalizadores como el carbonato de sodio o el hidróxido de sodio. Con esta metodología se han obtenido eficiencias mayores a 95% (Elgegrena et al, 2012).

FIGURA 5.

DESPOLIMERIZACIÓN DEL PC POR METANÓLISIS



FUENTE: Elgegrena, 2012

2.3 METALES

2.3.1 ALUMINIO

El aluminio es un metal de la tabla periódica que pertenece al grupo del Boro, bloque p, de número atómico 13. Su masa atómica es de 26.99 g/mol y su simbología Al. Éste es uno de los elementos que se encuentra disponible en gran

abundancia en la corteza terrestre a diferencia del resto de elementos del grupo (Grosvenor, 1976). Es buen conductor de calor y tiene una buena conductividad eléctrica cuando tiene una pureza de 99,5%. Se puede fusionar con otros metales y formar aleaciones; al ser un metal ligero, es resistente a la tracción lo que hace que tenga una facilidad para conformarse por laminado y estirado, a pesar de su baja resistencia mecánica. Su densidad es de $2,70 \text{ g/cm}^3$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, la misma que es relativamente baja comparada con otros metales. También es muy reactivo y electropositivo. Su punto de fusión es de $660,32^\circ\text{C}$ y el de ebullición es de 2519°C (De la Llata, 2001).

Por todas estas características, el aluminio se puede emplear en arquitectura, electrotécnica, empaquetaduras, material de construcción, aparatos electrodomésticos, industria alimenticia, líneas aéreas, mecanismos acuáticos, papeles decorativos, juguetes, material de vidrio y material refractario, entre otros (Elías, 2012 & Senner, 1994).

En la extracción del aluminio se emiten 12 kg de CO_2 y se utiliza aproximadamente 45 kWh de energía; mientras que en el proceso de reciclaje se emiten apenas 0.6 kg de CO_2 y se requiere 2.8 kWh de energía, lo que representa una disminución del 95% en cuanto a demanda de energía y emisión de dióxido de carbono (Das, 2010).

2.3.2 PLATA

La plata es un elemento químico que pertenece al grupo de los metales nobles, del grupo IB, que se caracterizan por tener puntos de fusión elevados, ser brillantes, resistentes a la corrosión y ser muy buenos conductores del calor y electricidad. La plata representada por el símbolo Ag, posee un número atómico 47 y un peso atómico de 107,87 gramos. Ésta puede ser atacada mediante ácidos que sean agentes oxidantes como el ácido nítrico o el ácido sulfúrico concentrado a una temperatura elevada (Grosvenor, 1976).

La plata a nivel comercial es conocida como un metal precioso y valuable debido a su escasez en la corteza terrestre. Éste se encuentra en el ambiente adherido a minerales o de manera libre (Lenntech, 2018).

Sin embargo, un gran problema que posee la obtención de este metal es la contaminación que genera su extracción. La minería no solo provoca alteraciones del paisaje (Morán, 2013), sino que la falta de tecnología genera que se utilicen técnicas muy contaminantes para la obtención de este metal, como lo son el uso de mercurio, cianuro o ácido sulfúrico, sustancias que afectan a la salud y ambiente. Por ejemplo, el cianuro cuando es absorbido por las raíces y piel, afecta al proceso de fotosíntesis y causa efectos letales (Grosvenor, 1976).

Al momento de realizar la extracción del metal, en muchas ocasiones es necesario realizar infraestructuras y carreteras que alteran el cauce de los ríos provocando sequías e inundaciones, lo que afecta muchas veces a la agricultura de la zona, arruina ecosistemas y zonas de tipo turístico (Morán, 2013)

Otra de las afectaciones que genera la explotación de plata, es que en ocasiones su extracción es a cielo abierto, que provoca emisiones de polvo y generación de ruido que afecta no solo al personal de trabajo en su salud, sino también a las aldeas aledañas a la zona (Morán, 2013)

2.3.3 TITANIO

El titanio es el cuarto metal estructural más abundante en la superficie terrestre y el noveno en metales industriales. Se encuentra en forma de óxidos generalmente en rocas ígneas, cenizas de animales y plantas, y en muchos minerales que contienen hierro (Castro, 2012). Las formas en las que se puede encontrar el titanio son: rutilo, anatasa, ilmenita y brookita (Bermejo, 2018). El titanio refleja casi todo tipo de luz hasta la ultravioleta y la luz que no puede reflejar es absorbida. Es un metal ligero de color gris plata, resiste a la corrosión cuando se expone a temperaturas elevadas, no es buen conductor de electricidad y calor, es

dúctil, duro y resistente a la tracción. Presenta solubilidad en ácido fluorhídrico y sulfúrico (Castro, 2012).

Por estas características, a pesar de ser costoso se lo utiliza en diferentes industrias como aeronáutica, petroquímica médica, automovilística, agroindustrial, fundición, soldadura, química, militar y en la fabricación de pintura, papel y caucho (Castro, 2012).

El titanio puede formar aleaciones ligeras y resistentes con hierro, aluminio, molibdeno, vanadio o manganeso y así mejorar sus propiedades de resistencia y endurecimiento. Cuando se realizan dichas aleaciones se debe tener mucho cuidado con las variaciones de los elementos aleantes y los residuales, con el fin de evitar problemas de contaminación superficial por nitrógeno, oxígeno o hidrógeno durante el procesamiento, ya que estos elementos son los causantes de que el titanio resulte frágil (Kalpakjian et al., 2002).

En el campo ambiental, el óxido de titanio es el fotocatalizador más utilizado en la actualidad para realizar procesos de fotocatálisis. Varios estudios han demostrado que este compuesto reduce en parte los contaminantes contenidos en el aire que sobrepasan los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Bermejo, 2018). Además, se emplea en la descontaminación de agua, logrando la eliminación de contaminantes en un solo proceso, destruye sustancias tóxicas y mezclas complejas como bifenilos policlorados (PCBs), colorantes, pesticidas, etc (Garcés, et al., 2015).

La extracción del mineral de titanio que se encuentra en depósitos arenosos es expuesta a procesos de agitación con agua, utilizando maquinaria pesada. Luego la mezcla pasa a una planta espiral para que un molino húmedo separe las partículas negras y sólo quede el mineral que va a ser purificado en un molino seco y poder obtener ilmenita. El rutilo e ilmenita tienen una pureza máxima de 60%, es por ello que la obtención de titanio metálico se logra gracias al proceso Kroll (Gae, 2015). Este proceso tiene diferentes operaciones unitarias como la

cloración, destilación, reducción y purificación para llegar a obtener un titanio esponjoso. Sin embargo, este proceso presenta un elevado costo y un alto impacto ambiental en ecosistemas acuáticos y terrestres. Además, la extracción genera más emisiones de CO₂ y mayor gasto energético en comparación a la producción de acero inoxidable (Bolzoni, et al., 2011).

Por otra parte, la extracción del titanio en forma de rutilo (TiO₂) para ser utilizado como pigmento, genera residuos tóxicos y peligrosos debido a la fundición del titanio y los químicos como cloro o ácido sulfúrico que se coloca en la escoria (Sinc, 2008).

2.4 MÉTODOS DE ENSAYO

2.4.1 METODOLOGÍA VINYLOOP

Vinyloop es una tecnología que permite reciclar el plástico difícil de tratar como el policloruro de vinilo (PVC), dando como resultado plástico reciclado completamente virgen. Esta metodología eficiente, separa el plástico de otros materiales como pueden ser metales, lacas, textiles naturales, fibras de poliéster, caucho u otros plásticos (Vinyloop, 2013).

Se basa en el uso de un disolvente biodegradable del plástico acompañado de la disolución y filtración con el fin de eliminar los elementos contaminantes y tener como resultado un compuesto plástico, siendo el más común el PVC reciclado (R-PVC), el cual tiene una alta calidad y pureza, llegando a ser similar a los compuestos vírgenes (Vinyloop, 2013).

Además de ser una tecnología innovadora, se preocupa por la parte ambiental ya que Vinyloop logra reducir el calentamiento global en un 40%, la demanda de energía primaria en un 47% y se asegura que el reciclaje sea un proceso que evita la incineración de desechos plásticos valiosos o que se depositen en vertederos (Vinyloop, 2013).

2.4.2 CRITERIOS DE SOLUBILIDAD DE POLÍMEROS

Un polímero puede disolverse en presencia de determinados solventes debido a sus fuerzas intermoleculares (González, 1997). Cuando estas fuerzas intermoleculares son fuertes por la existencia de enlaces reticulados, de cristalinidad o enlaces fuertes de hidrógeno; se da una primera fase en la que el disolvente al entrar en contacto con el polímero se difunde dentro de éste y lo transforma en un gel hinchado. Pero cuando la interacción disolvente-polímero logra superar las fuerzas intermoleculares del polímero, la disolución entra en una segunda fase y el gel hinchado comienza a desintegrarse. Este proceso se da de manera ralentizada, pudiendo tardar días o incluso semanas (Billmeyer, 1978).

La hinchazón del polímero dependerá del grado de reticulación del mismo y del tiempo que se encuentren en contacto el polímero y el disolvente: a mayor tiempo de contacto existirá una mayor hinchazón (Billmeyer, 1978), y polímeros más reticulados (entrecruzado covalentemente) tendrán una menor hinchazón (González, 1997).

Existen algunos factores que inciden en la disolución del polímero, uno de ellos es la temperatura. A mayor temperatura, la disolución se da de manera más efectiva. Otro factor incidente es el peso molecular del polímero, mientras mayor sea el peso molecular del polímero, más tardará la disolución. También influirá la naturaleza del disolvente y la tipología del polímero (Billmeyer, 1978). Por ejemplo, cuando se trata de polímeros reticulados no se suelen disolver, únicamente llegan hasta la primera fase que es donde se forma un gel hinchado (González, 1997).

En la Tabla 1 se muestra la lista de solventes frente a los cuales el policarbonato no presenta resistencia a temperatura ambiente.

TABLA 1.**DISOLVENTES DEL POLICARBONATO A TEMPERATURA AMBIENTE**

Nro.	SOLVENTE	Nro.	SOLVENTE
1	Acetaldehído	34	Disulfuro de carbono
2	Acetato de amilo	35	Éter dietílico
3	Acetato de butilo	36	Etilamina
4	Acetato de etilo	37	Etileno clorhidrina
5	Acetona	38	Fenol
6	Ácido benzoico	39	Fluoruro de amonio
7	Ácido butírico	40	Gas de cloro
8	Ácido carbónico	41	Gasolina
9	Ácido perclórico	42	Hidrazina
10	Ácido propiónico	43	Hidróxido de amonio
11	Ácido sulfúrico	44	Hidróxido de potasio
12	Acrilonitrilo	45	Hidróxido de sodio
13	Alcohol de bencilo	46	Mercurio
14	Amoniaco	47	Metacrilato de metilo
15	Benceno	48	Metil etil cetona
16	Benzaldehído	49	Metil celulosa
17	Bisulfito de carbono	50	Níquel sulfato
18	Bromo	51	Piridina
19	Bromo benceno	52	Estireno
20	Bromuro de etilo	53	Sulfuro de amonio
21	Cianuro de potasio	54	Sulfuro de sodio
22	Ciclohexanona	55	Terpineol
23	Clorobenceno	56	Tetracloruro de carbono
24	Cloroformo	57	Tetralin
25	Cloruro de etileno	58	Tetrahidrofurano
26	Cloruro de mercurio	59	Tiofeno
27	Cloruro de metileno	60	Tolueno
28	Cloruro de sulfurilo	61	Tricloroetileno
29	Diamilo de falato	62	Tricloruro fosforoso
30	Dicloruro de etileno	63	Tricloro etilamina

FUENTE: PALRAM, 2010

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

TABLA 1.**DISOLVENTES DEL POLICARBONATO A TEMPERATURA AMBIENTE
(CONTINUACION)**

Nro.	SOLVENTE	Nro.	SOLVENTE
31	Dimetil formaldehído	64	Tricresil fosfato
32	Dimetilsulfóxido	65	Xileno
33	Dioxano	66	Yodo

FUENTE: PALRAM, 2010

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

2.4.3 SOLVENTES ORGÁNICOS

Los solventes orgánicos son compuestos químicos volátiles que se emplean para disolver, diluir, separar y extraer materias primas y residuales (Gadea, et al., 2008). También se los utiliza como agentes de limpieza y tensoactivos, conservantes y portadores de sustancias. Los solventes más utilizados son los orgánicos líquidos, aunque también se los puede encontrar en estado gaseoso. En la Tabla 2 se observa su clasificación en familias tomando en cuenta el grupo químico al que pertenecen.

TABLA 2.**CLASIFICACIÓN DE LOS SOLVENTES ORGÁNICOS EN FAMILIAS.**

	FAMILIA	EJEMPLOS
Orgánicos	Hidrocarburos aromáticos	Benceno, tolueno, xilenos, cumeno, etilbenceno
	Hidrocarburos alifáticos	Pentano, hexano, heptano
	Hidrocarburos alicíclicos	Ciclohexano, metilciclohexano, terpenos, pinenos
	Hidrocarburos halogenados	Tricloroetileno, percloroetileno, tetracloruro de carbono

FUENTE: Gadea, et al., 2008

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

TABLA 2.

CLASIFICACIÓN DE LOS SOLVENTES ORGÁNICOS EN FAMILIAS (CONTINUACIÓN).

	FAMILIA	EJEMPLOS
Orgánicos	Alcoholes	Metanol, etanol, isopropanol
	Glicoles	Etilenglicol, propilenglicol, dietilenglicol
	Cetonas	Acetona, metiletilcetona
	Ésteres	Acetato de etilo, acetato de metilo, acetato de isopropilo
	Ésteres de ácido grasos	Ésteres de aceite de coco, ésteres de aceite de colza
	Éteres	Éter etílico, tetrahidrofurano, isopropil éter, dioxano
	Éteres de glicol	Éter monoetílico de etilenglicol, éter monometílico de etilenglicol
	Terpenos	α -pineno, limoneno
	Ácidos orgánicos	Ácido acético, ácido oxálico
	Otros	Disulfuro de carbono, óxido de estireno
	Mezclas complejas	Disolvente Stoddard, gasolina, White spirit, naftas

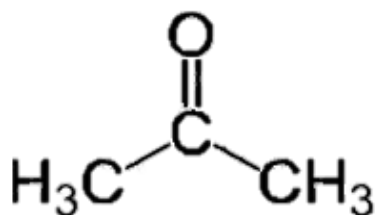
FUENTE: Gadea, et al., 2008

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

2.4.4 ACETONA

La acetona, con fórmula química C_3H_6O (Winkler, 2007) como se muestra en la Figura 6, es también conocida como Dimetil Cetona, 2-Propanona, Dimetil Formaldehído, Cetona Propano y Éter P. Ésta pertenece al grupo más sencillo de las cetonas y al más importante de las alifáticas (Weissermel et al., 1981). La acetona es un disolvente químico con peso molecular de 58.08 g/mol, incoloro y con un olor distintivo dulce y aromático. Es altamente volátil, por lo que se evapora fácilmente a temperatura ambiente, con un punto de ebullición de 56.2°C (Winkler, 2007).

FIGURA 6.
FÓRMULA QUÍMICA DE LA ACETONA



FUENTE: Winkler, 2007

Se encuentra en el ambiente de manera natural en árboles, plantas, gases volcánicos e incendios forestales (ATSDR, 2016). Debido a sus múltiples usos a nivel comercial en la fabricación de plásticos quitaesmaltes, industria textil y barnices; se ha recurrido a su elaboración a nivel industrial (Chemical Safety Facts, 2018).

A través de tres procesos importantes es posible obtener acetona: el método de Wacker-Hoechst, que consiste en la oxidación directa del propeno; mediante deshidrogenación de isopropanol o a través del método según Hock, como coproducción en el proceso de obtención del fenol (Weissermel et al., 1981).

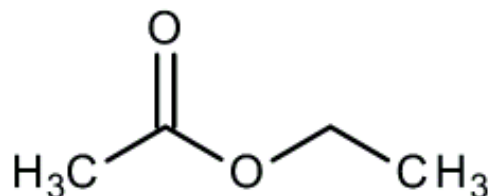
2.4.5 ACETATO DE ETILO

El acetato de etilo es un éster incoloro e inflamable con un olor característico a frutas, su fórmula general es $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ como se indica en la Figura 7, conocido también como etanoato de etilo. Su temperatura de fusión es de -83°C , de ebullición de 77°C y su masa molar es de 88,10 g/mol (UNAM, 2016). Presenta poca solubilidad en agua, éter y cloroformo (Petroquímica, 2009). Este éster tiene diferentes usos como solvente de tintas, pegamentos, lacas y barnices, removedor de pinturas y de sustancias resinosas en la industria del caucho, además se utiliza en la elaboración de papel y en la industria textil (Quiminet, 2012).

Se obtiene por esterificación directa del ácido acético con alcohol etílico, con ayuda de un catalizador que puede ser ácido sulfúrico o clorhídrico, dando como resultado un éster crudo que se neutraliza y purifica por medio del proceso de destilación (Quiminet, 2012).

FIGURA 7.

FÓRMULA QUÍMICA DEL ACETATO DE ETILO



FUENTE: Quiminet, 2012

2.5 ENSAYO DE FUSIÓN

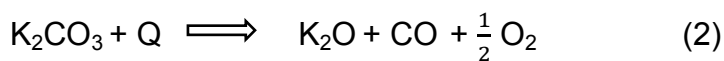
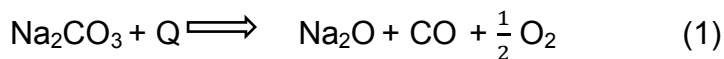
El ensayo de fusión es una metodología utilizada para determinar el contenido de oro y plata en minerales (Rosado, 2017). Éste consiste en producir una fusión entre el mineral y una carga fundente para obtener un doré, que es una aleación de oro y plata (Pimichumo, 2016).

Para preparar la muestra es necesario tomar entre 20-30 gramos de mineral pulverizado y adicionarle la carga fundente. Los fundentes ácidos más utilizados son sílice y bórax, mientras que los fundentes básicos son bicarbonato de sodio y nitrato de potasio. Al fundente es necesario agregarle un metal que posea la capacidad de atrapar metales preciosos, el más utilizado es el plomo como litargirio; y una fuente que actúe como reductor, que puede ser carbono, harina de trigo o almidón (Toapanta, 2011).

Esta mezcla es ingresada al horno a una temperatura entre los 900 y 1000 °C, durante 60 minutos para su fundición. Una vez transcurrido este tiempo, se coloca

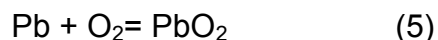
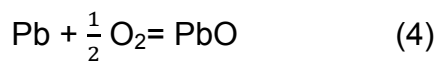
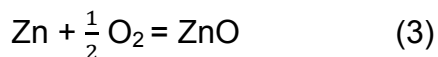
la mezcla en una lingotera, donde debido a la diferencia de densidades entre el plomo y la escoria, el plomo se depositará con los metales en la parte baja. Se deja enfriar la muestra para poder separar la escoria de la parte metálica (Pimichumo, 2016). La parte metálica se somete a un proceso de copelación para remover el plomo de la muestra, la cual consiste en colocar la muestra metálica en una copela e ingresarla en un horno a 900°C durante 45 minutos. Las copelas pueden atrapar hasta un 98,5% del plomo y el 1,5% se elimina en forma de gas (Rosado, 2017).

Durante la fundición se presentan dos etapas: una oxidación y una reducción. La oxidación surge debido al calor donde los fundentes oxidantes se descomponen, como se muestra en las ecuaciones 1 y 2. Los fundentes más utilizados son el carbonato de sodio o el carbonato de potasio (Pimichumo, 2016):

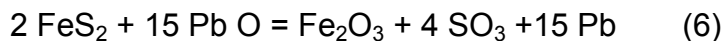


Donde Q representa el calor de reacción.

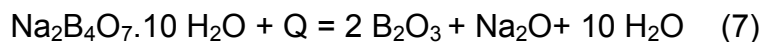
Con el oxígeno formado se da la descomposición de los fundentes oxidantes y se oxidan los metales base que se encuentran como impurezas en la carga, como se expresan en las ecuaciones 3,4 y 5 (Pimichumo, 2016):



A continuación, se da la reducción. En esta etapa los óxidos de metales reaccionan con los compuestos sulfurados como la pirita, la arsenopirita, la calcopirita, la calcosita, la galena, la blenda y otros, los cuales reducen al litargirio en plomo metálico como se indica en la ecuación 6 (Pimichumo, 2016):



Finalmente, se forman los boratos y silicatos en la escoria, a partir de la reacción del bórax y sílice con los óxidos de metales formados, como se muestra en la ecuación 7, 8 y 9 (Pimichumo, 2016), donde Me es el metal.



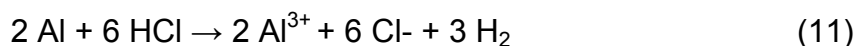
2.6 ENSAYO DE LIXIVIACIÓN

Desde el punto de vista de la metalurgia, la lixiviación es un proceso donde se disuelve un elemento contenido en un mineral mediante solventes ácidos, básicos o neutros para ser recuperado posteriormente. Para ello surgen dos etapas. La primera que consiste en una humectación de los sólidos y una segunda en donde las partículas de mineral se dispersan en la solución y se disuelven los metales de interés (Villar, 2009).

Para optimizar la disolución, es necesario tomar en cuenta la temperatura de la reacción, el pH y el potencial de oxidación (Villar, 2009).

En el caso de la plata, la lixiviación más común es posible conseguirla con ácido clorhídrico para formar cloruro de plata, con ácido nítrico para formar nitrato de plata o con cianuro para formar un cianuro de plata.

El aluminio por otro lado, se disuelve fácilmente con ácido clorhídrico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, como se indican en las ecuaciones 10, 11 y 12.



2.7 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTES DE LOS DISCOS COMPACTOS.

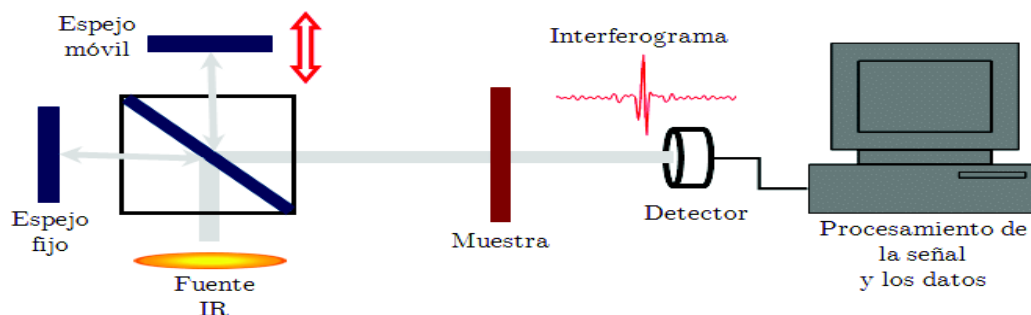
2.7.1 ESPECTROFOTOMETRÍA DE INFRARROJO POR TRANSFORMADAS DE FOURIER (FTIR)

Este método proporciona un espectro de reflexión de las bandas de grupos funcionales de sustancias orgánicas como inorgánicas, lo que ayuda a la identificación de materiales. Es una prueba rápida en donde no se requiere una preparación de la muestra y puede detectar al mismo tiempo varios parámetros (Noria Corporation, 2014).

El equipo trabaja con una muestra que se coloca en una celda acompañada de una fuente de luz infrarroja, proporcionando un barrido desde las longitudes de onda de 4000 cm^{-1} hasta 600 cm^{-1} . La cantidad de luz absorbida se calcula por la diferencia de intensidad antes y después de que pase por la celda (Noria Corporation, 2014). El esquema de funcionamiento se lo puede ver en la Figura 8.

FIGURA 8.

ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESPECTROFOTOMETRÍA DE INFRARROJO CON TRANSFORMADAS DE FOURIER



FUENTE: Noria Corporation, 2014

2.7.2 ESPECTROSCOPIA DE RUPTURA INDUCIDA POR LÁSER (LIBS)

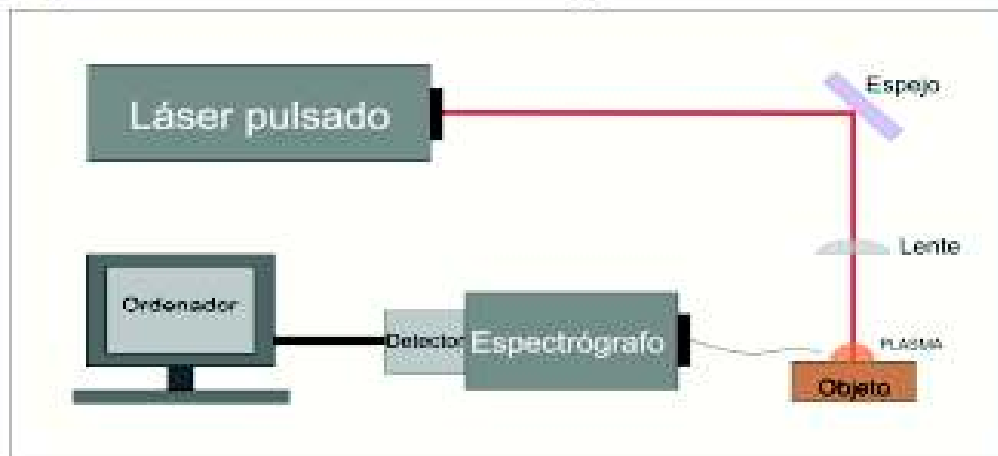
Esta técnica más conocida por sus siglas en inglés como LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), es una tecnología de análisis químico rápido. Ofrece varias ventajas en comparación a otras técnicas de análisis elemental; su tiempo de medición es rápido, tiene una amplia cobertura de elementos y no necesita el uso de un sustrato para el análisis de muestras finas (Applied Spectra, 2004).

La espectroscopia de ruptura inducida parte de un haz de láser de alta potencia que se enfoca en la superficie de la muestra a analizar, haciendo que la misma aumente su temperatura hasta llegar al punto de evaporación.

Existe un umbral de temperatura crítico que depende de la naturaleza del material. Al momento que el láser sobrepasa este umbral, se inicia un proceso de ionización que da lugar a iones, fotoelectrones, moléculas neutras, etc. Éstos se separan de la superficie del material dando lugar a una estructura llamada plasma, que tiene una elevada temperatura y densidad electrónica, formando una banda de emisión en la región UV visible (Applied Spectra, 2004).

Al enfriarse el plasma, emite luz con diferentes picos espectrales que es acoplada por un detector espectrográfico y analiza la señal emitida, como se observa en la Figura 9. Todos los elementos de la tabla periódica están asociados con picos espectrales LIBS. Cuando se identifican diferentes picos se puede determinar rápidamente los elementos químicos, tendiendo así un análisis cualitativo de la muestra (Martín, 2015).

FIGURA 9.
ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESPECTROSCOPIA DE RUPTURA INDUCIDA POR LÁSER



FUENTE: Martín, 2015

2.7.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La Difracción de rayos X es un fenómeno que permite penetrar objetos sólidos, para determinar su arreglo de átomos, emitir longitudes de onda y determinar ángulos de enlace, como se observa en la Figura 10. Ésta consiste en bombardear el sólido con electrones altamente cargados de energía (Cortés et al., 2006). Cuando los electrones lo atraviesan, éstos se desaceleran y se reflejan en un haz de rayos X (Mingarro, 1996), formando intervalos de longitudes de onda llamadas radiaciones continuas (Cortés et al., 2006).

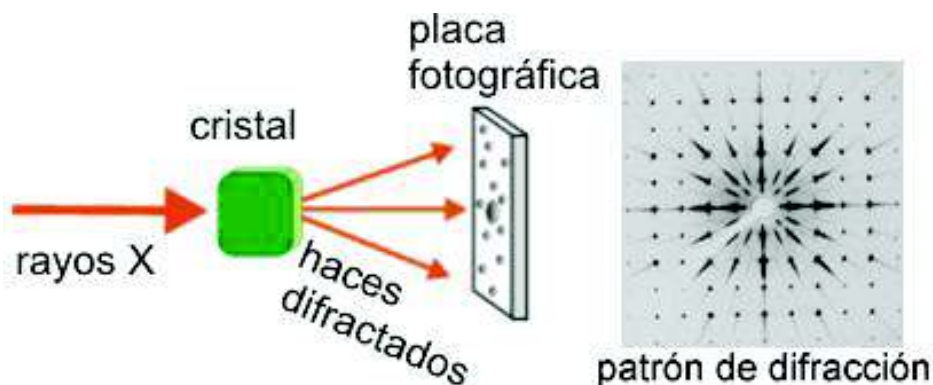
Al momento que se interponen dos o más longitudes de onda, se genera una interferencia que podrá aumentar o disminuir la amplitud de la misma. El incremento de la amplitud de onda se da cuando coinciden los picos de dos o más longitudes de onda; a ésta se le denomina interferencia constructiva.

Por el contrario, cuando el máximo de una longitud de onda coincide con el valle de otra, se produce una interferencia destructiva, lo que provoca una disminución en su amplitud (Atkins et al., 2006).

Esta técnica, permite determinar el arreglo de átomos únicamente de compuestos cristalinos en concentraciones mayores al 1%.

FIGURA 10.

ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X



FUENTE: (Cortés et al., 2006).

2.7.3.1 SOFTWARE EVA

El software EVA es un programa que permite realizar un análisis e interpretación de los datos de Difracción de rayos X en una y en dos dimensiones mucho más fácil, preciso y rápido. Presenta una variada opción de algoritmos para integrar y evaluar los datos y se combinan con un concepto de diseño y operación. EVA tiene funciones que ayudan a graficar y personalizar los informes de análisis para su rápida publicación (Bruker, 2018).

2.7.3.2 SOFTWARE TOPAS

El software TOPAS, cuyas siglas significan Total Pattern Analysis Solutions, es una herramienta gráfica (Instituto de Física, 2018) que permite hacer un análisis cuantitativo de perfiles y estructuras de los resultados obtenidos en la Difracción de rayos X (Bruker, 2018), incluyendo análisis microestructurales, cuantificación de fases amorfas y datos de fases cristalinas (GE3C, 2017).

2.7.4 FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

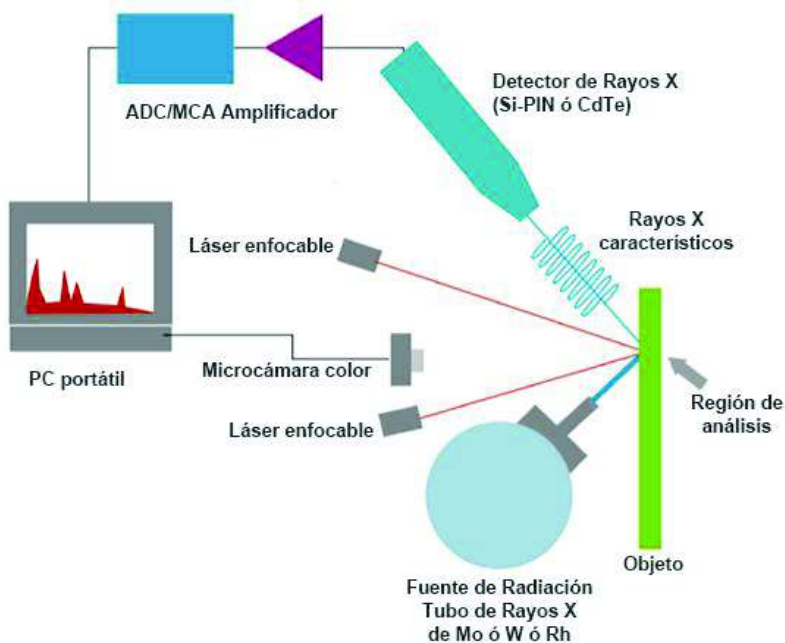
La Fluorescencia de rayos X es una técnica espectroscópica que se basa en la existencia de un sistema conformado por átomos con diferentes niveles de energía y las transiciones de carácter electrónico que puede haber entre ellos.

Existe la radiación primaria o incidente que es la que va a expulsar los electrones de las capas interiores del átomo; aquellos electrones que están en las capas externas van a ir a los lugares no ocupados, haciendo que el exceso energético se disipe en forma de fotones, a lo que se llama radiación X fluorescente. Debido al gradiente energético de los orbitales y una intensidad dada por la concentración del elemento que hay en la muestra a analizar, se origina una longitud de onda (Universidad de Alicante, 2016). El esquema de funcionamiento de esta técnica se observa en la Figura 11.

El objetivo más importante de la FRX es brindar un análisis químico, cualitativo y cuantitativo de los elementos en muestras sólidas y líquidas, las cuales deben ser de un tamaño inferior al del portamuestras, es por esta razón que esta técnica es utilizada a nivel industrial principalmente en la metalurgia, en el campo electrónico y en la fabricación de automóviles en lo que se refiere a controles de calidad (Analitek, 2016).

FIGURA 11.

ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS X



FUENTE: Universidad de Alicante, 2016

2.7.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

La microscopía electrónica de barrido es un análisis que permite estudiar la morfología de superficies, a través de la interacción de un haz de electrones que realiza un barrido en un área específica de la superficie de la muestra para entregar una imagen clara de la misma. El bombardeo de electrones hace que se identifiquen señales que a través de detectores se puede conocer la naturaleza de la muestra, por medio de espectro de elementos, fotografía, monitor de TV, computadora, etc. El funcionamiento de esta técnica se observa en la Figura 12 (Tecnológico de Monterrey, 2018).

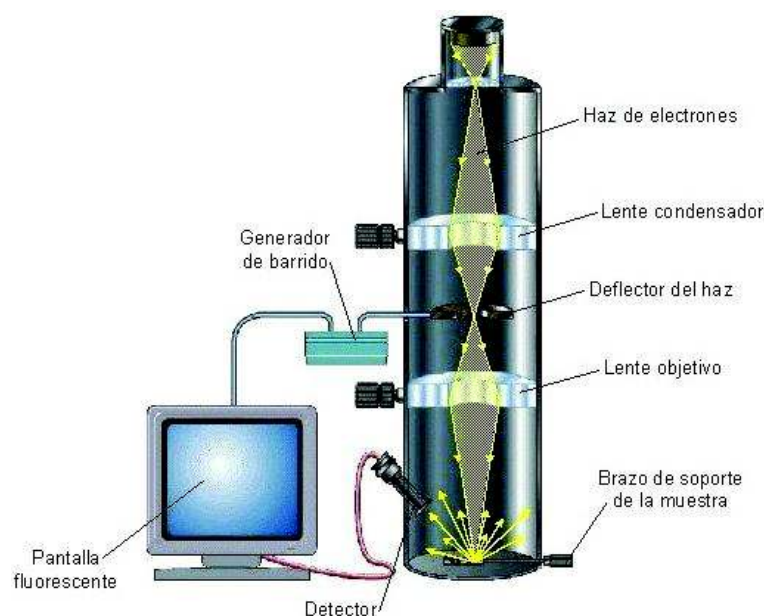
El instrumento que utiliza esta técnica es el microscopio electrónico de barrido, uno de los más versátiles para el análisis de las características principalmente de objetos sólidos, debido a que tiene una resolución que va de 20 a 50 Å y que la

aparición de las imágenes es tridimensional gracias a la profundidad de foco mayor que el microscopio óptico (Tecnológico de Monterrey, 2018).

Para analizar muestras orgánicas, biológicas, polímeros o vidrios se necesita de una placa metálica para evitar el daño por radiación y se pueda observar las muestras. La mayoría de veces se utiliza oro como recubrimiento. Para muestras conductoras no se necesita del uso de una cubierta metálica (Kyung et al., 2013).

FIGURA 12.

ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO



FUENTE: (Kyung et al., 2013).

2.7.6 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA)

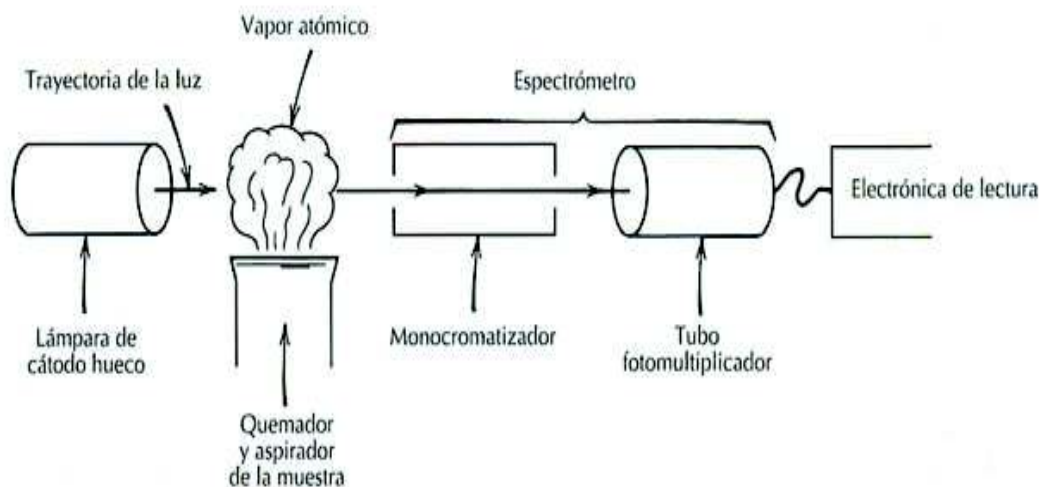
La Espectroscopia de Absorción Atómica, es un análisis que permite cuantificar los elementos de una solución, principalmente de metales, a través de la energía absorbida por los átomos (Fuentes et al., 1997).

Como se muestra en la Figura 13, esta técnica consiste en someter la solución a analizar a una llama, la cual vaporiza la muestra. Al momento que este fenómeno sucede, a nivel molecular se rompen los enlaces químicos y quedan los átomos en estado fundamental, es decir, en estado libre. A este vapor generado se le denomina vapor atómico (Aldabe et al., 2004).

Una vez que los átomos se encuentran libres, una fuente de radiación electromagnética atraviesa dichos átomos, los cuales, al momento de absorber la energía proporcionada, emiten una longitud de onda que arrojará un espectro diferente para cada elemento (Fuentes et al., 1997).

Las ventajas que presenta este análisis es que está exento de interferencias, ya que los átomos absorben el haz de luz de manera independiente, así se encuentren presentes otro tipo de átomos, por lo cual no requiere una separación de los elementos para su lectura, generando ahorros en términos económicos y de tiempo (Walton, 1983).

FIGURA 13.
FUNDAMENTO DE LA ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA



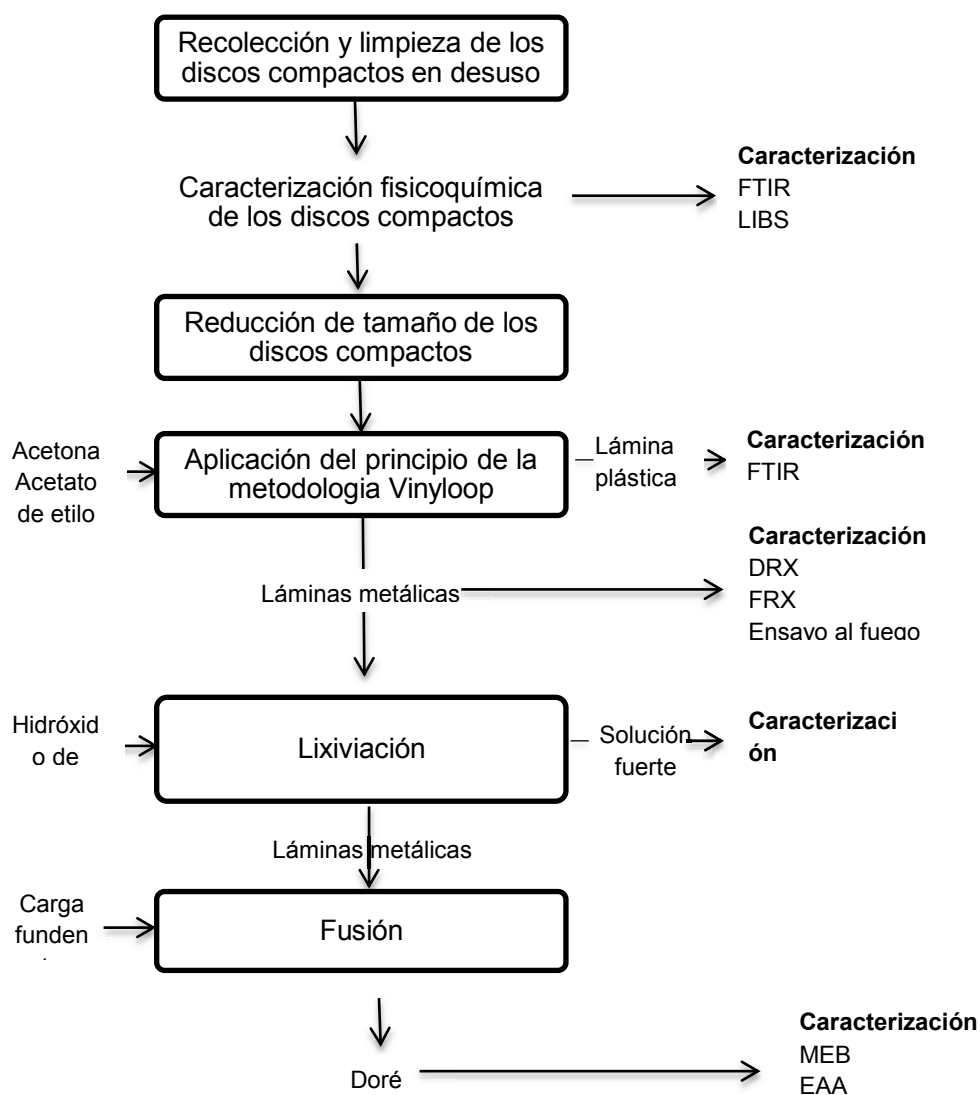
FUENTE: Aldabe, et al., 2004

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El presente trabajo tiene como objetivo la recuperación de metales contenidos en los discos compactos siguiendo la metodología resumida en la Figura 14.

FIGURA 14.
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN DE METALES CONTENIDOS EN DISCOS COMPACTOS



ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS DISCOS COMPACTOS

Para determinar el porcentaje de los elementos del disco compacto, se pesó en una balanza analítica de 4 decimales de precisión el disco compacto completo y posteriormente el disco compacto sin la lámina metálica. El ensayo se repitió en dos ocasiones. Para la remoción de la lámina metálica se recurrió a una cinta adhesiva, como se muestra en la Figura 15.

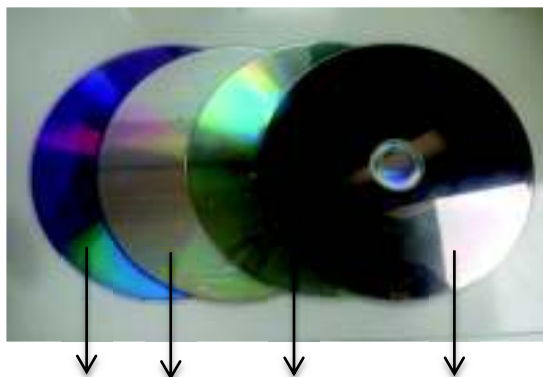
FIGURA 15.

REMOCIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA DEL DISCO COMPACTO



Para el análisis químico de la lámina metálica del disco compacto, se realizó un análisis de Espectroscopia de Ruptura por Láser Inducido (LIBS). Para ello se tomaron 4 tipos diferentes de discos compactos: CD-R (DVD), CD-R, CD-RW Y CD-R (Blu Ray) (Figura 16).

FIGURA 16.
TIPOS DE DISCOS COMPACTOS



(CD-R DVD) (CD-R) (CD-RW) (CD-RW Blu Ray)

Cada uno se colocó entero dentro del equipo LIBS como se muestra en la Figura 17, donde se emitió un pulso de luz de alta intensidad para dar lectura de los elementos que forman la lámina metálica.

FIGURA 17.
ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA DE RUPTURA POR LÁSER INDUCIDO



Para la caracterización química de la lámina plástica se utilizó el equipo PerkinElmer FT-IR/NIR Spectrometer, cuyo fundamento es la Espectrofotometría

de Infrarrojo por Transformadas de Fourier. Para el análisis, se tomó una muestra de disco compacto sin la lámina metálica de 2x2 cm, como se ilustra en la Figura 18.

FIGURA 18.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA LÁMINA PLÁSTICA



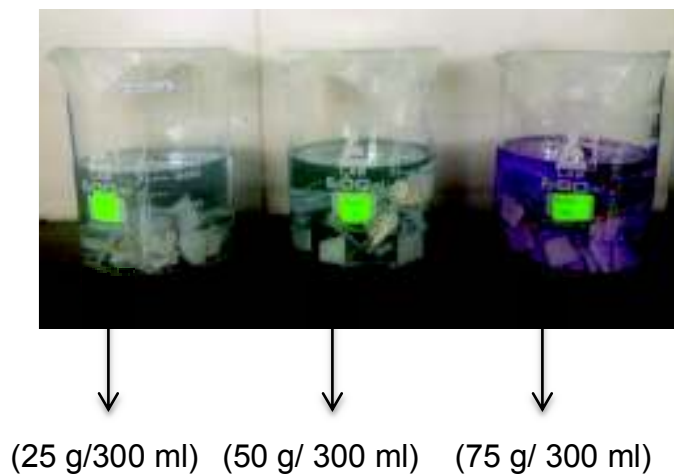
3.2 ENSAYOS METODOLOGÍA VINYLOOP

Para realizar los ensayos de la metodología Vinyloop, se limpió los discos compactos para después cortarlos con una guillotina, llegando a un tamaño de dos centímetros por dos centímetros aproximadamente, como se muestra en la Figura 19.

FIGURA 19.**REDUCCIÓN DE TAMAÑO DEL DISCO COMPACTO**

Aplicando el principio fundamental de la metodología Vinyloop, se realizó el ensayo que consistió en separar la lámina metálica de la lámina plástica.

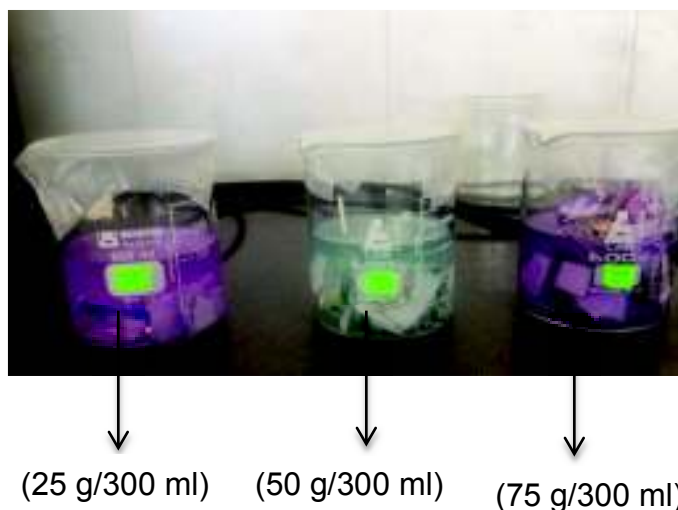
En tres vasos de precipitación de un litro se colocaron al mismo tiempo 25 g (vaso 1), 50 g (vaso 2) y 75 g (vaso 3) de pedazos de discos compactos, añadiendo 300 ml de acetona con 99,5% de pureza en cada vaso de precipitación (Figura 20), dejando a las muestras en reposo durante 24 horas sin agitación.

FIGURA 20.**ENSAYO VINYLOOP UTILIZANDO ACETONA**

El mismo procedimiento se realizó con el acetato de etilo con 99,5% de pureza, como se muestra en la Figura 21.

FIGURA 21.

ENSAYO VINYLOOP UTILIZANDO ACETATO DE ETILO



Después de 24 horas se filtró los solventes contenidos en cada vaso de precipitación, haciendo uso de un papel filtro diferente, los mismos que se pesaron antes y después de la filtración para los cálculos correspondientes. La acetona y el acetato de etilo contenidos en los vasos de precipitación se recolectaron en dos frascos ámbar respectivamente.

Cada solvente se reutilizó 10 veces. En cada reutilización se recuperó 750 ml de acetona y 770 ml de acetato de etilo, por lo que para completar los 300 ml se tuvo que añadir solvente en cada vaso de precipitación.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POLIMÉRICO RESULTANTE

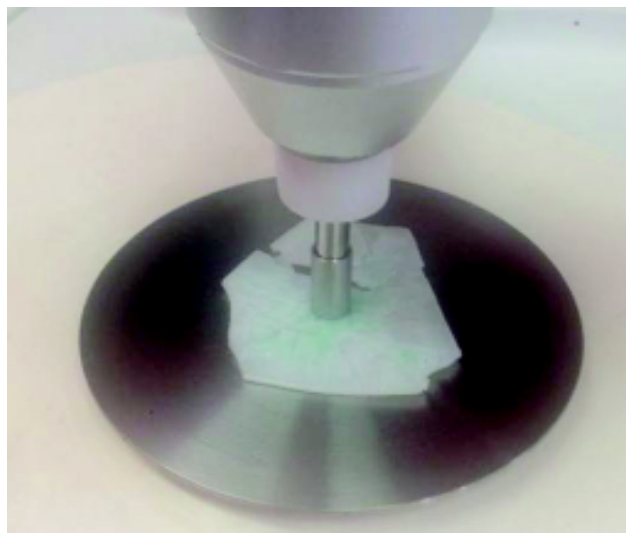
Para la caracterización del material polimérico resultante, se utilizó el equipo PerkinElmer FT-IR/NIR Spectrometer, cuyo fundamento es la Espectrofotometría de Infrarrojo por Transformadas de Fourier.

En el equipo se procesaron 3 muestras. La primera fue una muestra de disco compacto con la lámina metálica previamente removida, la segunda fue una muestra de disco compacto obtenida después de aplicar la metodología Vinyloop con acetona y la tercera fue la muestra obtenida del proceso con acetato de etilo.

Las tres muestras fueron de 2x2 cm y se analizaron en polvo y lámina como se muestra en la Figura 22.

FIGURA 22.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA LÁMINA PLÁSTICA RESULTANTE



3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA OBTENIDA

Para la caracterización de la lámina metálica se realizaron dos análisis. El de Difracción de Rayos X utilizando el difractómetro D8 ADVANCE usando el programa Diffrac (EVA Y TOPAS) y Fluorescencia de Rayos X. Se utilizaron dos tipos de muestras para el análisis; la una contenía las láminas metálicas obtenidas en la metodología Vinyloop (Figura 23), con código CO1.

FIGURA 23.
LÁMINAS METÁLICAS OBTENIDAS EN LA METODOLOGÍA VINYLOOP
(CO1).



La otra muestra correspondió a las láminas metálicas obtenidas después de aplicar la metodología Vinyloop, que fueron sometidas a un proceso de calcinación a 950 °C durante 2 horas (Figura 24), con el código LAM1.

FIGURA 24.
LÁMINAS METÁLICAS CALCINADAS (LAM1)

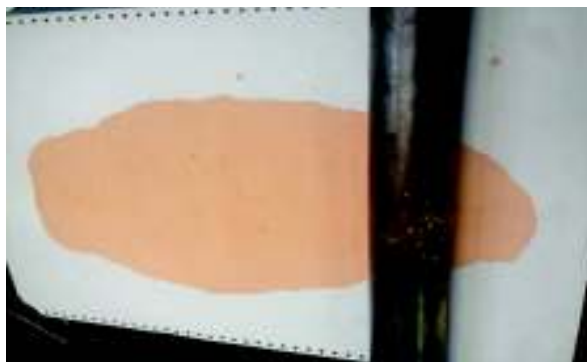


3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA MEDIANTE ENSAYO AL FUEGO

Se preparó tres cargas fundentes, cada una con 40 g de litargirio, 40 g de carbonato de sodio, 30 g de bórax, 3 g de nitrato de potasio, 3 g de harina y 12 g de sílice. Luego se mezcló cada carga fundente con las láminas metálicas enteras, con las láminas metálicas cortadas en pequeños pedazos y con las láminas calcinadas (LAM1) a 950 °C por dos horas. Las mezclas se homogeneizaron con la ayuda de un bolillo como se muestra en la Figura 25, luego se colocaron dentro de tres crisoles de arcilla para introducirlos en el horno a una temperatura de 950°C por 60 minutos.

FIGURA 25.

HOMOGENEIZACIÓN DE LA CARGA FUNDENTE



La mezcla ardiente llamada colada se colocó en una lingotera para que se enfríe y se puedan recuperar las fases generadas en el proceso de fusión (Figura 26).

FIGURA 26.
MUESTRA COLOCADA EN LA LINGOTERA



La Figura 27 muestra una de las fases generadas dentro de la fusión llamada escoria que se asemeja al vidrio de color verde.

FIGURA 27.
FASE ESCORIA



La Figura 28 muestra la fase metálica que se separó de la fase escoria.

FIGURA 28.
FASE METÁLICA



Con la ayuda de un martillo se deformó la fase metálica o régulo hasta formar un cuadrado, con la finalidad de que se pueda manipular de mejor manera cuando se coloque en la copela, como se puede ver en la Figura 29. Se depositó la copela en el horno y se colocó el régulo de plomo por un tiempo de 45 minutos.

FIGURA 29.
DEFORMACIÓN DEL RÉGULO DE PLOMO



Después de esto se sacó el doré de plata (Figura 30) y se dejó enfriar para luego registrar su peso en una balanza analítica.

FIGURA 30.

DORÉ DE PLATA



3.6 RECUPERACIÓN DE METALES MEDIANTE LIXIVIACIÓN

Se tomaron 8,26 gramos de las láminas metálicas obtenidas en la metodología Vinyloop y se las cortó en pedazos pequeños. En un vaso de precipitación de 500 ml, se colocaron los pedazos, añadiendo 200 ml de hidróxido de sodio 1,5 M. Se sometió la muestra a agitación magnética a 80°C hasta que los vapores se extinguieran, como se muestra en la Figura 31.

FIGURA 31.**LIXIVIACIÓN DEL ALUMINIO CON HIDRÓXIDO DE SODIO**

Una vez que se extinguieron los vapores se filtró la muestra (Figura 32) para separar los restos sólidos de la solución.

FIGURA 32.**FILTRACIÓN DE LA MUESTRA LIXIVIADA CON HIDRÓXIDO DE SODIO**

Los restos sólidos se lavaron dentro de un vaso de precipitación con agua destilada y se filtró nuevamente para separar la solución de las láminas residuales. La solución obtenida en la primera filtración se la denominó solución fuerte (SF), mientras que la solución obtenida en la segunda filtración se la

denominó solución de lavado (SL). Ambas soluciones se colocaron en frascos de vidrio como se muestra en la Figura 33.

FIGURA 33.

**SOLUCIÓN FUERTE (derecha) Y SOLUCIÓN DE LAVADO (izquierda)
OBTENIDA EN LA LIXIVIACIÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO**



3.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS METALES OBTENIDOS EN LA LIXIVIACIÓN CON HIDRÓXIDO DE SODIO.

Las soluciones obtenidas en la lixiviación no eran lo suficientemente claras para ser leídas en el equipo, por lo que fue necesario centrifugar 20 ml de ambas muestras dos veces para clarificarlas y leerlas en Espectrometría de Absorción Atómica haciendo uso del equipo PerkinElmer AAnalyst 300, para identificar la presencia de titanio, plata y aluminio. El precipitado obtenido fue analizado por DRX.

Para caracterizar las láminas metálicas recolectadas en la filtración, se llevó el papel filtro con la muestra a la estufa durante un día para eliminar la humedad existente.

Con las láminas secas se realizó una fusión. El doré obtenido fue analizado mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

3.9 BALANCE DE MATERIA

Para realizar el balance de materia se tomaron todos los datos recolectados en cada proceso.

Para el caso de los solventes utilizados en la metodología Vinyloop y el proceso de lixiviación, se transformaron los volúmenes utilizados con la densidad de cada reactivo a temperatura ambiente de 20°C. En el caso de la acetona se realizaron los cálculos con la densidad de 0,791 g/ ml, el acetato de etilo con el valor de 0,8968 g/ ml y el hidróxido de sodio con la densidad de 2,13 g/ml.

Después de aplicar la metodología Vinyloop, se observó que los pedazos de policarbonato habían absorbido solvente, ya que el peso final era mayor al inicial de discos compactos de cada ensayo. Por lo que para obtener el volumen de solvente absorbido, se restaron los valores obtenidos de la lámina plástica con solvente menos el peso teórico de la misma. El peso teórico del policarbonato sería el peso inicial de disco compacto menos los valores registrados en peso de las láminas metálicas y de la goma y residuos.

Sin embargo, al momento de calcular el volumen de solvente absorbido, se obtuvieron valores negativos en ciertos ensayos, por lo que estos datos no fueron tomados en cuenta al sumar el total del solvente absorbido, ya que corresponden a los pedazos de policarbonato que se cayeron durante el procedimiento.

El solvente volatilizado se calculó de la resta del volumen inicial utilizado, menos el volumen absorbido y el volumen restante después de las 10 reutilizaciones.

3.8 ANÁLISIS ECONÓMICO

Dentro del análisis económico se tomaron las condiciones con las que se obtuvo mejores resultados. En el proceso de la metodología Vinyloop, se tomó la relación de 75 g de discos compactos por cada 300 ml de solvente. En base a esto se

calculó las láminas metálicas que se obtendrían si las 10 reutilizaciones se hubieran realizado en tres vasos de precipitación con 75 g de discos compactos para cada solvente. En el proceso de fusión, se consiguió un mejor resultado cuando las láminas fueron previamente calcinadas (LAM1), por lo que se tomó el valor obtenido de 0,105 g de doré con 8,26 g de láminas calcinadas.

Una vez definida la masa de doré óptima, se desarrolló el análisis económico para la calcinación de las láminas metálicas y la fusión; además de los solventes utilizados en la experimentación.

Para calcular el costo de energía requerida para cada equipo se tomó en cuenta el precio de kilovatio por hora a nivel industrial para sistemas de media tensión que es de \$0.0897 (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2018). Además, se necesitó de la potencia del horno y la mufla, obtenida de la etiqueta de cada equipo.

Para el cálculo de los costos de cada solvente orgánico se tomó en cuenta una proforma realizada por la empresa Novachem, la misma que se encuentra en el Anexo 1, en donde se puede ver el precio de 4 litros de acetona y 4 de acetato de etilo. Para la obtención de los costos de 2,4 litros de cada solvente se realizó una simple regla de tres como se muestra en el Anexo 2. Para calcular el costo de los reactivos utilizados en el ensayo de fusión, se tomó como base los precios dados por la empresa Minasur (Anexo1), el costo del reactivo utilizado para la lixiviación se calculó en base a la proforma dada por la empresa Emlab Representaciones, adjunta en el Anexo 1.

Finalmente, se tomó en cuenta el salario de la persona que llevaría a cabo el ensayo, conforme las tablas de salario mínimo sectoriales del 2018, provistas por el Ministerio del Trabajo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS

4.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS DISCOS COMPACTOS

En la Tabla 3 se muestran los pesos registrados de dos discos compactos y su peso promedio junto con el de sus componentes. El disco compacto tuvo un peso promedio de 15,41 g, la lámina plástica un 15,15 g y la lámina metálica, junto con el diseño serigrafiado, la goma y la capa de laca un 0,26 g.

TABLA 3.
COMPOSICIÓN DE LOS DISCOS COMPACTOS

Nº	Peso total CD (g)	Peso lámina plástica (g)	Peso lámina metálica (g)	Lámina plástica (%)	Lámina metálica (%)
1	15,42	15,16	0,26	98	2
2	15,40	15,13	0,27	98	2
Promedio	15,41±0,01	15,15±0,02	0,26±0,01	98	2

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

En los resultados de la Tabla 3, se muestran también los porcentajes de la composición promedio de los discos compactos que constaban de un 98% de la lámina plástica y un 2% de lámina metálica, cuyo ejemplo de cálculo se muestra en el Anexo 3.

En base a los datos proporcionados por Interempresas para la elaboración de un disco compacto original se requieren de 15 gramos de policarbonato (Interempresas, 2003), lo que representa un 98% del disco compacto (Cederika, 2009). Al analizar la información, se observa que la desviación estándar es baja. En el caso del peso de los discos compactos y el peso de las láminas metálicas,

la desviación estándar es de $\pm 0,01$, mientras que el peso de la lámina plástica tiene una desviación estándar de 0,02, lo que muestra que la dispersión de los datos es baja. Por otro lado, la lámina plástica representa un 98% del disco compacto, el cual coincide con los datos bibliográficos, lo que permite de igual manera validar los datos obtenidos.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA DE LOS DISCOS COMPACTOS

En la caracterización de la capa reflectante de los cuatro tipos de discos compactos, mediante el Análisis de Espectroscopia de Ruptura Inducida por Láser (Anexo 4), se detectaron los siguientes elementos predominantes detallados en la Tabla 4.

TABLA 4.

ELEMENTOS MAYORITARIOS DE LOS DISCOS COMPACTOS MEDIANTE ANÁLISIS LIBS

Tipo de disco compacto	Elementos
CD-R (DVD)	Plata y Titanio
CD-R (CD)	Titanio y Aluminio
CD-R (Blu Ray)	Plata y Titanio
CD-RW	Plata y Titanio

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

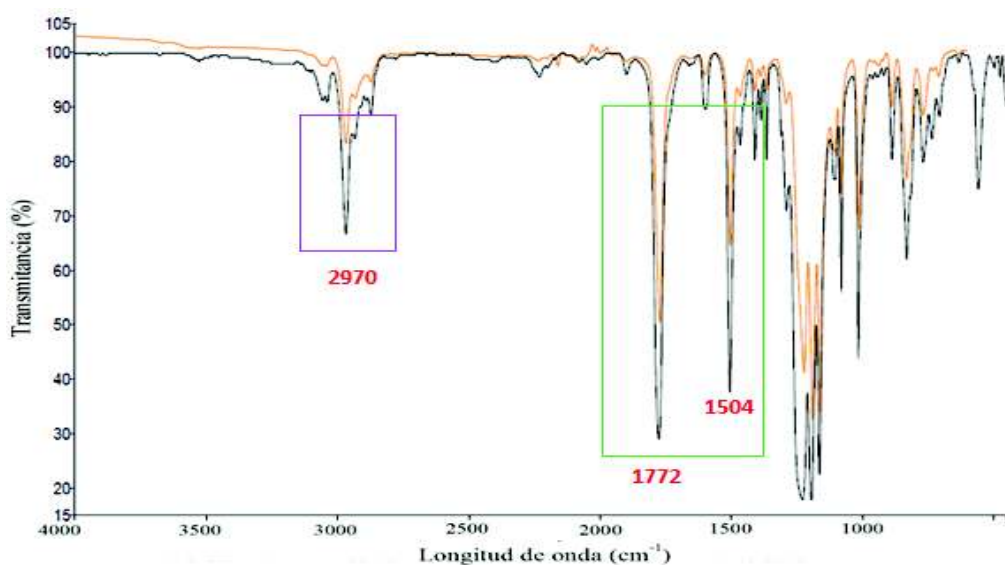
La Tabla 4 muestra que tanto los discos compactos de tipo grabable como regrabable, los DVD y Blu Ray, están compuestos en su mayoría de plata y titanio; sin embargo, los discos compactos originales de tipo grabable, CD-R (CD), poseen de manera predominante titanio y aluminio.

Al analizar la lámina metálica de los discos compactos mediante la técnica LIBS, los resultados concuerdan con la información bibliográfica investigada, que establece que los CD-RW poseen una capa de metal formada por plata y que la capa metálica del CD-R puede estar formada por aluminio, plata o una aleación de plata (Casas, 2013).

4.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA PLÁSTICA DE LOS DISCOS COMPACTOS

En la Grafica 1 se observa una línea de color naranja que representa el espectro con los grupos funcionales de la muestra de polímero del disco compacto analizada, mientras que la línea negra es el espectro patrón dado por el equipo PerkinElmer FT-IR/NIR Spectrometer, que muestra los grupos funcionales donde se encuentran las cadenas del policarbonato.

GRÁFICA 1. COMPARACIÓN ENTRE LA LÁMINA PLÁSTICA DEL DISCO COMPACTO Y EL ESPECTRO PATRÓN



ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Al momento de ser superpuestos ambos espectros, es posible visualizar que el espectro patrón del equipo muestra una menor intensidad, sin embargo, ambos poseen los mismos picos. El pico a 1772 cm^{-1} se encuentra en el rango entre $1540\text{-}1850\text{ cm}^{-1}$ que pertenece al grupo carbonilo (C=O); el pico de 1504 cm^{-1} representa al grupo funcional aromático (C_6H_6) y el pico de 2970 cm^{-1} representan el grupo hidroxilo (OH^-), teniendo así los picos característicos principales de los grupos funcionales del policarbonato (Larkin, 2010).

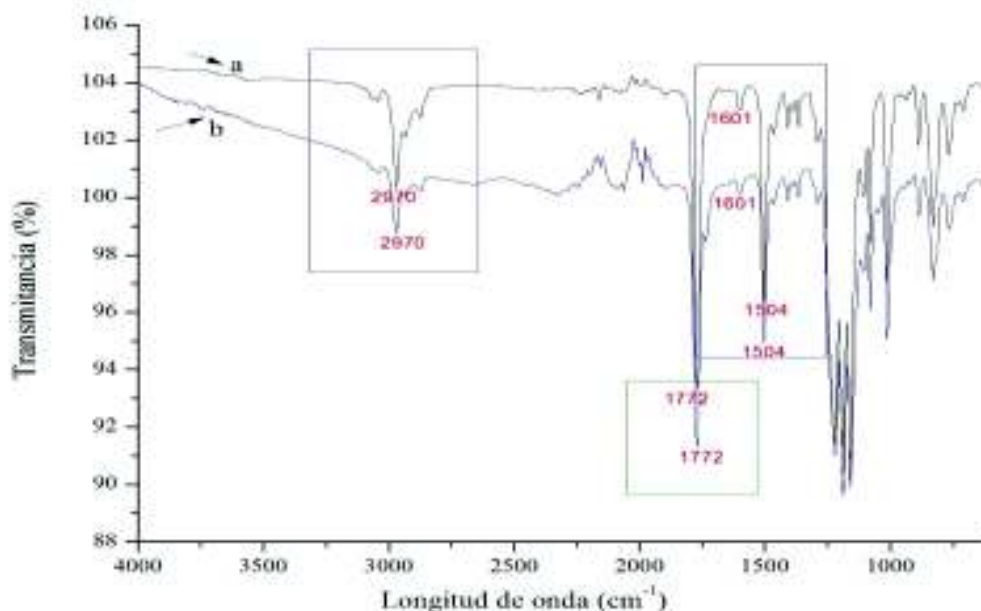
Además, la Espectrofotometría de Infrarrojo arrojó como resultado que el espectro de la lámina plástica del disco compacto coincidió en un 88,27% con el espectro de los grupos funcionales de la cadena del policarbonato proporcionada por el espectro patrón.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLICARBONATO RESULTANTE LUEGO DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP

La Gráfica 2 muestra los espectros FTIR de la muestra sin tratamiento (a) y la muestra tratada con acetato de etilo (b).

GRÁFICA 2.

ESPECTRO FTIR DE LA MUESTRA SIN TRATAMIENTO (a) Y LA MUESTRA TRATADA CON ACETATO DE ETILO (b)



ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

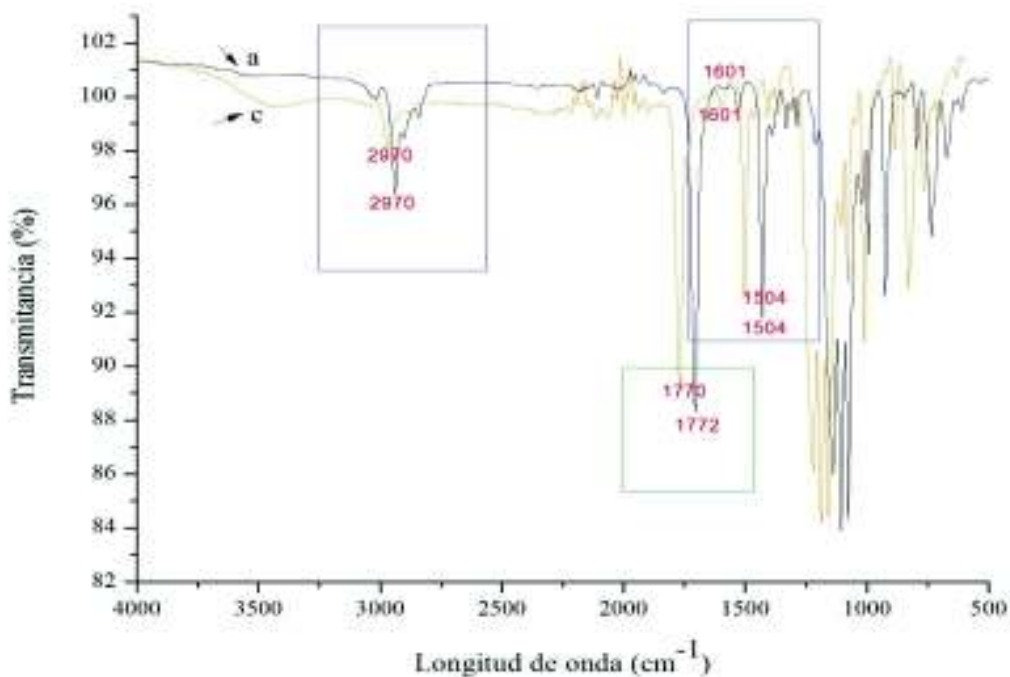
En la Gráfica 2 se identificaron para ambos espectros las siguientes bandas en la región del infrarrojo: la primera a 2970 cm^{-1} correspondiente a los grupos hidroxilo (OH); otra a 1772 cm^{-1} , en la región que caracteriza al grupo carbonilo (C=O) y por último, entre 1601 cm^{-1} y 1504 cm^{-1} (C_6H_6), se tiene los anillos de benceno en compuestos aromáticos (Shurvell, 2002). Al comparar ambos espectros se observó que los picos de los grupos funcionales del policarbonato conservan la misma posición, por lo que al aplicar la metodología Vinyloop, éstos no se alteraron.

En la Gráfica 3 se identificaron para ambos espectros las mismas bandas de los espectros de la Gráfica 2, pero existe un desplazamiento del espectro c, que representa la muestra tratada con acetona en comparación al espectro a, que representa la muestra sin tratamiento. Para el análisis de policarbonato tratado

con acetona, se realizó dos tipos de muestras; la una fue pulverizada y a la otra solo se colocó en el equipo, tal como se la obtuvo del proceso Vinyloop.

GRÁFICA 3.

ESPECTRO FTIR DE LA MUESTRA SIN TRATAMIENTO (a) Y LA MUESTRA TRATADA CON ACETONA (c)



ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Sin embargo, el desplazamiento no afectó a los picos representativos de policarbonato, por lo que el uso de acetona no alteró los grupos funcionales de la cadena del mismo.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede afirmar que la metodología Vinyloop es una opción viable para la separación del policarbonato de las láminas metálicas, en lo que se refiere a la conservación de los grupos funcionales representativos del policarbonato, indicando que esta metodología no solo puede ser aplicada para el policloruro de vinilo como se lo ha realizado en diferentes

investigaciones encontradas en bibliografía, en donde se ha trabajado con envases de alimentos y empaques farmacéuticos (Endara, 2008 & Erazo, 2015).

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA LÁMINA METÁLICA OBTENIDA

Los resultados obtenidos en la Difracción de Rayos X (Anexo 5) se muestran en el Tabla 5, donde la Muestra 1 representa las láminas metálicas (CO1) y la Muestra 2 representa las láminas metálicas calcinadas (LAM1).

TABLA 5.

ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Mineral	Formula	Muestra 1 Contenido (%)	Muestra 2 Contenido (%)
Rutilo	TiO ₂	51	30
Anhidrita	CaSO ₄	6	-
Dolomita	CaMg(CO ₃)	3	2
Calcita	CaCO ₃	2	16
Alabandita	MnS	15	-
Baritina	BaSO ₄	11	-
Calcita Magnesia	(Ca, Mg) CO ₃	8	-
Cuarzo	SiO ₂	2	-
Wollastonita	Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	2	-
Brucita	Mg(OH) ₂	-	34
Talco	Mg ₂ Fe(OH) ₂ Si ₄ O ₁₀	-	18

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Dentro del análisis de Difracción de Rayos X se obtuvo que el dióxido de titanio se encontró en mayor proporción, presentándose como rutilo en un 51% en las láminas metálicas y un 30% del mismo en las láminas calcinadas.

Compuestos como la alabandita, baritina, anhidrita, dolomita y wollastonita son utilizadas en la industria de la pintura, por lo que su presencia se debe a que son utilizadas en el serigrafiado del disco compacto. Sin embargo, se observa que en la muestra 2 no existe la presencia de estos compuestos. La alabandita y anhidrita están formadas por azufre, el cual tiene un punto de ebullición de 445°C, por lo que se pudo haber volatilizado al momento de calcinar las muestras a 950°C en la mufla durante dos horas, alterando de esta manera los compuestos. La dolomita es también comúnmente utilizada para la elaboración de adhesivos y plásticos que componen también parte de la capa del serigrafiado del disco compacto. El talco es comúnmente utilizado en la fabricación de papel, donde muchos de los discos compactos poseen la capa de serigrafiado adherido a una fina lámina de papel (Dud'a, Rejl, 2004)

Por otro lado, los resultados obtenidos en el análisis de Fluorescencia de Rayos X (Anexo 6) de la muestra de láminas metálicas calcinadas, se presentan en el Tabla 6.

TABLA 6.

ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Elemento	Contenido (%)
Ti	22,36
Ba	11,58
Si	8,88

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

TABLA 7.

ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (CONTINUACIÓN)

Elemento	Contenido (%)
Ag	8,20
Mg	3,10
Br	2,92
Ca	2,74
S	1,97
Al	1,84
Cu	0,47
Zn	0,39
Na	0,33
Pb	0,26
Fe	0,25
K	0,25
As	0,20
P	0,15
Sr	0,15
Pd	0,14
Zr	0,12
Cl	0,08
Co	0,01
Nb	0,01

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

En el análisis de Fluorescencia de Rayos X se obtuvo que los elementos que se encontraban en mayor proporción y más representativos eran el titanio con un 22,36%, plata con un 8,2% y aluminio con un 1,84%.

La presencia de varios elementos encontrados en la Fluorescencia de Rayos X se explica por los compuestos encontrados en el análisis de Difracción de Rayos X. La existencia de titanio se debe al rutilo, mientras que la de bario se debe a la baritina. Tanto el cuarzo como la wollastonita se encuentran formados por sílice. El magnesio se encuentra presente en la dolomita, calcita magnesiana, alabandita, calcita y brucita. En el caso del calcio se deben a los compuestos anhidrita, dolomita, wollastonita y calcita magnesiana. El azufre se encuentra en compuestos como la baritina anhidrita y alabandita, sin embargo, este elemento disminuye en el análisis de Fluorescencia de Rayos X debido al método de preparación de la muestra (Dud'a, Rejl, 2004).

Los compuestos que se encuentran en porcentajes menores al 0,5% no aparecen en el análisis de Difracción de Rayos X, ya que el límite de detección del equipo es del 1%, por lo que es razonable que no se encuentren en los resultados (Cortés et al., 2006).

Se puede observar que en ambos análisis fue posible detectar titanio y que fue el compuesto que se encontraba en mayor proporción debido a que todos los discos compactos utilizados, tanto los CD-R como los CD-RW, poseen titanio según el análisis LIBS. Sin embargo, los metales plata y aluminio fueron detectados únicamente en el análisis de Fluorescencia de Rayos X.

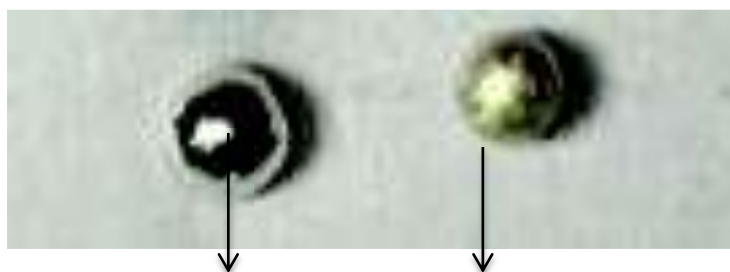
La plata se encontró en mayor porcentaje que el aluminio, 8,20% y 1,84% respectivamente. Esto se debió a que la mayoría de discos compactos reciclados eran de tipo grabables, es decir, los que podían ser usados por una única ocasión, que según los resultados obtenidos en la técnica LIBS estaban compuestos por plata y al ser de este tipo, es una condición para que sean más susceptibles de ser desechados a la basura y aumente la cantidad de desechos en vertederos.

4.4 ANÁLISIS DEL DORÉ OBTENIDO POR FUSIÓN EN EL ENSAYO AL FUEGO

En el caso del ensayo al fuego cuando se calcinó 8,26 g de láminas metálicas, se obtuvo un doré de 0,105 g y cuando se colocó 8,26 g de láminas metálicas en pedazos pequeños se obtuvo un doré de 0,103 g (Figura 34). En el caso de las láminas enteras se obtuvo un doré de 0,074 g a partir de 8,26 g de láminas metálicas.

FIGURA 34.

DORÉ OBTENIDO CON LAS LÁMINAS CALCINADAS (izquierda) Y CON LAS LÁMINAS EN PEDAZOS PEQUEÑOS (derecha)

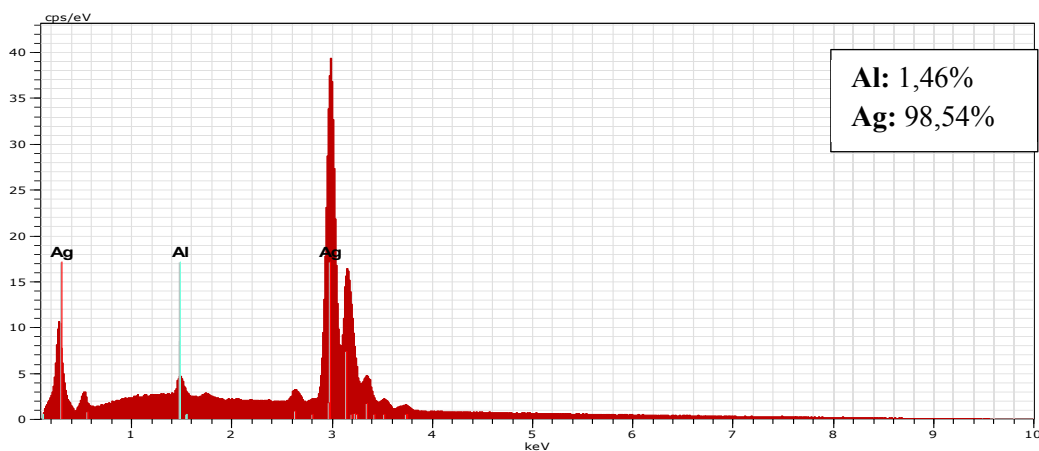


(0,105g/ 8, 26g de
láminas metálicas)

(0,103 g/ 8, 26g de
láminas metálicas)

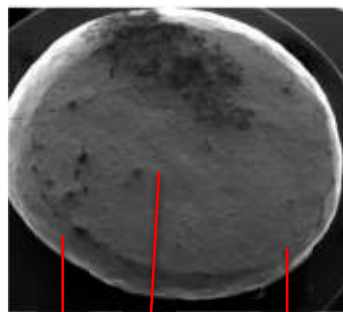
ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), utilizando el detector de rayos X para análisis químico EDS, se analizó el doré obtenido de las cenizas fundidas en el ensayo al fuego, teniendo como resultado el espectrograma de la Gráfica 4, en el que se muestra que el doré contenía un 98,54% de plata y un 1,46% de aluminio.

GRÁFICA 4.**ANÁLISIS QUÍMICO EDS DEL DORÉ OBTENIDO EN LA FUSIÓN**

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Adicional al espectrograma obtenido en el MEB, se capturó una imagen del doré como se muestra en la Figura 35, en la cual fue posible visualizar la aleación de metales. La parte más clara del doré fue la que estaba compuesta por plata, mientras que los pequeños puntos de color más oscuros fueron la zona en donde se detectó aluminio. En la parte superior central, se observó una zona oscura dada probablemente a impurezas adquiridas al momento de martillar el doré.

FIGURA 35.**FOTOGRAFÍA DEL DORÉ ANALIZADO EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO**

Al Impureza Ag

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

4.5 ANÁLISIS DE LOS METALES OBTENIDOS POR LIXIVIACIÓN DE LAS LÁMINAS METÁLICAS.

Los resultados de la solución fuerte analizada químicamente por Espectrometría de Absorción Atómica (Anexo 7), se observan en la Tabla 8.

TABLA 8.

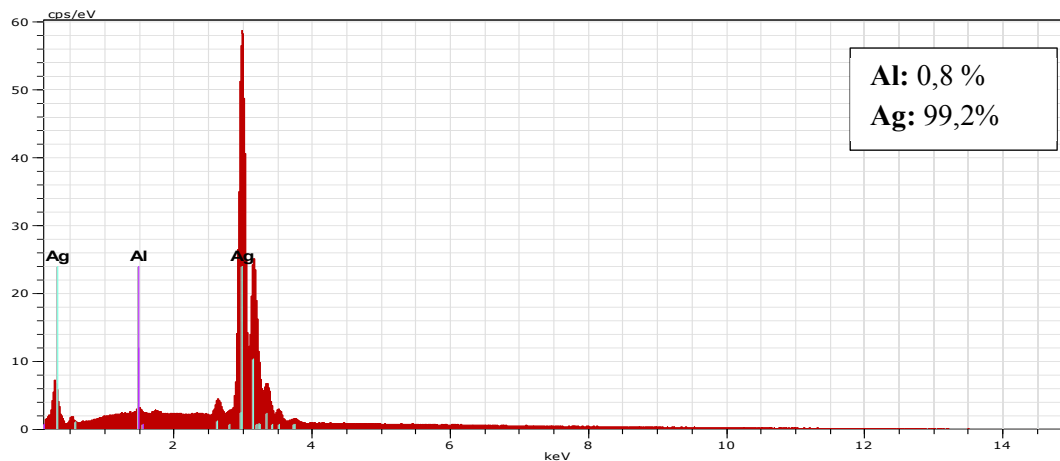
RESULTADOS DE LA RECUPERACIÓN DE METALES POR LIXIVIACIÓN

	Plata	Aluminio	Titanio
Concentración (mg/l)	0,47	14,9	2,42
Peso (mg)	0,1	3	0,5
mg/g láminas metálicas	0,012 mg Ag/lám	0,363 mg Al/lám	0,061 mg Ti/lám

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Al realizar el análisis químico por Espectrometría de Absorción Atómica de la solución fuerte en el proceso de lixiviación con hidróxido de sodio 1,5 M, se obtuvo un total de 0,0001 g de plata, 0,003 g de aluminio y 0,0005 g de titanio.

Además, al analizar el doré obtenido de las láminas resultantes de la lixiviación en el Microscopio Electrónico de Barrido, se obtuvo que estaba compuesto por un 99,2% de plata y un 0,8% de aluminio, como se muestra en la Gráfica 5.

GRÁFICA 5.**ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS DEL DORÉ OBTENIDO EN LA FUSIÓN
DESPUÉS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN**

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Tanto los resultados obtenidos en la lixiviación de las láminas metálicas con los resultados arrojados por la Microscopía Electrónica de Barrido demostraron que se logró separar en gran parte el aluminio de la plata, lo que indica que el proceso de lixiviación con hidróxido de sodio es válido para obtener un doré de plata de mayor pureza.

La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos en Espectrometría de Absorción Atómica del precipitado en la lixiviación (Anexo 8)

TABLA 9.**RESULTADOS OBTENIDOS EN ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DEL PRECIPITADO DE LA LIXIVIACIÓN**

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Contenido (%)
Natrita	Na_2CO_3	77
Rutilo	TiO_2	11
Halita	NaCl	8
Hidróxido de grosularia	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$	2
Anhidrita	CaSO_4	1
Coesita	SiO_2	1

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Como se observa en la Tabla 9, el precipitado analizado tiene un 77% de natrita y 8% de halita, su presencia se debe a que el proceso de lixiviación se realizó con hidróxido de sodio. Se encontró aluminio formando parte del compuesto de hidróxido de grosularia en un 2% y rutilo en un 11%.

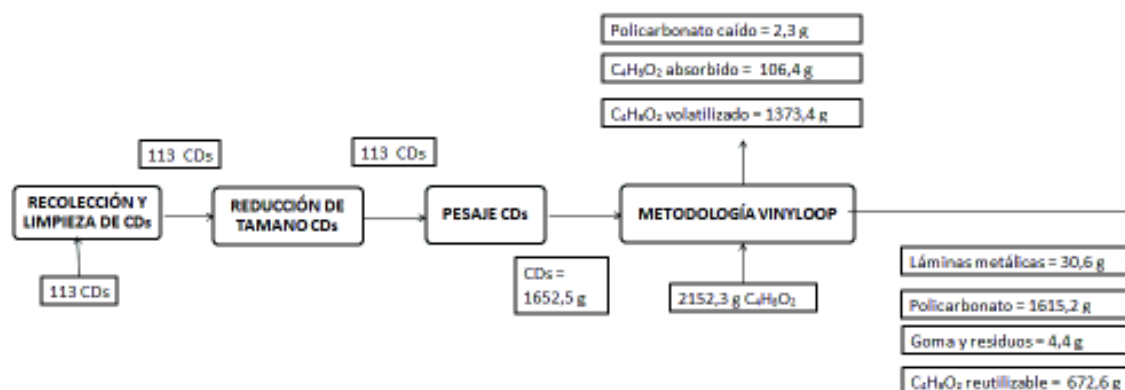
4.6 BALANCE DE MATERIA**4.6.1 BALANCE DE MATERIA DEL ACETATO DE ETILO**

Para aplicar el principio de la metodología Vinyloop con acetato de etilo, se utilizaron 113 discos compactos que tenían un peso de 1652,45 g y 2152,3 g de solvente. Con esto fue posible extraer 30,5 g de láminas metálicas y 1615,2 g de policarbonato.

Las salidas que se generaron en este proceso fueron 4,4 g de goma y residuos y 672,6 g de solvente disponible para ser reutilizado, como se muestra en la Figura 36. Además, las pérdidas que se generaron fueron 1373,4 g de solvente volatilizado y 106,4 g de solvente retenido en el plástico y 2,3 g de pedazos de policarbonato que se cayeron durante el proceso.

FIGURA 36.

BALANCE DE MATERIA DEL ACETATO DE ETILO



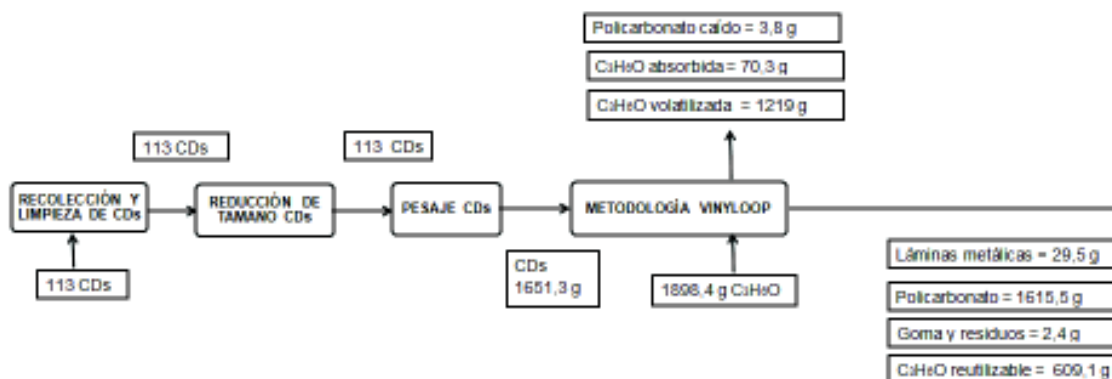
ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

4.6.2 BALANCE DE MATERIA DE LA ACETONA

Para aplicar el principio de la metodología Vinyloop con acetona, se utilizaron 113 discos compactos que tenían un peso de 1651,3 g y 1898,4 g de solvente. Con esto fue posible extraer 29,5 g de láminas metálicas y 1615,6 g de policarbonato.

Las salidas que se generaron en este proceso fueron 2,4 g de goma y residuos y 609,1 g de solvente disponible para ser reutilizado, como se muestra en la Figura 37. Además, las pérdidas que se generaron fueron 1219 g de solvente volatilizado y 70,3 g de solvente retenido en el plástico y 3,8 g de pedazos de policarbonato que se cayeron durante el proceso.

FIGURA 37.
BALANCE DE MATERIA DEL ACETONA



ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

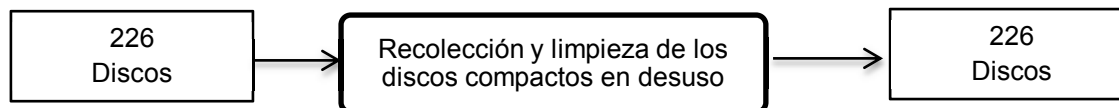
Realizando la comparación entre ambos balances de materia, se observó que con el acetato de etilo se obtuvieron mayores pérdidas de solvente por absorción que la acetona, mientras que las pérdidas por solvente volatizado fueron mayores en la acetona.

Además, el acetato de etilo removió una mayor cantidad de goma y residuos. En ambos procesos existieron pérdidas de discos compactos al momento de trasladar los recipientes que contenían el policarbonato después de aplicar la metodología Vinyloop. El total de pérdidas de policarbonato fueron de 6,05 gramos, que corresponden a trozos de policarbonato que se cayeron al momento de trasladarlos.

4.6.3 BALANCE DE MATERIA POR PROCESOS

4.6.3.1 RECOLECCIÓN Y LIMPIEZA DE LOS DISCOS COMPACTOS EN DESUSO

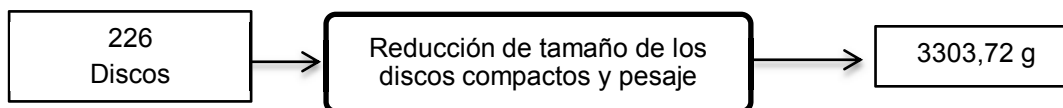
La Figura 38 muestra el balance de materia del primer proceso de la metodología experimental propuesta para la recuperación de metales contenidos en discos compactos. En el primer proceso se recolectaron y limpiaron un total de 226 discos compactos reciclados.

FIGURA 38.**BALANCE DE MATERIA DE LA RECOLECCIÓN Y LIMPIEZA DE LOS DISCOS COMPACTOS EN DESUSO**

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

4.6.3.2 REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LOS DISCOS COMPACTOS

El tercer proceso de la metodología, como se muestra en la Figura 39, consistió en cortar en pequeños pedazos los discos compactos y pesar. Para ello se tomaron los 226 discos compactos previamente limpiados, los cuales tuvieron un peso total de 3303,72 g.

FIGURA 39.**BALANCE DE MATERIA DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LOS DISCOS COMPACTOS Y PESAJE**

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

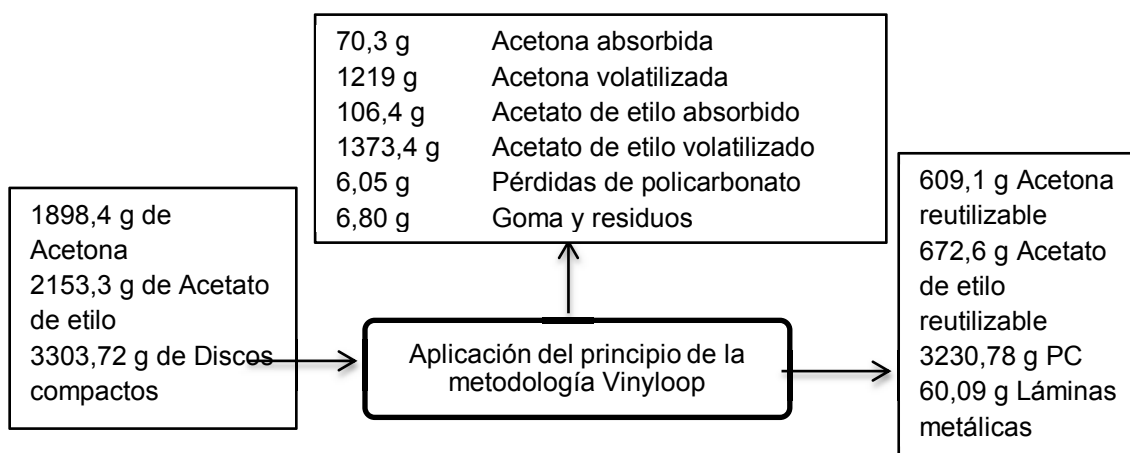
4.6.3.3 APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP

Para la aplicación del principio de la metodología Vinyloop con 3303,72 g de discos compactos, se utilizó 1898,4 g de acetona y 2153,3 g de acetato de etilo. Con esto fue posible extraer 60,09 g de láminas metálicas y 3230,78 g de policarbonato (Anexo 9).

Las salidas que se generaron en este proceso fueron 6,80 g de goma y residuos, 6,05 g de pérdidas de policarbonato, 2592,4 g de solvente volatilizado y 176,7 g de solvente retenido en el policarbonato, por lo que después de las 10 reutilizaciones quedaron 1281,7 g de solvente disponibles para ser reutilizados, como se muestra en la Figura 40.

FIGURA 40.

BALANCE DE MATERIA DE LA APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP

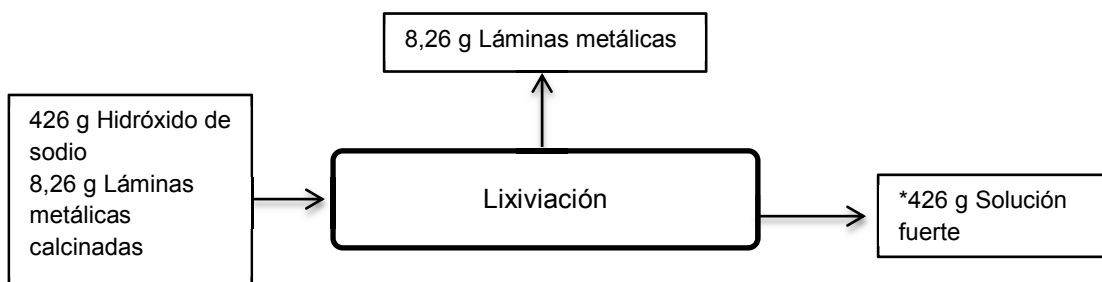


ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

4.6.3.5 LIXIVIACIÓN

Para el proceso de lixiviación se trataron 8,26 g de láminas metálicas con 426 g de hidróxido de sodio, con lo cual se obtuvo 426 g de una solución fuerte y 8,25 g de láminas metálicas residuales como se muestra en la Figura 41.

FIGURA 41.
BALANCE DE MATERIA DE LA LIXIVIACIÓN



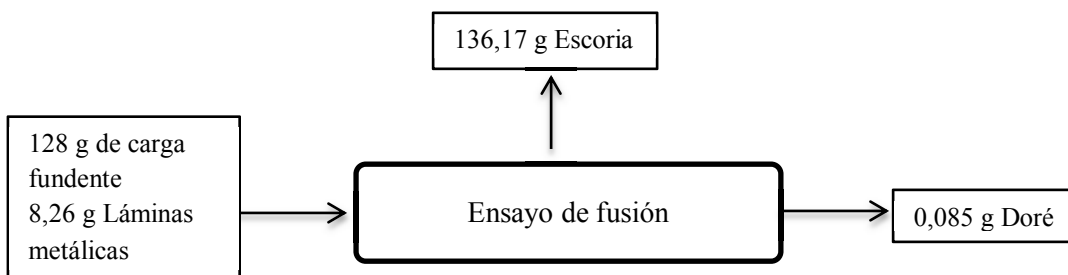
ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

* La masa obtenida en la solución fuerte se asume que es del mismo valor de la masa del hidróxido de sodio calculado a la entrada, ya que en su mayoría está formada por este compuesto.

4.6.3.6 FUSIÓN

En el último proceso de la metodología, el ensayo de fusión, se tomaron los 8,26 g de las láminas metálicas provenientes del proceso de lixiviación con 128 g de carga fundente, con lo cual se obtuvo un doré de 0,085 g y escoria de 136,17 g, como se muestra en la Figura 42.

FIGURA 42.
BALANCE DE MATERIA DEL ENSAYO DE FUSIÓN



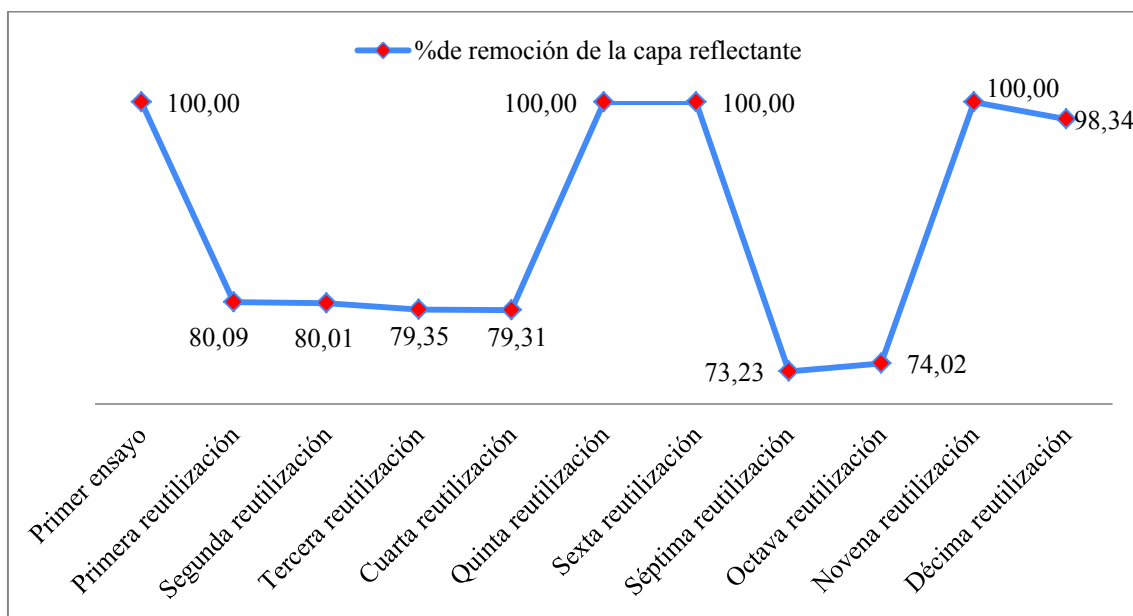
ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

4.7 EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES REALIZADAS PARA CADA SOLVENTE

En la Gráfica 6 se muestra la eficiencia del acetato de etilo para la remoción de la capa reflectante en las diez reutilizaciones, la cual oscila entre el 73,23% y el 100%, teniendo el porcentaje más bajo de eficiencia en la séptima reutilización, y una máxima eficiencia del 100% en la quinta, sexta y novena reutilización (Anexo 10).

GRÁFICA 6.

EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES DEL ACETATO DE ETILO PARA LA REMOCIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE

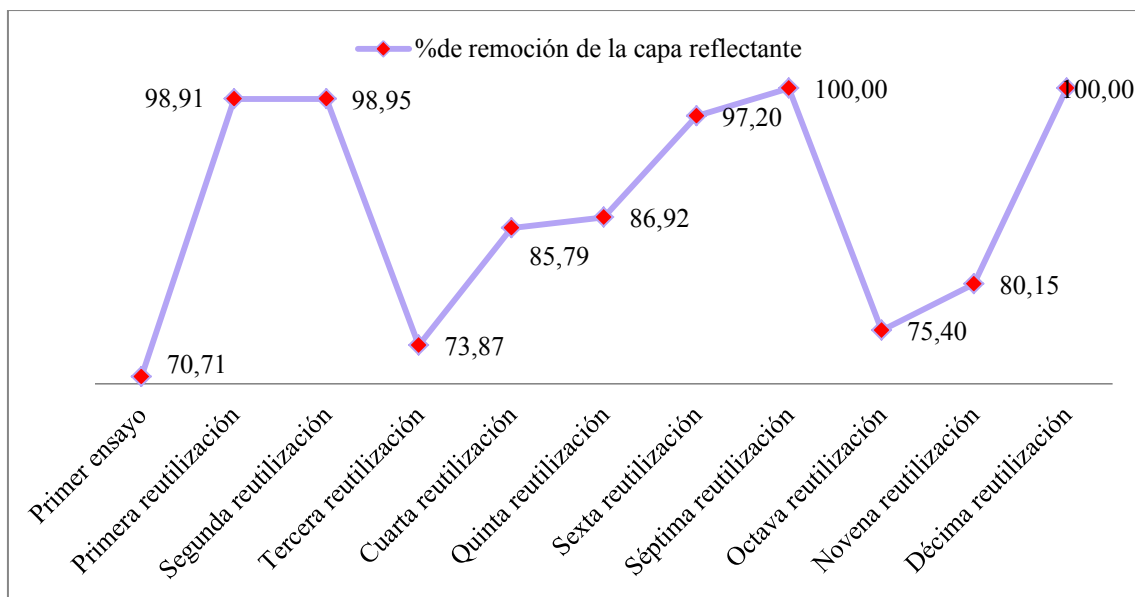


ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

En la Gráfica 7 se muestra la eficiencia de la acetona para la remoción de la capa reflectante en las diez reutilizaciones, la cual oscila entre el 73,87% y el 100%, siendo el porcentaje más bajo de eficiencia en la tercera reutilización, y una máxima eficiencia del 100% en la séptima y décima reutilización (Anexo 10).

GRÁFICA 7.

EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES DE LA ACETONA PARA LA REMOCIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE



ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

En las Gráficas 6 y 7, se observó que la eficiencia no se vio alterada por las reutilizaciones, ya que no existió un patrón en el que aumente o disminuya la eficiencia. Los porcentajes de eficiencia se mantuvieron entre el 70 y 100 por ciento. Sin embargo, en el caso del acetato de etilo fue posible alcanzar en tres ocasiones porcentajes de remoción del 100%, mientras que en el caso de la acetona fue posible realizarlo solo en dos ocasiones. Además, los porcentajes de remoción mínimos fueron más bajos para la acetona con un 70,71%. Por otro lado, el acetato de etilo obtuvo un 73,23%. Esto indica, que el acetato de etilo resulta ser el solvente óptimo en el caso de realizar varias reutilizaciones.

Las variaciones de eficiencia son inherentes a las reutilizaciones, ya que para ambos solventes se obtuvieron en la décima reutilización eficiencias elevadas del 98,34% y 100% para el acetato de etilo y la acetona respectivamente, por lo que la causa de dichas variantes se pudo deber a la colocación de los trozos de discos compactos que en ocasiones favorecía su aglomeración y dificultaba la remoción de la capa reflectante.

4.8 EFICIENCIA DE CADA SOLVENTE ORGÁNICO UTILIZADO EN LA METODOLOGÍA VINYLOOP

La Tabla 10 muestra los resultados basados en el Anexo 11 que se obtuvieron en la eficiencia de cada solvente en los 25, 50 y 75 gramos utilizados en todos los ensayos.

TABLA 10.
EFICIENCIA TOTAL DE CADA SOLVENTE EN LOS 25, 50 Y 75 GRAMOS.

Gramos (g)	Acetona			Acetato de etilo		
	Peso teórico láminas (g)	Peso láminas removidas (g)	Eficiencia (%)	Peso teórico láminas (g)	Peso láminas removidas (g)	Eficiencia (%)
25	5,51	4,54	82,41	5,51	5,62	100
50	11,01	10,05	91,32	11,01	9,42	85,54
75	16,51	14,95	90,55	16,52	15,50	93,81
TOTAL	33,03	29,54	89,43	33,04	30,54	92,43

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Para los 25 gramos trabajados con acetona existe un porcentaje de eficiencia del 82,41%, mientras que con el acetato de etilo se tiene 100%. Para los 50 gramos se tiene un porcentaje de eficiencia del 91,32% con acetona y con acetato de etilo se tiene el 85,54%. Para los 75 gramos se obtuvo el 90,55 % con acetona y con acetato de etilo un 93,81% de eficiencia. Tomando en cuenta estos valores se tiene que el acetato de etilo tiene mayor eficiencia para los 25 gramos y 75 gramos, mientras que la acetona tiene mayor eficiencia para los 50 gramos.

Las muestras de 25, 50 y 75 gramos tenían diferentes tipos de discos compactos como Blu Ray y originales, y a pesar de que los solventes si actuaron en la parte metálica no se llegó al objetivo de separación, es por esta razón que existieron variaciones en la eficiencia.

En base a estos resultados, el acetato de etilo a nivel global tiene una eficiencia de 92,43%, mientras que la acetona tiene 89,43%, por lo que se puede decir que el acetato de etilo es el solvente más eficiente en la metodología Vinyloop.

En estudios realizados para la recuperación de aluminio de los empaques tipo Blister se obtuvo que utilizando acetona al 98% de pureza, el porcentaje de eficiencia del proceso de separación por 180 minutos con calentamiento fue de 80,41% (Erazo, 2015). Mientras que, en esta experimentación, el proceso de separación utilizando acetona al 99,5% de pureza, se obtuvo eficiencias superiores, siendo la mayor 91,32% en la remoción de láminas metálicas en 50 gramos de pedazos de discos compactos por 24 horas.

Lo que significa que a pesar de que el grado de pureza del solvente no sea el mismo en las dos investigaciones, no interfiere en los resultados obtenidos, ya que como se vio, se puede realizar varias reutilizaciones sin afectar los resultados. Sin embargo, se observó que el tiempo de exposición y el calentamiento pueden ser variables esenciales para la separación de la lámina metálica con la lámina plástica.

4.9 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La Tabla 11 presenta los costos del acetato de etilo y acetona por los 2,4 litros utilizados de cada solvente orgánico. Los cálculos correspondientes se presentan en el Anexo 2.

TABLA 11.
COSTOS DE ACETONA Y ACETATO DE ETILO UTILIZADOS.

Solvente orgánico	Volumen utilizado (L)	Costos (\$)
Acetato de etilo	2,4	60.43
Acetona	2,4	36,83

FUENTE: Proforma Novachem, 2016

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

El acetato de etilo tiene un costo de \$60,43, mientras que la acetona \$36,83. Comparando estos valores se tiene que el acetato de etilo es más costoso que la acetona.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que tanto la acetona y el acetato de etilo pueden ser reutilizados las veces que sean necesarias sin influir en los resultados de eficiencia dentro de la metodología Vinyloop, y que ambos solventes pueden pasar por un proceso de destilación, lo que indica que su costo puede ser relativamente elevado o económico dependiendo de la manera en que se va a realizar la experimentación.

La Tabla 12 muestra el costo del hidróxido de sodio utilizado en la lixiviación.

TABLA 12.

COSTO DEL HIDRÓXIDO DE SODIO UTILIZADO EN LA LIXIVIACIÓN

Costo lixiviación		
Reactivo	Cantidad (g)	Costo (\$)
Hidróxido de sodio	12	0,31

FUENTE: PROFORMA EMLAB REPRESENTACIONES, 2018

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

La Tabla 13 presenta los costos de energía que cada equipo requiere para su utilización.

TABLA 13.

COSTOS DE ENERGÍA DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA CALCINACIÓN Y FUSIÓN.

Equipo	Potencia horno (kW)	Precio kW/h (\$)	Precio kW por 2 horas (\$)
Mufla	1,8	0,1615	0,3
Horna	15	1,3455	2,7

FUENTE: Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2018

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

Para el horno se calculó un valor de \$2,7 el kilovatio por las dos horas que el equipo estuvo en funcionamiento durante la fusión para la obtención del doré. Para la mufla se obtuvo un valor de \$0,3 durante la calcinación de 8,26 g de láminas metálicas.

La Tabla 14 muestra los costos de los reactivos de la carga fundente utilizada en los cuatro ensayos de fusión.

TABLA 14.
COSTOS CARGA FUNDENTE

Costos de ensayo de fusión		
Reactivos	Cantidad (g)	Costo (\$)
Litargirio	40	0,34
Sílice	12	0,02
Carbonato de sodio	40	0,07
Nitrato de potasio	3	0,01
Bórax	30	0,05
Harina	3	0,03
	Total	0,51

FUENTE: PROFORMA MINASUR, 2018

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

La Tabla 15 muestra los costos totales de los procesos realizados en la experimentación.

TABLA 15.
COSTOS TOTALES POR PROCESO

Proceso	Costos	
	Acetona	Acetato de etilo
Metodología Vinyloop	36,83	60,43
Lixiviación		5,04
Calcinación		0,30
Fusión		3,21
Total	45,38	68,98

ELABORACIÓN: Moncayo, A. Vázquez, V., 2018

En función de los resultados con mayor eficiencia en cada proceso, en la metodología Vinyloop se seleccionó los 75 gramos de discos compactos por cada 300 ml de solvente, y para la fusión se tomó en cuenta las láminas metálicas calcinadas que fueron con los que se obtuvo un doré con mayor peso.

Si se realiza un análisis económico por proceso, se tiene que para la metodología Vinyloop se necesita \$36,83 si se trabaja con 2400 ml de acetona y \$60,43 en el caso 24000 ml acetato de etilo. En la lixiviación de las láminas metálicas obtenidas en la metodología Vinyloop se requiere \$5,04; para la calcinación de estas láminas se necesitan de \$0,30, tomando en cuenta el costo por kilovatio-hora de la mufla. En la fusión para la obtención del doré se requiere de \$3,21, teniendo en cuenta el costo de energía del horno y los reactivos que se utilizaron.

Además, se debe tomar en cuenta el salario de las dos personas que se encargarán de llevar a cabo el proceso, denominada Jefe de Fundición, y el analista de laboratorio, los cuales conforme a las tablas de salarios mínimos sectoriales del año 2018 establecido por el Ministerio del trabajo, serían de \$542,78 y \$397,8 respectivamente, obteniendo como valor total salarial \$1483,4 (Ministerio del Trabajo, 2018).

Unificando estos valores se tiene que a partir de 113 CDs, se obtiene un doré de 0,57 g a un costo de \$1528,8 utilizando acetona y un doré de 0,59 g a \$1552,4 utilizando acetato de etilo (Anexo 12).

Comparando estos valores con la extracción de plata en la minería se tiene que de 19710 toneladas de mineral, se generan apenas 22 kilos de plata (Redacción, 2007). Por lo que aplicando esta metodología para la obtención del mismo peso, se necesitan de 64 toneladas de discos compactos tratados con acetona y 62 toneladas con acetato de etilo (Anexo 13).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El disco compacto está compuesto en un 98% de policarbonato y un 2% de lámina metálica que conforme al análisis LIBS presentaron titanio, aluminio y plata, siendo los discos compactos grabables y regrabables lo que tienen plata.

El acetato de etilo fue el solvente que obtuvo más eficiencia para la separación de las láminas metálicas del policarbonato con un 92,43%.

Los grupos funcionales de la cadena del policarbonato no cambiaron después de aplicar la metodología Vinyloop. Las láminas metálicas presentaron 8,20 % de plata, 1,84% de aluminio y 22,36% de titanio.

Previo a la lixiviación, el ensayo de fusión permitió obtener a partir de las láminas metálicas de la metodología Vinyloop, un doré de 98,54% de plata y 1,46% de aluminio.

El proceso de lixiviación permitió adquirir un doré de plata de mayor pureza, logrando conseguir un doré de 99,2% de plata y un 0,8% de aluminio, según los resultados del análisis MEB.

El costo de producción, a partir de 113 CDs permite obtener utilizando acetona un doré de 0,57 g a \$1528,8 mientras que con acetato de etilo, es posible obtener un doré de 0,59 g a \$1552,4

5.2 RECOMENDACIONES

Realizar una preclasificación para descartar los discos compactos Blu Ray con los cuales no se logró el objetivo de separación de las láminas metálicas y el policarbonato, logrando así una mayor eficiencia en el proceso.

Validar el principio de la metodología Vinyloop para periodos de tiempo menores a 24 horas, con el fin de acelerar el proceso y disminuir la exposición de los solventes al ambiente.

Aplicar la metodología Vinyloop con trozos de discos compactos mayores a 2x2 cm, para poder separar de mejor manera las láminas metálicas del policarbonato sin que la eficiencia del proceso se vea alterada.

Seleccionar un envase herméticamente cerrado o buscar un sustituyente del parafilm, para disminuir la volatilización de los solventes e idear un sistema de recuperación para las posibles pérdidas que se puedan dar durante el proceso.

El policarbonato obtenido después de aplicar la metodología Vinyloop debe reposar por más de 24 horas con el fin de que el solvente absorbido se volatilice en su totalidad.

En caso de querer reutilizar el policarbonato, se debe realizar análisis de las propiedades del mismo, ya que con los resultados obtenidos en la Espectrofotometría de Infrarrojo por Transformadas de Fourier no es posible concluir que dicho polímero pueda ser reutilizado.

Realizar una investigación para la recuperación del titanio, ya que con la metodología propuesta no fue posible recuperar dicho metal.

BIBLIOGRAFÍA

- Abadal, E. (2001). *Sistemas y servicios de información digital*. Gijón, España. Trea.
- Aldabe, S. Aramendia, P. (2004). *Química 2. Química en acción*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones Colihue SRL
- Applied Spectra. (2004). *What is LIBS?*. Recuperado de: <https://appliedspectra.com/technology/libs.html>
- Atkins, P. Jones, L. (2006). *Chemical Principles. The Quest for Insight*. Madrid, España: Médica Panamericana
- ATSDR. (2016). *Acetone*. Georgia, Estados Unidos.
- Bermejo, M. (2018). *Fotocatálisis y su capacidad descontaminante (tesis de pregrado)*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Billmeyer, F. (1978). *Ciencia de los Polímeros*. (1era. ed.). Barcelona, España: Reverté.
- Bitcoin. (2008). *Asi se hace, fabricación de un Cd*. [Video file]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=67QID4Q7rOY>
- Bolzoni, L., Esteban, P., Gordo, E., Ruiz, E. (2011). *Introducción al procesado pulvimetalúrgico del titanio*. *Revista de Metalurgia*, 47(2), 169-188. doi: 10.3989/revmetalmadrid.0943
- Bruker. (2018). *EVA Software- The next era in phase analysis*. Recuperado de <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/xrd-software/eva/overview.html>
- Bruker. (2018). *Software TOPAS*. Recuperado de <https://www.bruker.com/es/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/xrd-software/topas.html>
- Castro, G. (2012). *¿QUE ES EL TITANIO? SU EXTRACCIÓN EN CHIAPAS Y GUATEMALA*. Recuperado de http://otrosmundoschiapas.org/docs/escaramujo/escaramujo628_que_es_titanio_extraccion_chiapas_guatemala.pdf

- CCM. (2018). CD, CD de audio y CD-ROM. Recuperado de: <https://es.ccm.net/contents/370-cd-cd-de-audio-y-cd-rom>
- Cederika. (2009). Reciclaje y reciclado de dvds, cds y discos, destrucción de cd. Recuperado de http://www.cederika.com/index.php?option=com_content&task=view&id=179&Itemid=301
- Chemical Safety Facts. (2018). Acetona. Washington, Estados Unidos: American Chemistry Council.
- Cortés, A., Erazo, A., Gómez, F. (2015). Reutilización de discos compactos desechados en el cauce de la quebrada el Mulato, ubicada en el corregimiento de las mesas, Municipio Tablón-Nariño (tesis de pregrado). Fundación Universitaria Los Libertadores, San Juan de Pasto, Colombia.
- Cortés, H. Martínez, P. Valencia, H. (2006). Fundamentos de Cristalografía. Quindío, Colombia: Elizcom
- Das, S., LLC, P., Green, J., Kaufman, J. (2010). Aluminum Recycling: Economic and Environmental Benefits. *Light Metal Age. Jom*, 62(2), 23-26.
- De la Llata, M. (2001). Química Inorgánica. Ciudad de México, México: Editorial Progreso.
- Dud'a, R. Rejl, L. (2004). Atlas ilustrado de los minerales. Madrid, España: Susaeta Ediciones
- EFE. (2010). El policarbonato plástico se degrada en el medio ambiente. Recuperado de <https://www.informador.mx/Tecnologia/El-policarbonato-plastico-se-degrada-en-el-medio-ambiente-20100324-0158.html>
- Electrónica y Servicio. (2014). Teoría y servicio- Reproductores de DVD multiformato y sistemas de teatro en casa. Ciudad de México, México: México Digital Comunicación
- Elgegrena, M. Tiravantia, G. Ortiza, B. Oteroa, M. Wagnerb, F. Cerróna, D. Nakamatsu, J. (2012). Chemical recycling of plastic wastes. *Sociedad Química del Perú*. 1. 2-3.
- Elías, X. Jurado, L. (2012). Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración: Reciclaje de residuos industriales. Madrid, España: Díaz de Santos.

- Endara, D. (2008). (Tesis de Pregrado). *Recuperación del aluminio de los empaques usados por la industria de alimentos y farmacéutica*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Erazo, C. (2015). (Tesis de Pregrado). *Diseño de una planta de recuperación de aluminio de los empaques tipo Blister usados por la industria farmacéutica*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ferplast. (2018). *Polycarbonato compacto*. Recuperado de: <https://www.plasticosferplast.com/materiales/polycarbonato/>
- Fuentes, X. Castiñeiras, M. Queralto, J. (1997). *Bioquímica clínica y patología molecular, Volume 1*. Madrid, España: Revertè.
- Gadea, R., Romano, D., Santos, T. (2008). *Sustitución de sustancias disolventes peligrosas*. Recuperado de: <http://istas.net/descargas/guia%20disolventes.pdf>
- Gae, C. (2015). *Método de obtención*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/cgaetelabrana/titanio-56052343>
- Garcés, L., Mejía, E., Santamaría, J. (2015). *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 83-91. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/695/69511013/>
- García, A. (2006). *Pequeño Diccionario de Diseño Gráfico y Fotografía*. AGBDesign
- GE3C. (2017). *Curso sobre aplicaciones de la difracción de polvo en Granada*. Recuperado de: <https://ge3c.org/2017/05/31/curso-sobre-aplicaciones-de-la-difraccion-de-polvo-en-granada/>
- González, M. (1997). *Propiedades químicas y propiedades físicas de los polímeros*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de la manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Ciudad de México, México: Prentice-Hall.
- Grosvenor, D. (1976). *La tabla periódica*. Barcelona, España:Reverte.
- Hermida, A., Iglesias, I. (2014). *Gestión auxiliar de reproducción en soporte convencional o informático*. España: Ideas Propias

- IBM KnowledgeCenter. (s.f). ISO 9660. Recuperado de https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/ssw_ibm_i_72/rzam4/rzam4iso9660.htm
- Instituto de Física. (2018). Difracción de Rayos X. Recuperado de: <http://fisica.uc.cl/servicios.html#equipamiento-y-software-de-an%C3%A1lisis>
- Kalpakjian, S., Schmid, S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (4ta. ed). Monterrey, México: Pearson
- Kyung, K., Echarri, W., Llorente Juan. (2013). *SERVICIO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y MICROANÁLISIS DEL LIMF – FACULTAD DE INGENIERÍA – UNLP*. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/38238/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Landscapeforms. (2011). *Policarbonato*. Recuperado de: https://www.landscapeforms.com/es-mx/LFI%20Material%20Tech%20Sheets/LF_Polycarb_Tech_es-mx.pdf
- Larkin, P. (2010). *INFRARED AND RAMAN SPECTROSCOPY*. Connecticut, USA: Elsevier.
- Lenntech. (2018). *Plata- Ag*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ag.htm>
- Márquez, P. Oliva, J. Manjavacas, C. (2010). *Montaje y mantenimiento de equipos*. España: Paraninfo.
- Martín, E. (2015). *Principales aportaciones de la técnica LIBS al estudio de biomateriales*. MoleQla, 3-1.
- Mingarro, F. (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Madrid, España: Complutense.
- Morán, R. (2013). *Preguntas y respuestas sobre minería*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Greenpeace.
- Noria Corporation. (2014). *Espectrometría infrarroja por Transformadas de Fourier*. Recuperado de: <http://noria.mx/lublearn/espectrometria-infrarroja-por-transformadas-de-fourier/>

- Noticias de Taiwán. (2003). Anuncian programa de reciclaje de discos compactos. Recuperado de: <https://noticias.nat.gov.tw/news.php?unit=95,106,115&post=82534>*
- Nucleotécnico1. (2013, mayo 30). El CD/DVD como funciona [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=Vv4EqePYt9I>*
- PALRAM. (2010). Chemical Resistance of Polycarbonate Products at Room Temperature. España.*
- Petroquímica. (2009). Solventes industriales. Recuperado de: <http://grupopetroquimica.blogspot.com/2009/04/acetato-de-etilo.html>*
- Piminchumo, Timmy. (2016). Fundición de oro. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/TimmyManuelPiminchum/fundiciondeoro>*
- Planetica. (2011). Clasificación de los residuos. Recuperado de: <http://www.planetica.org/clasificacion-de-los-residuos>*
- Quiminet. (2012). Características del acetato de etilo. Recuperado de: <https://www.quiminet.com/articulos/caracteristicas-del-acetato-de-etilo-2685559.htm>*
- Quiminet. (2006). Todo sobre el policarbonato. Recuperado de: <https://www.quiminet.com/articulos/todo-sobre-el-policarbonato-pc-4422.htm>*
- Recimax. (2018). RAEE. Recuperado de: <http://www.reciclaajerecimax.com/oferta/>*
- Redacción. (2007). Minería: Esfuerzo que vale oro. Recuperado de: <https://vanguardia.com.mx/mineriaesfuerzoquevaleoro-45814.html>*
- Redacción Pu. (2003). Reciclar CDs. Interempresas. 1. 2-3.*
- Remtavares. (2010). Contaminación de las aguas costeras por plata. Madrid. Recuperado de: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/10/22/131528>*
- RetroCD. (2018). El Primer Programa posconsumo de CDs DVDs en América Latina. Recuperado de: <https://www.aterciopelados.com/retrocd>*
- Rosado, Jhoany. (2017). Mejoramiento del análisis químico para minerales de oro (tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.*

- Segura, D., Noguez, R., Espín, G. (2007). *Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables*. *Biotecnología*, 14(1), 361-372.
- Senner, A. (1994). *Principios de electrotecnia*. Barcelona, España: Editorial Revertè
- Seymour, R. (2002). *Introducción a la Química de los Polímeros*. Madrid, España: Revertè
- Sinc. (2008). *Extracción "limpia" del dióxido de titanio, uno de los minerales más blancos*. Recuperado de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Extraccion-limpia-del-dioxido-de-titanio-uno-de-los-minerales-mas-blancos>.
- Shurvell, H. (2002). *Spectra-Structure Correlations in the Mid-and Far-infrared*. Ontario, Canadá: John Wiley & Sons Ltd.
- Spectro Al. (Productor). (2011). *SPECTRO Hybrid Optic*. [Youtube]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?time_continue=4&v=cCEtSQP7Fcs
- Suasnavas, D. (2017). *Degradación de materiales plásticos "PET" (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión. (tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Católica, Quito, Ecuador.
- Tecnológico de Monterrey. (2018). *Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)*. Recuperado de http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-862/Lecturas/SEM_ICP.pdf
- Terra. (2005). *Reciclaje de CDs y DVDs*. Recuperado de: <http://www.terra.org/categorias/articulos/reciclaje-de-cds-y-dvds>
- The Economist. (2007). *The price of virtue*. (Artículo científico). Recuperado de: <http://www.economist.com/node/9302727>
- Toapanta, Guido. (2011). *Análisis de oro y plata de concentrados gravimétricos auríferos mediante ensayo al fuego utilizando cobre como colector (tesis de grado)*. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.
- Torellas, R. (2012). *La exposición del aluminio y su relación con el ambiente y la salud*. *Udistrital. Tecnogestión*, 9(1).
- UNAM. (2016). *Acetato de etilo*. Recuperado de <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2017/05/HDS-Acetato-de-etilo-NOM-018-2015-MARY-MEAG-DGTF-Hoja-de-Datos.pdf>

- UNED. (2008). *Blu-Ray*. Recuperado de:
http://observatoriotecedu.uned.ac.cr/media/blu_ray.pdf
- Universia. (2012). *29 años atrás se lanzó por primera vez el primer disco compacto al mercado*. Recuperado de <http://noticias.universia.es/en-portada/noticia/2012/02/28/914088/29-anos-atras-lanzo-primer-vez-primer-disco-compacto-mercado.html>
- Universidad de Alicante. (2016). *Servicios Técnicos de Investigación*. Recuperado de: <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x.html>
- Vertmonde. (2018). *Reciclaje de Basura Electrónica: Lecciones aprendidas de la Naturaleza*. Recuperado de: <http://www.vertmonde.com/reciclaje-de-ree.html>
- Villar, Rafael. (2009). *Lixiviación alcalina con hidróxido de sodio de un sulfuro Pb-Zn parcialmente oxidado y recuperación de los valores metálicos por cementación con aluminio (tesis de grado)*. Universidad Nacional Autónoma De México, Ciudad de México, México.
- Vinyloop. (2013). *The Vinyloop Process*. Recuperado de:
<http://www.vinyloop.com/en/>
- Walton, H. Reyes, J. (1983). *Análisis químico e instrumental moderno*. Madrid, España: Revertè.
- Weissermel, K. Arpe, H. (1981). *Química orgánica industrial*. Barcelona, España: Reverte.
- Winkler. (2007). *Ficha de Seguridad de la Acetona*. Recuperado de <http://www.lco.cl/operations/safety-and-health/technical-info/safety-data-sheets/Ficha%20seguridad%20Acetona.pdf>

ANEXOS

**ANEXO 1.
PROFORMA REACTIVOS**

TABLA 6.1

PROFORMA NOVACHEM -ACETONA Y ACETATO DE ETILO

PROFORMA NOVACHEM			
ARTÍCULO	CANT. (LTRS)	DESCRIPCIÓN	V.TOTAL
E1454	4	ETILO ACETATO ACS	89,92
A184	4	ACETONA ACS 99.5%	54,8

TABLA 6.2

PROFORMA EMLAB REPRESENTACIONES- HIDRÓXIDO DE SODIO

PROFORMA EMLAB REPRESENTACIONES			
ARTÍCULO	CANT. (KG)	DESCRIPCIÓN	V.TOTAL
HAHIDROSO2.5KG	2.5	HIDRÓXIDO DE SODIO	63,84

TABLA 6.3

PROFORMA MINASUR- CARGA FUNDENTE

PROFORMA MINASUR			
ARTÍCULO	CANT. (KG)	DESCRIPCIÓN	V.TOTAL
O38621	1	LITARGIRO	8,40
038758	1	SÍLICE	1,68
038951	1	CARBONATO DE SODIO	1,68
000057	1	NITRATO DE POTASIO	3,36
000039	1	BÓRAX	1,68

ANEXO 2.
CÁLCULO DEL COSTO DE ACETONA Y ACETATO DE ETILO

El cálculo del costo de acetona se realizó de la siguiente manera:

Dónde:

Volumen utilizado (L)=2,4

Volumen referencial (L)=4

Costo volumen referencial acetona + I.V.A (\$) = 61,38

$$Acetona = \frac{2,4 * 61,38}{4}$$

$$\$Acetona = 36,83$$

El cálculo del costo del acetato de etilo se realizó de la siguiente manera:

Dónde:

Volumen utilizado (L)=2,4

Volumen referencial (L)=4

Costo volumen referencial acetato de etilo + I.V.A (\$) = 100, 71

$$\$Acetato de etilo = \frac{2,4 * 100,71}{4}$$

$$\$Acetato de etilo = 60,43$$

ANEXO 3. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN PORCENTUAL PROMEDIO DEL DISCO COMPACTO

El cálculo de la composición porcentual promedio del disco compacto se realizó de la siguiente manera:

Dónde:

P1 es el peso del disco compacto 1 (g)

P2 es el peso del disco compacto 2 (g)

PC1 es el peso del policarbonato del disco compacto 1 (g)

PC2 es el peso del policarbonato del disco compacto 2 (g)

%PC1 es el porcentaje de policarbonato que contiene el disco compacto 1

%LM1 es el porcentaje de la lámina metálica que contiene el disco compacto 1

%LM2 es el porcentaje de la lámina metálica que contiene el disco compacto 2

$$\%PC1 = \frac{PC1 * 100}{P1} = \frac{15,42 * 100}{15,16} = 98\%$$

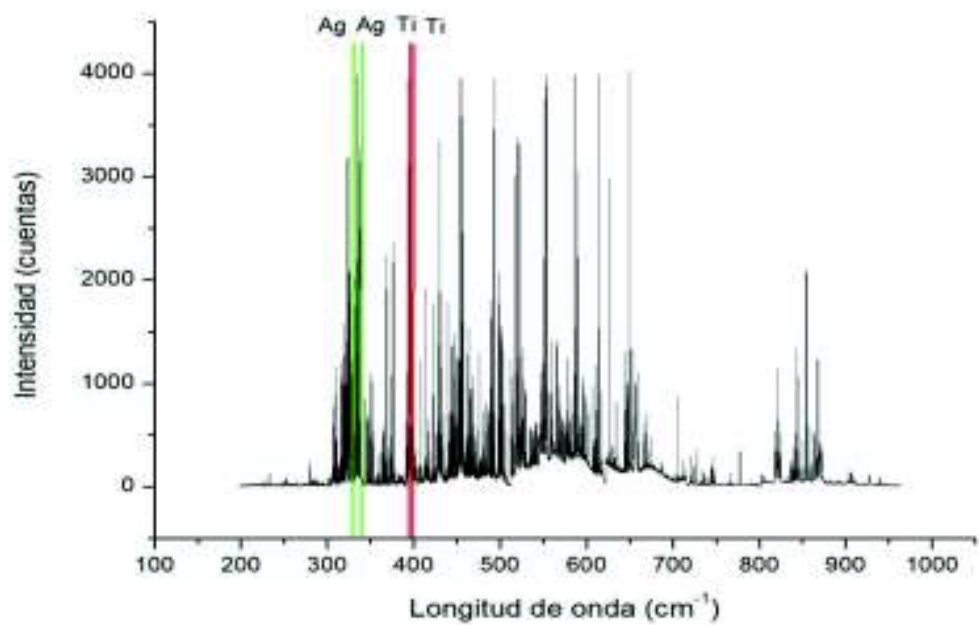
$$\%PC2 = \frac{PC2 * 100}{P2} = \frac{15,40 * 100}{15,13} = 98\%$$

$$\%LM1 = 100 - \%PC1 = 2\%$$

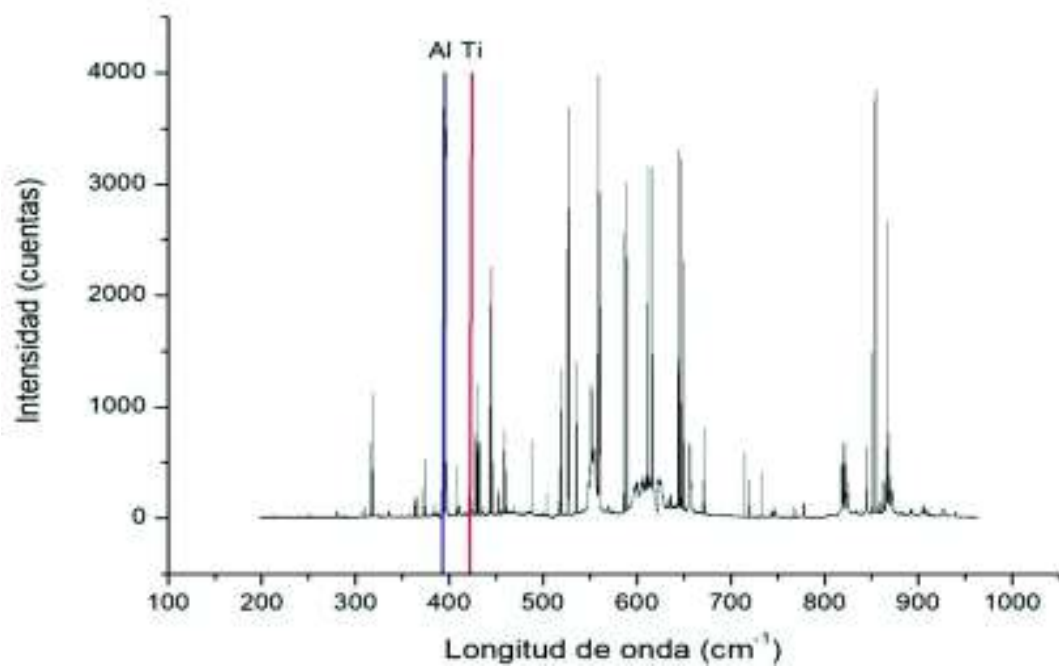
$$\%LM2 = 100 - \%PC2 = 2\%$$

ANEXO 4.
DIFRACTOGRAMAS DEL ANÁLISIS LIBS

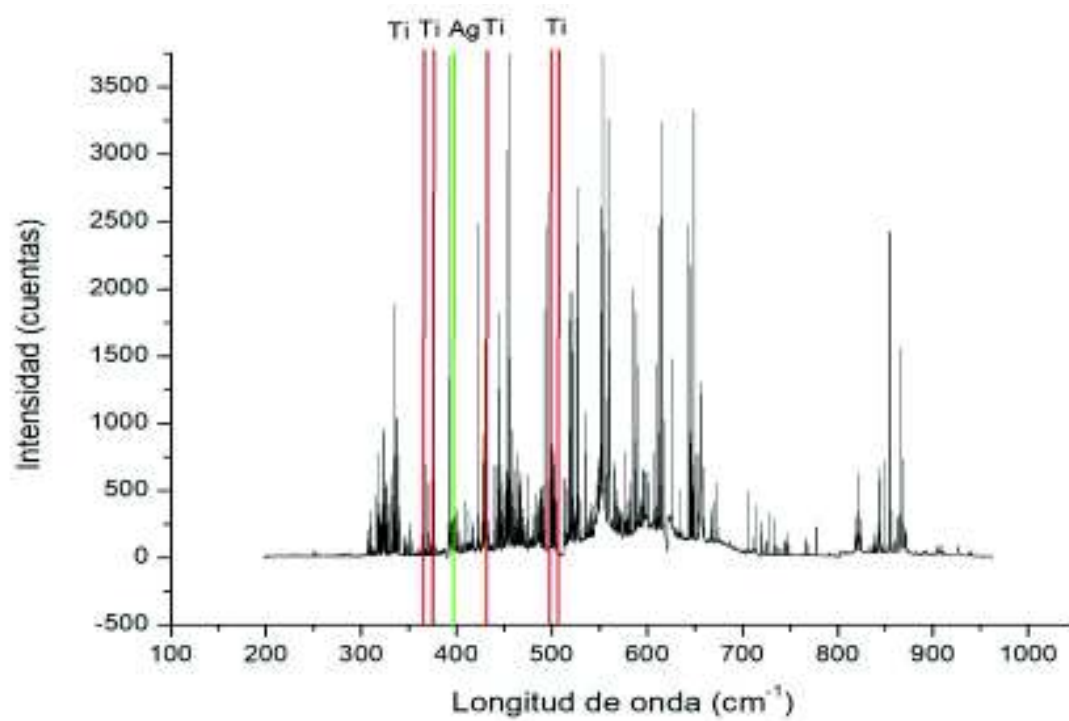
GRÁFICA 6.1
DIFRACTOGRAMA DEL CD-R (DVD)



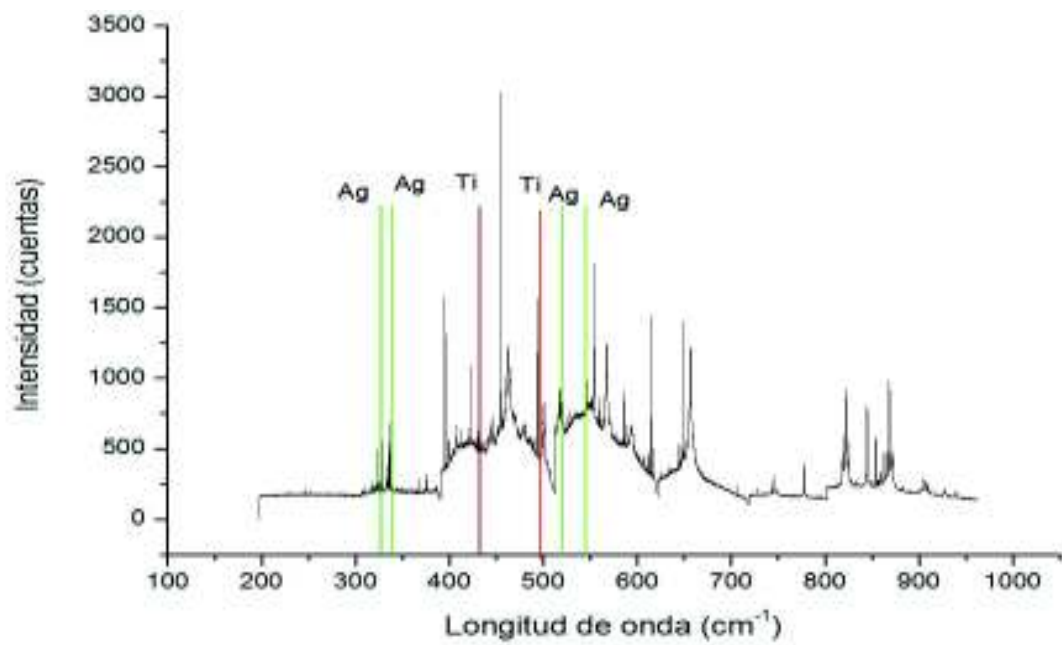
GRÁFICA 6.2
DIFRACTOGRAMA DEL CD-R (CD)



GRÁFICA 6.3
DIFRACTOGRAMA DEL CD-R (Blu Ray)



GRÁFICA 6.4
DIFRACTOGRAMA DEL CD-RW



ANEXO 5. RESULTADOS OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS LÁMINAS METÁLICAS EN DIFRACCIÓN DE RAYOS X



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Srtas. Alyson Moncayo y Vanesa Vazquez / Ph.D. Diana Endara.
 No. Referencia : RM- 9277
 Fecha : 27 - 04 - 2018
 Muestras recibidas : Dos muestras sólidas denominadas:
 Muestra 1 : CO 1 (Código Registrado)
 Muestra 2 : LAM 1 (Código Registrado)

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Difracc plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Contenido (%)	Muestra 2 Contenido (%)
Rutilo	TiO ₂	51	30
Alabandita	MnS	15	--
Baritina	BaSO ₄	11	--
Calcita magnesiana	(Ca,Mg)CO ₃	8	--
Anhidrita	CaSO ₄	6	--
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	3	2
Calcita	CaCO ₃	2	16
Cuarzo	SiO ₂	2	--
Wollastonita	Ca ₃ (Si ₃ O ₉)	2	--
Brucita	Mg(OH) ₂	--	34
Talco	Mg ₂ Fe(OH) ₂ Si ₄ O ₁₀	--	18

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. Las muestras presentan material amorfo no cuantificado por esta técnica de análisis.


 Ing. Alicia Guevara PhD.
 Jefe de Departamento


 MSc. Evelyn Criollo
 Jefe de Laboratorio


 Ing. Kleber Collantes
 Responsable

ANEXO 6. ANÁLISIS OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS LÁMINAS METÁLICAS EN FLUORESCENCIA DE RAYOS X



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**

Resultados de Análisis

Solicitante: Allyson Moncayo y Vanessa Vázquez / Ing. Diana Endara PhD.

Referencia: RM - 9277

Fecha: 04/05/2018

Muestras recibidas: Una muestra sólida denominada:

Muestra 1: CNI (*Código Registrado*)

Resultados Análisis Fluorescencia de Rayos X

El análisis químico de las muestras se determinó en el equipo de Fluorescencia de rayos X S8 Tiger, con el programa Spectra Plus. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis:

Elemento	Muestra 1
	Contenido (%)
Ti	22,36
Ba	11,58
Si	8,88
Ag	*
Mg	8,20
Mg	3,10
Br	2,92
Ca	2,74
S	1,97
Al	1,84
Cu	0,47
Zn	0,39
Na	0,33
Pb	0,26
Fe	0,25
K	0,25
As	0,20
P	0,15
Sr	0,15
Pd	0,14
Zr	0,12
Cl	0,08
Co	0,01
Nb	0,01

*Este valor debe ser confirmado mediante ensayo al fuego.

ANEXO 7.
ANÁLISIS OBTENIDOS AL ANALIZAR LAS SOLUCIONES DEL PROCESO DE
LIXIVIACIÓN MEDIANTE ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



RESULTADO DE ANALISIS

Solicitante: Alyson Moncayo / Vanessa Vázquez
Referencia RM-9277
Fecha: 27-08-18
Muestra: Dos muestras líquidas

Muestra	Determinación	Resultados
SF	Titanio	2,42 mg/L
SL	Titanio	0,86 mg/L

Límites de detección: Titanio = 0.01 mg/L.


 Ing. Alicia Guevara PhD.
 Jefe de Departamento




 MSc. Evelyn Criollo
 Jefe de Laboratorio

ANEXO 8. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X DEL PRECIPITADO DE LA LIXIVIACIÓN



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Srtas. Alyson Moncayo y Vanesa Vazquez / PhD. Diana Endara.
 No. Referencia : RM- 9277
 Fecha : 26 - 09 - 2018
 Muestras recibidas : Una muestra sólida denominada:
 Muestra I : ml (*Código Registrado*)

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Mineral	Fórmula	Muestra I Contenido (%)
Natrite	Na_2CO_3	77
Rutile	TiO_2	11
Halite	NaCl	8
Grossular hydroxylan	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$	2
Anhydrite	CaSO_4	1
Coesite	SiO_2	1

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. La muestra presenta gran cantidad de material amorfo no cuantificado por esta técnica de análisis.


 Ing. Alieta Guevara PhD.
 Jefe de Departamento




 MSc. Evelyn Criollo
 Jefe de Laboratorio


 Ing. Kliéber Collantes
 Responsable

ANEXO 9.
EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES PARA CADA SOLVENTE

TABLA 6.4
EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES PARA EL ACETATO DE ETILO

PESO (g)	ACETATO DE ETILO			
	25	50	75	TOTAL
Primer ensayo	1,14	0,94	1,64	3,72
Primera reutilización	0,57	0,73	1,11	2,41
Segunda reutilización	0,57	0,73	1,11	2,41
Tercera reutilización	0,37	0,88	1,14	2,39
Cuarta reutilización	0,42	0,80	1,15	2,38
Quinta reutilización	0,46	0,97	1,73	3,17
Sexta reutilización	0,50	1,14	1,90	3,54
Séptima reutilización	0,41	0,68	1,11	2,20
Octava reutilización	0,37	0,75	1,10	2,22
Novena reutilización	0,37	0,92	1,88	3,17
Décima reutilización	0,44	0,89	1,62	2,95
TOTAL	5,62	9,42	15,50	30,55

TABLA 6.5
EFICIENCIA DE LAS REUTILIZACIONES PARA LA ACETONA

PESO (g)	ACETONA			
	25	50	75	TOTAL
Primer ensayo	0,36	0,51	1,26	2,12
Primera reutilización	0,35	1,12	1,49	2,97
Segunda reutilización	0,35	1,12	1,49	2,97
Tercera reutilización	0,38	0,66	1,17	2,22
Cuarta reutilización	0,44	0,87	1,27	2,58
Quinta reutilización	0,27	0,93	1,41	2,61
Sexta reutilización	0,70	0,93	1,29	2,92
Séptima reutilización	0,34	1,42	1,51	3,27
Octava reutilización	0,36	0,70	1,21	2,27
Novena reutilización	0,34	0,75	1,32	2,40
Décima reutilización	0,65	1,04	1,53	3,22
TOTAL	4,54	10,05	14,95	29,54

ANEXO 10.
EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE PARA CADA
SOLVENTE ORGÁNICO

TABLA 6.6.
EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE PARA EL
ACETATO DE ETILO

ACETATO DE ETILO				
REUTILIZACIONES	Peso Cds (g)	Remoción (g)	Peso teórico lámina metálica (g)	%de remoción de la capa reflectante
Primer ensayo	150,34	3,72	3,01	100
Primera reutilización	150,21	2,41	3,00	80,09
Segunda reutilización	150,35	2,41	3,01	80,01
Tercera reutilización	150,44	2,39	3,01	79,35
Cuarta reutilización	150,06	2,38	3,00	79,31
Quinta reutilización	150,13	3,17	3,00	100
Sexta reutilización	150,09	3,54	3,00	100
Séptima reutilización	150,18	2,2	3,00	73,23
Octava reutilización	150,14	2,22	3,00	74,02
Novena reutilización	150,36	3,17	3,01	100
Décima reutilización	150,16	2,95	3,00	98,34
TOTAL	1652,45	30,55	33,05	92,44

TABLA 6.7

EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE LA CAPA REFLECTANTE PARA LA ACETONA

ACETONA				
REUTILIZACIONES	Peso Cds (g)	Remoción (g)	Peso teórico lámina metálica (g)	%de remoción de la capa reflectante
Primer ensayo	149,97	2,12	3,00	70,71
Primera reutilización	150,21	2,97	3,00	98,91
Segunda reutilización	150,14	2,97	3,00	98,95
Tercera reutilización	150,07	2,22	3,00	73,87
Cuarta reutilización	150,19	2,58	3,00	85,79
Quinta reutilización	150,21	2,61	3,00	86,92
Sexta reutilización	150,1	2,92	3,00	97,2
Séptima reutilización	150,2	3,27	3,00	100
Octava reutilización	150,27	2,27	3,01	75,4
Novena reutilización	149,78	2,4	3,00	80,15
Décima reutilización	150,14	3,22	3,00	100
TOTAL	1651,27	29,54	33,03	89,43

ANEXO 11.
DATOS DE LOS ENSAYOS DE LA METODOLOGÍA VINYLOOP

TABLA 6.8**PESAJE DE LOS DISCOS COMPACTOS PARA CADA SOLVENTE**

PESO (g)	DISCOS COMPACTOS								
	ACETONA				ACETATO				TOTAL
	25	50	75	TOTAL	25	50	75	TOTAL	
Primer ensayo	25,04	49,93	75,01	149,97	25,05	50,23	75,07	150,34	300,31
Primera reutilización	25,09	50,07	75,05	150,21	25,05	49,97	75,19	150,21	300,42
Segunda reutilización	25,06	50,06	75,02	150,14	25,01	50,09	75,25	150,35	300,49
Tercera reutilización	25,01	50,00	75,05	150,07	25,02	50,23	75,19	150,44	300,50
Cuarta reutilización	25,05	50,05	75,09	150,19	25,05	49,96	75,05	150,06	300,25
Quinta reutilización	25,09	50,03	75,09	150,21	25,07	50,03	75,03	150,13	300,34
Sexta reutilización	25,01	50,05	75,04	150,10	25,01	50,01	75,07	150,09	300,19
Séptima reutilización	25,07	50,10	75,03	150,20	25,07	50,02	75,10	150,18	300,38
Octava reutilización	25,07	50,09	75,11	150,27	25,02	50,04	75,08	150,14	300,40
Novena reutilización	24,95	49,81	75,03	149,78	25,19	50,01	75,16	150,36	300,14
Decima reutilización	25,03	50,08	75,02	150,14	25,10	50,05	75,00	150,16	300,29
TOTAL	275,46	550,27	825,54	1651,27	275,6	550,64	826,18	1652,45	3303,72

TABLA 6.9

PESAJE DEL POLICARBONATO PARA CADA SOLVENTE

PESO (g)	POLICARBONATO								
	ACETONA				ACETATO				TOTAL
	25	50	75	TOTAL	25	50	75	TOTAL	
Primer ensayo	25,23	50,54	76,86	152,63	28,48	52,60	74,14	155,22	307,85
Primera reutilización	25,89	49,99	71,40	147,28	26,04	51,18	76,70	153,91	301,20
Segunda reutilización	25,89	49,99	71,40	147,28	26,04	51,18	82,05	159,26	306,54
Tercera reutilización	25,64	52,66	77,97	156,27	26,84	52,87	78,15	157,86	314,13
Cuarta reutilización	26,36	51,76	78,08	156,19	25,87	51,05	81,46	158,38	314,57
Quinta reutilización	26,41	51,04	76,70	154,15	25,48	51,47	77,13	154,08	308,22
Sexta reutilización	25,25	52,28	77,90	155,43	25,09	51,84	77,87	154,81	310,24
Séptima reutilización	25,15	50,29	76,06	151,50	25,84	52,10	78,30	156,25	307,75
Octava reutilización	25,79	51,23	76,72	153,73	26,10	51,15	79,18	156,43	310,17
Novena reutilización	26,00	51,58	78,12	155,71	26,52	52,80	78,75	158,08	313,78
Decima reutilización	25,46	51,71	78,26	155,43	26,44	46,65	84,28	157,37	312,80
TOTAL	283,07	563,09	839,44	1685,6	288,73	564,89	868,01	1721,64	3407,24

TABLA 6.10.
PESAJE DE LA GOMA Y RESIDUOS PARA CADA SOLVENTE

PESO (g)	GOMA Y RESIDUOS								
	ACETONA				ACETATO				TOTAL
	25	50	75	TOTAL	25	50	75	TOTAL	
Primer ensayo	0,01	0,03	0,02	0,06	0,06	0,06	0,09	0,21	0,27
Primera reutilización	0,02	0,03	0,07	0,12	0,07	0,10	0,18	0,34	0,46
Segunda reutilización	0,02	0,03	0,07	0,12	0,07	0,10	0,18	0,34	0,46
Tercera reutilización	0,04	0,05	0,05	0,14	0,07	0,10	0,11	0,29	0,43
Cuarta reutilización	0,04	0,06	0,06	0,16	0,15	0,10	0,08	0,33	0,49
Quinta reutilización	0,08	0,07	0,11	0,26	0,13	0,19	0,22	0,53	0,79
Sexta reutilización	0,08	0,12	0,10	0,30	0,12	0,19	0,09	0,40	0,70
Séptima reutilización	0,07	0,08	0,10	0,25	0,10	0,16	0,19	0,46	0,71
Octava reutilización	0,12	0,08	0,13	0,33	0,12	0,19	0,22	0,53	0,86
Novena reutilización	0,08	0,09	0,14	0,31	0,10	0,16	0,20	0,46	0,77
Decima reutilización	0,13	0,09	0,13	0,34	0,11	0,19	0,23	0,53	0,87
TOTAL	0,69	0,72	0,96	2,38	1,10	1,53	1,79	4,43	6,80

TABLA 6.11.
PESAJE DEL SOLVENTE ABSORBIDO POR EL POLICARBONATO PARA
CADA SOLVENTE

SOLVENTE ABSORBIDO									
	ACETONA				ACETATO				TOTAL
PESO (g)	25	50	75	TOTAL	25	50	75	TOTAL	
Primer ensayo	0,56	1,16	3,12	4,84	4,63	3,38	0,80	8,81	13,64
Primera reutilización	1,18	1,08		2,26	1,62	2,03	2,80	6,45	8,71
Segunda reutilización	1,20	1,09		2,29	1,67	1,90	8,09	11,66	13,95
Tercera reutilización	1,06	3,37	4,14	8,56	2,26	3,63	4,22	10,10	18,66
Cuarta reutilización	1,79	2,64	4,31	8,73	1,40	2,00	7,64	11,04	19,77
Quinta reutilización	1,66	2,01	3,13	6,80	1,01	2,59	4,05	7,64	14,45
Sexta reutilización	1,02	3,28	4,15	8,44	0,71	3,15	4,80	8,65	17,10
Séptima reutilización	0,49	1,69	2,65	4,82	1,28	2,93	4,51	8,72	13,54
Octava reutilización	1,20	1,92	2,94	6,06	1,58	2,04	5,43	9,05	15,11
Novena reutilización	1,47	2,28	4,55	8,31	1,79	3,87	5,68	11,34	19,65
Decima reutilización	1,21	2,76	4,89	8,85	1,89		11,13	13,03	14,92
TOTAL (g)	12,84	23,27	33,86	69,97	19,82	27,53	59,13	106,49	169,50
TOTAL (ml)	16,29	29,53	42,97	88,79	22,07	30,66	65,85	118,59	-

ANEXO 12. CÁLCULO DEL DORÉ DE PLATA PARA LAS CONDICIONES ÓPTIMAS

En el proceso de la metodología Vinyloop, se tomó la relación de 75g de disco compacto por cada 300 ml de solvente. En base a esto se calculó las láminas metálicas que se obtendrían si las 10 reutilizaciones se hubieran realizado los tres vasos de precipitación con 75 g de discos compactos para cada solvente, conforme a los resultados obtenidos en la tabla 9.

$$\text{Láminas metálicas con acetona} = 14,95 * 3$$

$$\text{Láminas metálicas con acetona} = 44,85 \text{ g}$$

$$\text{Láminas metálicas con acetato de etilo} = 15,5 * 3$$

$$\text{Láminas metálicas con acetona} = 46,5 \text{ g}$$

En el proceso de fusión, se consiguió un mejor resultado cuando las láminas fueron previamente calcinadas, por lo que se tomó el valor obtenido de 0,105 g de doré con 8,26 g de láminas calcinadas.

$$\text{Doré con acetona} = \frac{44,85 \text{ g de laminas metalicas} * 0,105 \text{ g de Doré}}{8,26 \text{ g de laminas metalicas}}$$

$$\text{Doré} = 0,57 \text{ g}$$

$$\text{Doré con acetona} = \frac{46,5 \text{ g de laminas metalicas} * 0,105 \text{ g de Doré}}{8,26 \text{ g de laminas metalicas}}$$

$$\text{Doré} = 0,59 \text{ g}$$

ANEXO 13.
CÁLCULO DE LAS TONELADAS DE DISCOS COMPACTOS PARA LA
OBTENCIÓN DE 22 KILOS DE PLATA

Para poder realizar la comparación entre los 22 kilos de plata que se obtiene en 19710 ton de mineral, se realizó el siguiente cálculo para determinar cuántas toneladas de discos compactos se requerían para obtener los mismos 22 kilos de plata para cada solvente.

$$\text{Ton de Cds con acetato de etilo} = \frac{22 \text{ kg Ag} * 1000 \text{ g Ag} * 1652,45 \text{ g Cds} * 1 \text{ ton Cds}}{1 \text{ kg Ag} * 0,59 \text{ g Ag} * 10^6 \text{ kg de Cds}}$$

$$\text{Ton de Cds con acetato de etilo} = 61,62 \text{ ton de Cds}$$

$$\text{Ton de Cds con acetona} = \frac{22 \text{ kg Ag} * 1000 \text{ g Ag} * 1651,27 \text{ g Cds} * 1 \text{ ton Cds}}{1 \text{ kg Ag} * 0,57 \text{ g Ag} * 10^6 \text{ kg de Cds}}$$

$$\text{Ton de Cds con acetona} = 63,73 \text{ ton de Cds}$$

Donde los 1652,45 g de Cds representa el peso obtenido en el pesaje de los 113 discos compactos utilizados en el proceso Vinyloop con acetato de etilo, mostrado en la Figura 36 y los 1651,27 g de Cds, representa el peso obtenido en el pesaje de los 113 discos compactos utilizados en el proceso Vinyloop con acetona mostrado en la Figura 37.