

**RECUPERACION DE COMPONENTES VALIOSOS A PARTIR DE LUMINARIAS
FLUORESCENTES DESECHADAS**

EMERSON JULIAN GOMEZ VASQUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

**RECUPERACION DE COMPONENTES VALIOSOS A PARTIR DE LUMINARIAS
FLUORESCENTES DESECHADAS**

EMERSON JULIAN GOMEZ VASQUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

WALTER PARDAVE LIVIA

M.Sc. Ingeniería Metalúrgica

Codirector

PEDRO DELVASTO ANGARITA

Doctor. Ingeniería de Materiales

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Las palabras sobran, esto es para ellos:

Mis dos madres Yuth Smith Vásquez Vizcaya, Lucila Sepúlveda López, quienes con su aliento y esfuerzo nunca dejaron de creer en mí, incluso estando a grandes distancias, ellas, una gran motivación, soñando y esperando con ansias el gran día, ver a su pequeño vestir elegante y salir adelante, a mis hermanas y madrina, Pureza Marín Sepúlveda, Eliana Marín Sepúlveda y Yahel Marín Sepúlveda, que con su paciencia, cariño, dedicación y consejos, supieron guiarme por un buen camino y de esa forma nunca perder el rumbo; y a los demás familiares que pusieron su granito de arena para que esto fuera posible.

Un día caí, toque fondo, pensé que todo estaba perdido, apareció ella, me dio la mano, me dijo “ven levántate, todo va a estar bien”, ese día conocí una parte de mí que no había visto antes, a ella, de quien estoy muy agradecido, quien me enseñó valores, quien me levanto y estuvo cuando nadie más lo hizo, ella hace parte de este gran logro, María Fernanda Salas Orozco, el sueño hecho realidad.

Las palabras van y vienen, lo hechos... quienes marcan la diferencia, por tal motivo, este gran logro también va dedicado a todas aquellas personas que nunca creyeron, hoy con la cabeza en alto les digo, lo logre.

Un día imagine, un día me frustre, un día me caí, un día lo desee, un día me levante, un día lo luche, un día lo logre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la universidad Industrial de Santander por la labor prestada durante este largo trayecto que hoy he cruzado y que en algún momento vi inalcanzable.

Infinitas gracias al profesor Pedro Delvasto Angarita, quien me acogió y me dio la mano para que pudiera levantarme luego de sufrir una caída en esta etapa y así poder salir adelante con este proyecto, por su paciencia, su sabiduría, su profesionalismo, el tiempo brindado y la dedicación para hacer lo increíble, lo que nadie se esperaba, gracias totales.

A los técnicos Javier Gaitán, Ambrosio Carrillo y Domingo Carreño, personas gratas, que siempre están dispuestas a ayudar a cambio de nada, enseñan y guían, brindan los conocimientos y experiencia que ayudan a la formación como profesionales y hacen realidad este proyecto.

A los laboratorios de microscopía y difracción de rayos X de la universidad industrial de Santander en la sede del parque Tecnológico Guatiguará, por la labor prestada durante este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES	17
1.1. PROCESOS HIDROMETALURGICOS Y PIROMETALURGICOS PARA RECUPERAR MATERIAS PRIMAS A PARTIR DE LOS DESECHOS DE APARATOS ELECTRICOS Y ELECTRONICOS (RAEE)	17
1.2. PROCESAMIENTO POR TRITURACION AL VACIO DE LUMINARIAS FLUORESCENTES	18
1.3. POSIBILIDADES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DE LUMINARIAS FLUORESCENTES	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. OBJETIVO GENERAL	22
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
3.1. OBTENCION DE LA MUESTRA	23
3.2. SEPARACION DE LA FRACCION METALICA DEL RESIDUO, ANALISIS GRANULOMETRICO DEL VIDRIO Y PROCEDIMIENTO DE LAVADO DEL VIDRIO (LIXIVIACIÓN) CON ÁCIDO CLORHÍDRICO	23
3.3. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL VIDRIO CRUDO Y LAVADO MEDIANTE ANALISIS DE DRX Y SEM DE LA MUESTRA PULVERIZADA	25
3.3.1. Análisis por difracción de rayos X.	26
3.3.2. Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) y EDX de las muestras.	26
3.4. FUNDICION, ESTUDIO METALOGRAFICO DE LAS FRACCIONES METALICAS PRESENTES EN EL RESIDUO, ANALISIS SEM Y EDX	26

3.5. BALANCE DE MASAS Y ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS DE LA OPERACIÓN.....	28
4. RESULTADOS.....	29
4.1. ANALISIS GRANULOMETRICO DE VIDRIO CRUDO Y FRACCIONES METALICAS PROVENIENTES DE LUMINARIAS FLUORESCENTES	29
4.2. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE VIDRIO CRUDO Y VIDRIO LAVADO	31
4.2.1. Análisis SEM y EDX de la muestra pulverizada de vidrio crudo y lavado.	31
4.2.2. Análisis DRX de la muestra pulverizada de vidrio crudo y lavado.	34
4.3. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS CRISTALES DE SAL OBTENIDOS DE LA EVAPORACIÓN DEL LIXIVIADO.....	35
4.4. CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DE LA FRACCIÓN METÁLICA DESPUÉS DE LA FUNDICIÓN.....	37
4.4.1. Microscopia óptica de la fracción metálica.....	37
4.4.2. Análisis SEM y EDX de la fracción metálica.	38
4.4.3. Medición de micro dureza.	40
5. DISCUSION DE RESULTADOS.....	41
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFIA.....	47
ANEXOS.....	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Equipo de Trituración al vacío, Bulb Eater de Air Cycle	19
Figura 2. Aspecto visual de los residuos obtenidos de la trituración al vacío de las luminarias fluorescentes, la fracción metálica (a), vidrio triturado (b) y vidrio pulverizado (c).	30
Figura 3. Gráfico de datos de los porcentajes acumulados y retenidos del vidrio crudo triturado mediante el análisis granulométrico (a) y Análisis de Rosin-Rammler de la fracción acumulada pasante (F) con respecto al tamaño de partículas en micrómetros (X) (b).....	30
Figura 4. Imagen de la muestra de vidrio crudo pulverizado obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 2 puntos específicos (a), (b) y un análisis general (c)	31
Figura 5. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 4.	32
Figura 6. Imagen de la muestra de vidrio lavado pulverizado obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 2 puntos específicos (a), (b) y un análisis general (c).	33
Figura 7. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 6.	33
Figura 8. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la muestra de vidrio crudo.	34
Figura 9. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la muestra de vidrio lavado.	35

Figura 10. Imagen de la muestra de cristales de sal obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 2 puntos específicos (a) y (b).	36
Figura 11. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 10.	36
Figura 12. Imágenes obtenidas mediante un microscopio óptico, sin ataque químico, de los productos obtenidos del proceso de fundición de las fracciones metálicas de los residuos de luminarias fluorescentes trituradas. (a) Se muestra la fase escoria, la cual incluye metal atrapado y (b) es la fase metálica obtenida (aleación).	38
Figura 13. Imagen de las fracciones metálicas obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se muestran las diferentes fases presentes en la fracción metálica, se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 3 área específicos, cobre (a), escoria (b) y metal blanco (c).	39
Figura 14. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 13.	39
Figura 15. Diagrama de flujo conceptual, propuesto a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, para un proceso de reciclaje de residuos de vidrio provenientes de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes.....	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. % en peso de los elementos Cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 4 y 5 de las diferentes zonas	32
Tabla 2. % en peso de los elementos Cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 7 y 8 de las diferentes zonas.	34
Tabla 3. Fases cristalinas identificadas de la muestra pulverizada de vidrio crudo.....	35
Tabla 4. % en peso de los elementos Cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 10 y 11 de las diferentes zonas.	37
Tabla 5. Porcentajes (%) en peso de los elementos cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 13 y 14 de las diferentes zonas.	40
Tabla 6. Microdurezas obtenidas de las fases presentes en la fracción metálica.	40

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ejemplo del análisis de regresión lineal mediante el método de Rosin-Rammler, para el cálculo del d50.....	49
Anexo B. Huellas provenientes del indentador en la microdureza.	50
Anexo C. Valores semicuantitativos del contenido de metales de los polvos fosforados utilizados dentro de las lámparas fluorescentes usados como referencia de comparación con los obtenidos en este proyecto.	51

RESUMEN

TÍTULO: RECUPERACIÓN DE COMPONENTES VALIOSOS A PARTIR DE LUMINARIAS FLUORESCENTES DESECHADAS*

AUTORES: Gómez Vásquez, Emerson Julián**

PALABRAS CLAVES: Luminaria fluorescente, trituración, separación, recuperación de componentes.

DESCRIPCIÓN:

Se obtuvo un material de residuos provenientes de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes desechadas, dicho material se encuentra constituido por fracciones metálicas (pertenecientes a los cabos y conectores de la bombilla) y una muestra de vidrio que en cuyo interior se encuentra constituida por un polvo fosforado. Para la recuperación de dichos componentes se realizaron diferentes procesamientos, con el fin de obtener un material limpio y listo para su reciclaje y/o reutilización, las fracciones metálicas, fueron fundidas y posteriormente analizadas mediante un estudio metalográfico, análisis SEM y EDX, conociendo su composición de forma cualitativa y semicuantitativa. La muestra de vidrio fue analizada en dos partes, vidrio crudo y vidrio lavado, se les realizó los análisis SEM y EDX para conocer su composición de forma cualitativa y semicuantitativa, y un análisis DRX para conocer las fases presentes en la muestra. Para obtener el vidrio limpio se realizó un lavado con HCl, separando el polvo fosforado del vidrio, donde la solución de HCl fue analizada para obtener la composición de los polvos, ya que dichos polvos fueron arrastrados mediante el lavado. Estos resultados permitieron plantear el proceso de recuperación de componentes valiosos, el cual se realizó con el fin de poder diseñar una propuesta de recuperación para el aprovechamiento de los materiales presentes en esta clase de residuos. Así mismo, se diseñó un diagrama de flujo de un proceso conceptual para el tratamiento de los residuos de vidrio y fracciones metálicas que se obtienen del procesamiento por trituración al vacío de luminarias fluorescentes gastadas y así mismo desechadas.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director. Ph.D Walter Pardave Livia. CoDirector: Ph.D. Pedro Delvasto Angarita

ABSTRACT

TITLE: VALUABLE COMPONENTS RECOVERY FROM DISCARDED FLUORESCENT LAMPS*

AUTHORS: Gómez Vásquez, Emerson Julián**

KEYWORDS: Fluorescent lamp, trituration, separate, components recovery

DESCRIPTION:

A recycled material was obtained from the vacuum crushing of discarded fluorescent lamps; this material is constituted by the metallic fractions belonging to the cables and connectors of the bulb and a sample of glass inside which is constituted by a phosphorous powder. For such components recovery, different processes are carried out in order to obtain a clean material ready for recycling and / or reuse; the metal fractions were melted and then analyzed by a metallographic study, SEM analysis and EDX, knowing its qualitative and semi quantitative composition. The glass sample was analyzed in two parts, raw glass and cleaned glass. To recognize the glass composition in a qualitative and semi-quantitative form the SEM and EDX analyzes were developed and a DRX analysis was carried out to know the phases present in the sample. To obtain the cleaned glass, a HCl rinse was made in order to remove the phosphorous powder, and to know the powder composition the HCl solution was analyzed due to the fact the powder was dissolved during the process. The outcomes guided the process of recovery of valuable components, which was done in order to design a proposal for the recovery of materials present in this class of waste. Thus, a conceptual flow diagram of process was designed for the treatment of glass residues and metal fractions obtained from vacuum crushing of spent and discarded fluorescent luminaires

* Degree project

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Adviser: Ph.D. Walter Pardave Livia. Adviser: Ph.D. Pedro Delvasto Angarita.

INTRODUCCIÓN

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), se refiere a todo tipo de aparato que consume electricidad. Los residuos son una mezcla de componentes, algunos de ellos contienen elementos o compuestos que son muy valiosos, al fin de su vida útil, pueden generar un riesgo ambiental. El procesamiento de recuperación y almacenamiento debe realizarse en instalaciones que cuenten con toda la normatividad ambiental vigente, al igual que el transporte de aquellos residuos que sean considerados como peligrosos¹.

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible ha venido promoviendo diferentes estrategias con el fin de dirigirlas en pro de una gestión ambiental adecuada de los residuos pos-consumo de lámparas fluorescentes, ya que dichos materiales contienen mercurio, el cual es un causante de un gran impacto ambiental. Los productores y comercializadores de estas luminarias están en la obligación de velar por el cumplimiento de los planes de tratamiento pos-consumo según la resolución 1511 de agosto del 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo y del decreto 4741 de 2005, que estipula el tratamiento adecuado de estos residuos².

Las luminarias fluorescentes requieren de un procesamiento muy importante, que es la trituración al vacío, este mecanismo cuenta con una cámara que evita la filtración de mercurio, el funcionamiento de la trituración se basa en succionar la bombilla de tal forma que genera una presión en ella mediante una bomba al vacío y gracias a un conjunto rotatorio de cadenas presentes dentro de la trituradora, a

¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. "Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Bogotá, D.C. Centro Nacional de Producción más Limpia" 2009

² MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, resolución N°1511, "Por la cual se establecen los Sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de Residuos de bombillas y se adoptan otras disposiciones". 2010

medida que se va succionando la luminaria, esta se va triturando y es separada del polvo de mercurio que va directamente a la cámara de filtración³

Por lo mencionado anteriormente el propósito del presente trabajo es generar información que permita de extraer información química útil para un balance de masas que apoye el diseño conceptual de un proceso de aprovechamiento de los materiales contenidos en los residuos sólidos que se generan durante la trituración al vacío de luminarias fluorescentes.

³ HERNÁNDEZ, C. Triturador de lámparas con colector de mercurio (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. 2014

1. ANTECEDENTES

1.1. PROCESOS HIDROMETALURGICOS Y PIROMETALURGICOS PARA RECUPERAR MATERIAS PRIMAS A PARTIR DE LOS DESECHOS DE APARATOS ELECTRICOS Y ELECTRONICOS (RAEE)

Los RAEE están fabricados con diferentes materiales que con el procesamiento adecuado pueden ser recuperados/almacenados y reutilizados. Al analizar más a fondo estos RAEE, se afirma según los Estudios realizados en la Unión Europea que, dichos aparatos poseen un 25% de componentes reutilizables, un 72% de materiales reciclables (plásticos, metales ferrosos, aluminio, cobre, oro, níquel, estaño de las placas, etc.) y un 3% de elementos de toxicidad alta como: plomo, mercurio, berilio, selenio, cadmio, cromo, sustancias halogenadas, clorofluocarbonos, bifenilos, policlorados, policloruro de vinilo, ignífugos como el arsénico y el amianto, entre otros⁴.

Existen dos procesos de recuperación de metales, la pirometalurgia, que consiste en usar altas temperaturas para su obtención, y la hidrometalurgia, que consiste en utilización de soluciones líquidas y acuosas para la recuperación del material. Cuando se habla de la recuperación de materias primas de RAEE, el procesamiento más utilizado es la lixiviación, que consiste en la separación del metal mediante una disolución entre la mezcla soluble mediante la acción de un disolvente líquido⁵

⁴ TUFRO, V. Destino final de los equipos electrónicos obsoletos de usuarios corporativos de TIC en Argentina. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2010

⁵ BALLESTER, A.; VERDEJA, L.F.; SANCHO, J.: "Metalurgia extractiva: Volumen I y II", Síntesis, 2000.

1.2. PROCESAMIENTO POR TRITURACION AL VACIO DE LUMINARIAS FLUORESCENTES

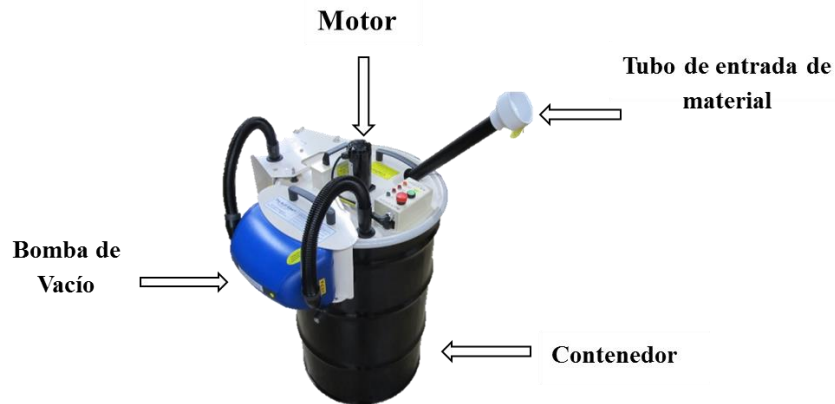
Las luminarias fluorescentes están fabricadas de un tubo de vidrio al que ya se le ha extraído el aire, dentro de ese tubo se encuentra una pequeña cantidad de mercurio y gas inerte, Argón. Una vez terminada su vida útil, estas luminarias son consideradas como residuos peligrosos, ya que al no tener una apropiada manipulación al momento de recolectar/almacenar este material y dejarlo expuesto al medio ambiente, el contenido de mercurio presente dentro de la luminaria, puede ocasionar un gran impacto, tanto al medio ambiente como a la salud humana⁶.

Se ha venido implementando un procesamiento que consiste en realizar una trituration mediante una bomba al vacío, donde el primer paso es separar el vidrio del polvo fosforado, es un sistema muy sencillo y útil, se usa para reducir el tamaño de los residuos provenientes de las luminarias antes de la recuperación de los diferentes componentes y almacenamiento de los mismos. Este sistema cuenta con una trituradora en la base del contenedor, el material se introduce de forma manual por parte del operario, se introducen por un canal inclinado sujeto al contenedor, que no necesariamente debe ser del largo de la luminaria. Lo que hace aún más sencillo este proceso es que no necesitan de controles que manejen la contaminación del lugar donde se realiza la trituration, ya que el material recolectado queda dentro de los contenedores y listo para ser transportado. El material utilizado luego de la trituration se separa en los metales sujetos a las luminarias, compuestos del polvo fosforado, vidrio y mercurio. Se debe tener cuidado que no hayan fugas tanto en el tubo alimentador, y que las lámparas no estén quebradas al momento de la recepción y previo a la trituration, esto con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación tanto del operario como al ambiente⁷.

⁶ ANGULO, L, Y ROMERO, M. Análisis de alternativas para el manejo de lámparas fluorescentes de tubo desechadas, Área Metropolitana del Valle de Aburra (tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá, Colombia. 2006

⁷ *Ibíd.*

Figura 1. Equipo de Trituración al vacío, Bulb Eater de Air Cycle.



Fuente: HERNÁNDEZ, C. Triturador de lámparas con colector de mercurio (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. 2014.

Se plantea un triturador cuyo procedimiento se basa en la reducción de tamaño del vidrio, cuenta con un sistema de filtración que evita que los gases presentes en el material estén expuestos al ambiente. Las piezas fundamentales con las que cuenta este equipo para su óptimo resultado son:

Los rodillos, se usan para la reducción de tamaño, provocan la fractura del material, el tamaño de reducción depende de la distancia entre los rodillos, se puede manejar vidrio y aluminio. El extractor, se usa con el fin de evitar que los gases entren en el contenedor donde se encuentra ubicado el material triturado. Juego de discos de impacto, se propone el uso de acrílico, se da una carga a causa de una fricción que ejerce el aire con el material y al no usar ningún tipo de filtro ni limpieza, el uso de carbón activado se omite ya que es necesario para adherir una cámara de mezclado. Depósito de mercurio, se ubica debajo de los discos de impacto y se une con el tubo de flujo de aire, allí las partículas de mercurio se acumulan en forma de gotas y son arrastradas hasta llegan al contenedor. Cámara de triturado, se debe tener en cuenta que el material de la cámara no reaccione con el mercurio y sea de

bajo costo. Contenedor, se requiere usar un material adecuado ya que el mercurio es muy perjudicial, se sugiere usar contenedores metálicos⁸.

1.3. POSIBILIDADES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS DE LUMINARIAS FLUORESCENTES

A la hora de realizar una recuperación y un aprovechamiento de un material como los son las luminarias fluorescentes, preocupa de cierta manera, el saber que puede estar contaminado de mercurio, independiente a ello, existen diferentes propuestas para eso, una de ellas, es incorporarlos en cerámicas de arcilla para construcción. Debido a la temperatura de fusión del vidrio, este actúa como un agente de flujo y contribuye al mejoramiento de las propiedades de la cerámica de arcilla. En el caso particular de los desechos de lámparas fluorescentes existe una ventaja al reciclarlas por medio de fundición, ya que su procesamiento en cerámicas a niveles razonables, los componentes tóxicos son sustancialmente diluidos. En unas pruebas realizadas se evidenció que este proceso no causaría problemas en el medio ambiente por emisión⁹.

Por otra parte, el reciclaje de estos residuos, no solo beneficia al medio ambiente, si no, que al recuperar los componentes presentes y utilizando un proceso adecuado, hoy por hoy, los residuos obtenidos mediante esta recuperación de reciclaje como los son (plástico, metal y vidrio), se pueden reutilizar para producir diferentes cosas que normalmente se usa a diario, como lo son, repuestos para motos y carros, el uso en revestimientos para piscinas, envases de bebidas, y por supuesto, la creación de nuevas lámparas¹⁰.

⁸ HERNÁNDEZ, C. Op. Cit.

⁹ ESCARPINI, V. Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic, the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2016.

¹⁰ AMBILAMP, Aparatos Eléctricos y Electrónicos, gestión de residuos (RAEE), Asociación para el reciclaje de lámparas, guía didáctica para alumnos, 2005.

Según investigaciones y ya mencionado anteriormente, la reutilización de luminarias fluorescente, se da principalmente en la creación de nuevas luminarias, pero al tratarse de un procedimiento altamente costoso, se busca la posibilidad de reutilizar en otros aspectos, en este caso se habla de la reutilización del vidrio recuperado proveniente del procesamiento de luminarias fluorescentes, sustituyéndolo parcial y completamente por la arena o granos finos en mezclas utilizadas para la fabricación de concreto. Se han realizado diferentes pruebas entre ellas, se evaluó el cambio en la densidad y la absorción capilar de agua, da como resultado, al aumentar el contenido de vidrio, disminuye la toxicidad del material, y una disminución de costos de un 16 % aproximado, con la utilización de este agregado¹¹.

¹¹ GARCIA, R. Aplicación del vidrio reciclado de luminarias fluorescentes como agregado en mezclas de cemento (tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2014.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer la recuperación de componentes valiosos a partir de luminarias fluorescentes desechadas mediante procesos metalúrgicos sencillos.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar física, química y granulométricamente los desechos sólidos obtenidos de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes desechadas.
- Determinar cualitativa y cuantitativamente los componentes valiosos que conforman dichas luminarias.
- Proponer un flujograma conceptual con balance de materia, para un circuito de recuperación de componentes valiosos a partir de residuos de luminarias fluorescentes desechadas.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. OBTENCION DE LA MUESTRA

Luego de un proceso de búsqueda para la obtención de fuentes iluminarias, este material se somete a un proceso de trituración compacta generada por una bomba al vacío. Se obtuvo de un procesador de residuos local una muestra de 10 Kg de material proveniente del procesamiento (trituración al vacío) de luminarias fluorescentes gastadas. En el laboratorio de beneficio de minerales de la UIS se procedió a triturar nuevamente la muestra pasándola por una trituradora de martillos para reducir su tamaño y facilitar la separación de los diferentes componentes encontrados en la muestra y de tal forma realizar los análisis correspondientes a este estudio.

3.2. SEPARACION DE LA FRACCION METALICA DEL RESIDUO, ANALISIS GRANULOMETRICO DEL VIDRIO Y PROCEDIMIENTO DE LAVADO DEL VIDRIO (LIXIVIACIÓN) CON ÁCIDO CLORHÍDRICO.

Se realizó una separación manual del material apartando del vidrio triturado las fracciones metálicas y plásticas del material. Se tomó el vidrio luego de haber realizado la separación manual del material y se procedió a realizarle un análisis granulométrico mediante un procedimiento de tamizado, lo primero que se hizo fue tomar la serie de tamices a usar en el proceso, en este caso se usó la serie de Tyler, según su número de malla (1/4, 5, 10, 20, 40, 70, 100, 140, 200, bandeja), al realizar este proceso se debe tener en cuenta que el primer tamiz debe ser de un tamaño correspondiente para que todo el material pase sin ningún problema. Se tomaron 100 gramos de la muestra de vidrio y se llevaron al equipo agitador donde ya se

encuentra ubicada la serie de tamices y se dejó por un tiempo equivalente de 2 minutos por tamiz, es decir, un tiempo total de 20 minutos. Se procedió a tomar cada uno de los pesos retenidos en cada tamiz y se realizó el registro adecuado para la obtención y análisis de los resultados. El proceso se realizó por triplicado. Para determinar el d_{50} los datos de granulometría se ajustaron a un modelo de regresión lineal de Rosin-Rammler¹².

El vidrio de las luminarias fluorescentes contiene un polvo blanco fosforoso. Con el fin de establecer la cantidad de polvo presente por unidad de masa del vidrio, se tomaron 5 muestras de $10 \pm 0,5$ gramos de vidrio, cada muestra se depositó en un vaso precipitados y se midió su masa con una precisión en gramos, de 4 cifras decimales. Las muestras se introdujeron en una estufa MEMMERT UN 55, a 110°C durante 4 horas. Transcurrido el tiempo, se dejaron enfriar en un desecador por 10 minutos, este con el fin de evitar que absorba la humedad del ambiente durante su enfriamiento, y se tomaron los pesos correspondientes a cada una de las muestras para calcular la pérdida en masa (humedad) de la muestra seca.

Se procedió a realizar un lavado a la muestra seca, para ello se preparó una solución de ácido clorhídrico HCl con una relación de volumen de HCl 1:2 H_2O , para esta solución se tomaron 33 ml de HCl concentrado y 67 ml de H_2O destilada, obteniendo un volumen total de 100 ml de solución. Se depositó 20 ml de solución en cada uno de los vasos de precipitados que contenían la muestra de vidrio seco, cada vaso se cubrió con un vidrio de reloj y se procedió a dejarlo reaccionar por 48 horas dentro de una campana de extracción de gases. Trascurrido el tiempo reacción se procedió a realizar la filtración y el lavado del vidrio, para esto se utilizó papel de filtrado Qualitative filter paper médium 102, se realizó la filtración/separación correspondiente entre la muestra de vidrio y la muestra líquida, esta muestra líquida.

¹² P. AARNE VESILIND. The Rosin-Rammler Particle Size Distribution, Resource Recovery and Conservation. 1980 275-277

Luego se realizaron 4 lavados más con agua destilada a cada una de las muestras sólidas. En cada lavado, se usó un volumen correspondiente a 18,5 ml de agua destilada, es decir, se usó un volumen total de 74 ml de agua destilada para los 4 lavados, al tener en cuenta todos los lavados, para las 5 muestras, se tuvo que el volumen correspondiente de agua destilada consumida en este proceso, fue de 370 ml. Tanto la muestra líquida en la filtración como el agua destilada utilizada en los lavados, se depositaron en un mismo recipiente para luego ser analizadas. Después de realizado el lavado del vidrio, se introdujeron las muestras de vidrio lavado a una estufa a una temperatura de 110 °C y se dejaron allí durante 24 horas, transcurrido el tiempo se dejan enfriar en un desecador por 10 minutos y se midió su masa con una precisión en gramos, de 4 cifras decimales, para así poder calcular la pérdida en masa correspondiente al polvo disuelto de la muestra lavada.

Para la caracterización de los cristales de sal se realizó el montaje de la muestra de cristales de sal se colocaron sobre una cinta doble faz de carbono y se llevaron a un porta muestras, debido a que la muestra no es conductora se le realizó un recubrimiento con grafito, esto se realizó en un equipo recubridor evaporador QUORUM Q150R ES, y se procedió a llevarlas al microscopio QUANTA FEG 650, donde se obtuvieron los resultados.

3.3. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL VIDRIO CRUDO Y LAVADO MEDIANTE ANALISIS DE DRX Y SEM DE LA MUESTRA PULVERIZADA

Para la realización de estos análisis se tomaron las muestras de vidrio lavado y una muestra de vidrio crudo y se realizó a cada una de ella un proceso de molienda, usando un mortero manual, hasta que el material este totalmente pulverizado (pasante malla 100 en la serie de Tyler), se vacía cada muestra en un recipiente limpio de plástico para luego ser llevada a los laboratorios correspondientes para su respectivo análisis.

3.3.1. Análisis por difracción de rayos X. La preparación de las muestras, los especímenes seleccionados de las muestras fueron molidos y homogenizados en un mortero de ágata y posteriormente montados en un porta muestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. Se realizó en un difractómetro de polvos marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones: voltaje 40 (kV), corriente 40 (mA), rendija de Divergencia de 0,6 mm, rendijas siller primario y secundario de 2,5°, muestreo de $0,02035^{\circ}2\theta$, rango de medición $3,5^{\circ}-70,0^{\circ}\theta$, radiación CuK α , filtro de Níquel, uso de Anti-dispersor de aire, detector Lineal LynxEye, tipo de barrido a pasos y tiempo de muestreo de 0,8 segundos. Los análisis cualitativos de las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *international center for diffraction data (ICDD)*.

3.3.2. Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) y EDX de las muestras. Se realizó el montaje de las muestras de vidrio lavado y crudo en una cinta de carbono y se llevaron a un porta muestras, debido a que las muestras no son conductores se les realizó un recubrimiento con grafito, esto se realizó en un equipo QUORUM Q150R ES, y se procedió a llevarlas al microscopio QUANTA FEG 650, donde se obtuvieron los resultados.

3.4. FUNDICION, ESTUDIO METALOGRAFICO DE LAS FRACCIONES METALICAS PRESENTES EN EL RESIDUO, ANALISIS SEM Y EDX

Para la fundición del metal se pesaron 50 gr de material metálico extraído de los residuos de luminarias fluorescentes trituradas y se depositaron en un crisol de arcilla refractaria para facilitar el proceso de fusión, al metal, se le adicionaron 20 gramos de bórax y 18 gr de carbonato de sodio (Na₂CO₃) como fundente, se

adiciono un (1) gramo de harina de trigo como agente reductor y 8 gr de arena como agente escorificante, se procedió a introducir el crisol con el material mencionado por una duración de 2 horas en un horno de mufla TERRIGENO D8,a 1060 °C. Luego de transcurrido el tiempo, se procedió a retirar el material del interior del horno y se dejó enfriar al ambiente, al estar completamente enfriado se destruyó el crisol y se extrajo la muestra metal/escoria, dejándola lista para su respectivo estudio metalográfico, para lo cual se procedió a realizar la preparación de la muestra y el montaje respectivo de la probeta, en baquelita y se procedió a realizar el desbaste, este con el fin de eliminar las irregularidades presentes en ella. Esta operación se realizó con una banda de desbaste y seguido a ello se realizó un desbaste manual con un papeles abrasivos cuya serie fue de 150, 240, 400, 600 y 1200 grit. Para finalizar, se realizó el pulido, para ello se usó un paño sin pelo y alúmina como abrasivo de 0,85 μm , esto con el fin de eliminar las rayas superficiales de la muestra y se lleva al microscopio óptico OLIMPUS GX71, para fotografiar la microestructura obtenida. La muestra metálica está formada por 3 fases, metal blanco, escoria y cobre, se procedió a tomar las micro durezas, se usó un micro durómetro INNOVATEST 400TM, se le aplicó una carga sobre la fase de metal blanco y de cobre, de 25 gr, y para la fase escoria, una carga de 100 gr. Se tomaron 5 microdurezas a cada una de las fases, cada medición se realizó dejando una distancia referente a 3 huellas. Posteriormente, para el análisis del metal mediante SEM-EDX se realizó el montaje de la muestra metálica y se llevó a él porta muestras, no se realizó ningún recubrimiento, ya que la es muestra conductora, se procedió a llevarlas al microscopio QUANTA FEG 650, donde se obtuvieron los resultados.

3.5. BALANCE DE MASAS Y ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS DE LA OPERACIÓN.

Se propuso un diagrama de flujo conceptual, a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, para un proceso de reciclaje de residuos provenientes de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes.

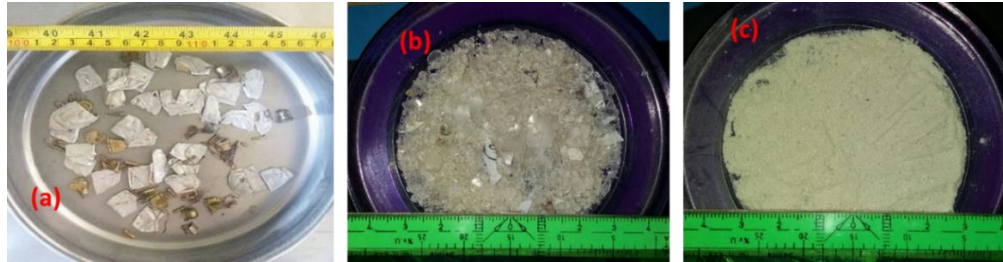
4. RESULTADOS

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en los diferentes análisis y pruebas pertinentes realizadas a los componentes presentes en las luminarias fluorescentes desechadas, tales como, vidrio y fracciones metálicas.

4.1. ANALISIS GRANULOMETRICO DE VIDRIO CRUDO Y FRACCIONES METALICAS PROVENIENTES DE LUMINARIAS FLUORESCENTES

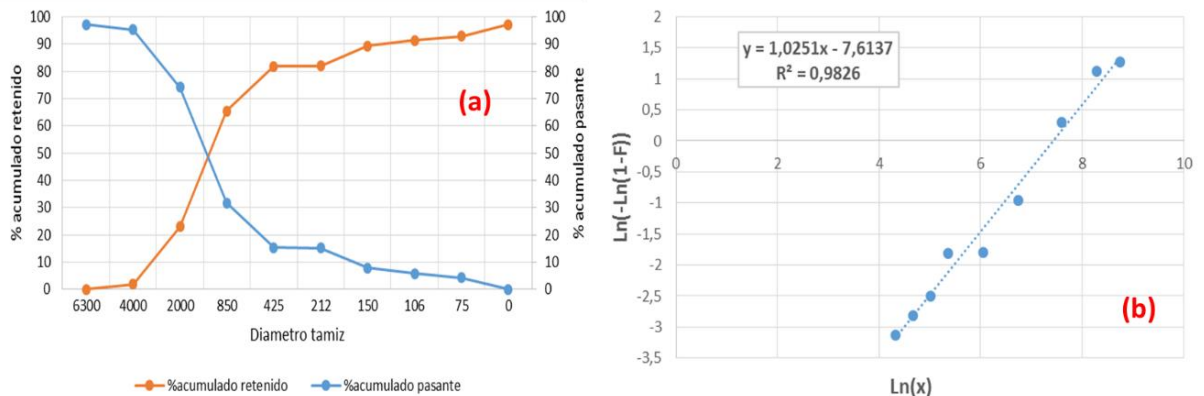
Se estudió una muestra de los desechos sólidos provenientes de un proceso industrial de trituración al vacío de luminarias fluorescentes. Como ya se indicó, esta muestra consiste en una fracción de vidrios impregnados de un polvo blanco fluorescente y de una fracción metálica conformada por los cabos, casquillos y conectores de las luminarias. Debido a la diferencia de tamaños entre ambas fracciones, fueron separadas por un tamiz de malla de ¼ pulgada. Los resultados obtenidos en la figura 2, muestran el aspecto visual de las fracciones, metálica (a) y de vidrio crudo (b). Por su parte, la figura 2 (c) muestra el aspecto que adquiere la fracción vítrea al ser pulverizada en un mortero hasta pasante en serie Tyler malla 100.

Figura 2. Aspecto visual de los residuos obtenidos de la trituración al vacío de las luminarias fluorescentes, la fracción metálica (a), vidrio triturado (b) y vidrio pulverizado (c).



En la figura 3 se muestran los datos obtenidos mediante el análisis granulométrico del vidrio crudo, se evidencia los porcentajes en peso acumulado pasante y acumulado retenido sobre la misma gráfica. Estos valores se sometieron a un análisis de regresión mediante el método de Rosin-Rammler, encontrándose que el mismo indica que el tamaño medio de la distribución (d_{50}) es igual a 1175,85 micrómetros. El ejemplo de este cálculo se muestra en el anexo I.

Figura 3. Gráfico de datos de los porcentajes acumulados y retenidos del vidrio crudo triturado mediante el análisis granulométrico (a) y Análisis de Rosin-Rammler de la fracción acumulada pasante (F) con respecto al tamaño de partículas en micrómetros (X) (b).



4.2. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE VIDRIO CRUDO Y VIDRIO LAVADO

Se muestran los resultados obtenidos mediante un análisis SEM y EDX de las muestras pulverizadas de vidrio crudo y lavado, mencionadas anteriormente; en las figuras se muestran las imágenes a altos aumentos, señalando la ubicación de las zonas donde se realizó el EDX.

4.2.1. Análisis SEM y EDX de la muestra pulverizada de vidrio crudo y lavado.

Los resultados obtenidos en la figura 4 (vidrio crudo), se muestra la ubicación de las zonas donde se realizó el EDX, 2 zonas específicas (a), (b) y una medición general (c). En la figura 5, se muestra el espectrómetro obtenido, donde muestra de forma cualitativa los elementos presentes en la muestra de vidrio crudo, en las zonas ya ubicadas en las figuras 4. En la tabla 1, se muestran los resultados de forma cuantitativa los porcentajes en peso de los elementos presentes en la fracción de vidrio crudo.

Figura 4. Imagen de la muestra de vidrio crudo pulverizado obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 2 puntos específicos (a), (b) y un análisis general (c)

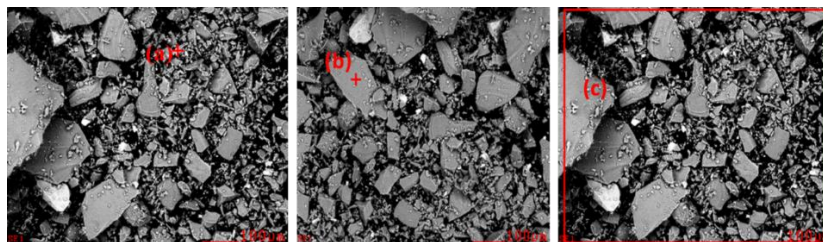


Figura 5. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 4.

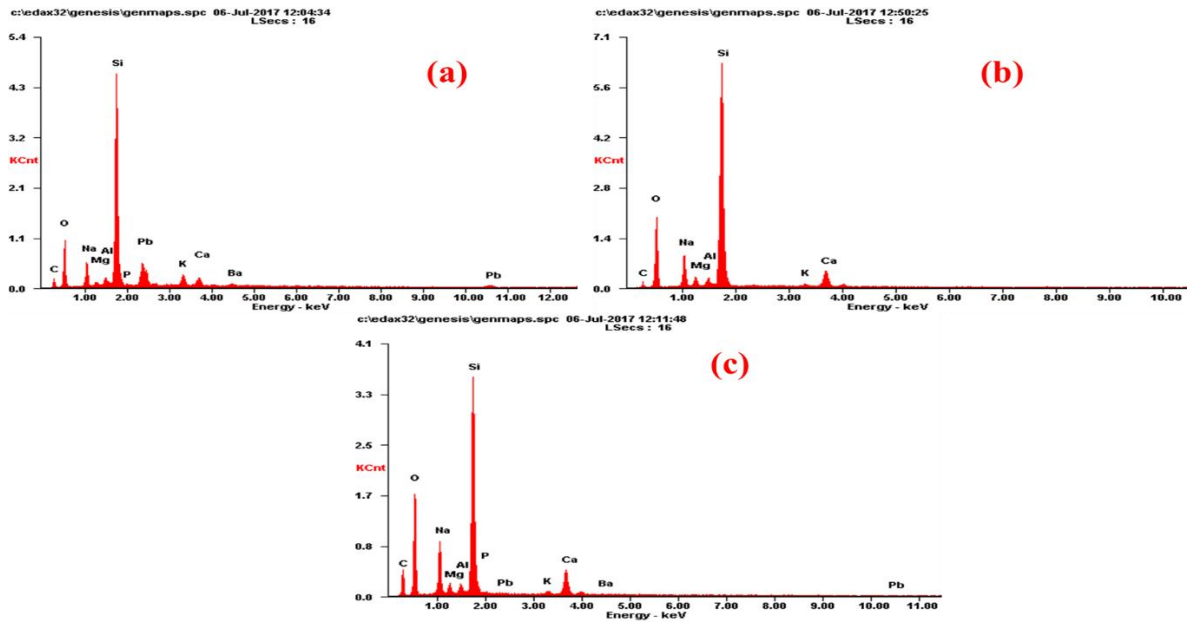


Tabla 1. % en peso de los elementos Cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 4 y 5 de las diferentes zonas

ELEMENTO	% EN PESO			ELEMENTO	% EN PESO		
	Zona a	Zona b	Zona c		Zona a	Zona b	Zona c
C	9,99	7,21	19,79	P	0,25	.....	0,25
O	22,79	34,81	35,06	Pb	16,49	.....	0,24
Na	5,54	7,4	8,39	K	3,07	0,75	0,58
Mg	0,72	1,96	1,4	Ca	2,34	5,14	5,18
Al	1,56	1,45	1,3	Ba	2,32	.....	0,31
Si	34,95	41,28	27,5				

Los resultados obtenidos en la figura 6 (vidrio lavado), se muestra la ubicación de las zonas donde se realizó el EDX, 2 zonas específicas (a), (b) y una medición general (c). En la figura 7, se muestra el espectrómetro obtenido, donde muestra de forma cualitativa los elementos presentes en la muestra de vidrio crudo, en las zonas ya ubicadas en las figuras 6. En la tabla 2, se muestran los resultados de forma cuantitativa los porcentajes en peso de los elementos presentes en la fracción de vidrio crudo.

Figura 6. Imagen de la muestra de vidrio lavado pulverizado obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 2 puntos específicos (a), (b) y un análisis general (c).

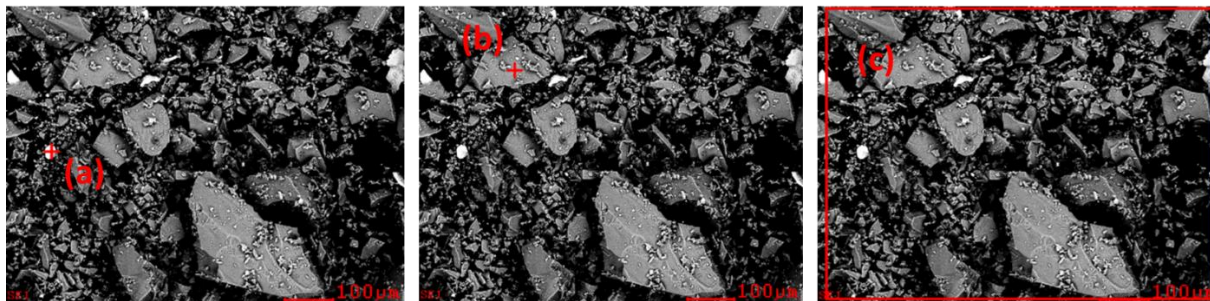


Figura 7. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 6.

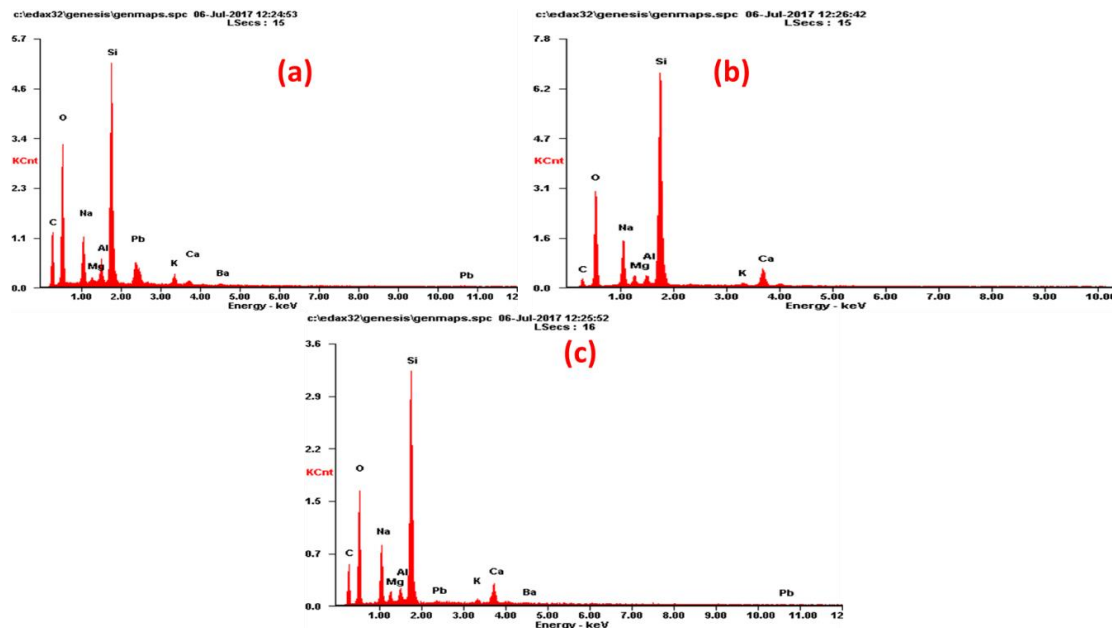


Tabla 2. % en peso de los elementos Cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 7 y 8 de las diferentes zonas.

ELEMENTO	% EN PESO		
	Zona a	Zona b	Zona c
C	27,19	9,19	26,03
O	34,59	37,21	33,43
Na	5,98	9,58	8,07
Mg	0,42	1,84	1,37
Al	1,85	1,63	1,5

ELEMENTO	% EN PESO		
	Zona a	Zona b	Zona c
Si	19,07	35,25	24,74
Pb	7,9	.....	0,49
K	1,26	0,71	0,6
Ca	0,68	4,59	3,23
Ba	1,05	.....	0,53

4.2.2. Análisis DRX de la muestra pulverizada de vidrio crudo y lavado. En la tabla 3, se describen las fases cristalinas presentes en la muestra de vidrio crudo. Para la muestra de vidrio lavado, no se encontraron fases cristalinas. En las figuras 8 y 9, se muestran los perfiles de difracción obtenidos con los análisis comparativos de las fases encontradas.

Figura 8. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la muestra de vidrio crudo.

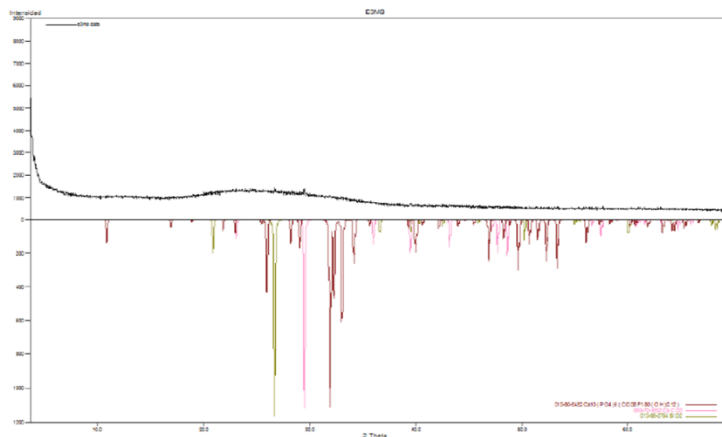
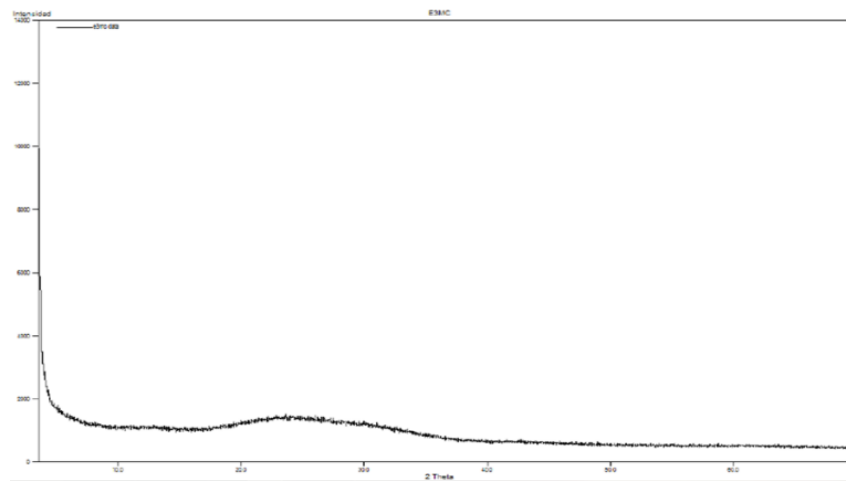


Tabla 3. Fases cristalinas identificadas de la muestra pulverizada de vidrio crudo.

CRISTALINO	FASE	NOMBRE
	SiO ₂	Cuarzo
	CaCO ₃	Calcita
	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (Cl ₀₋₀₈ F ₁₋₈₀ (OH) ₀₋₁₂)	Fluorapatita

Figura 9. Análisis comparativo por difracción de rayos-X de las fases identificadas en la muestra de vidrio lavado.



4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS CRISTALES DE SAL OBTENIDOS DE LA EVAPORACIÓN DEL LIXIVIADO

Se muestran los resultados obtenidos mediante un análisis SEM y EDX, de una muestra de cristales de sal obtenidos de la evaporación de líquido utilizado en el proceso de lavado de una muestra de vidrio proveniente de la trituración de luminarias fluorescentes desechadas. Los resultados obtenidos en la figura 10, muestran la ubicación de las zonas donde se realizó el EDX, 2 zonas específicas (a) y (b). En la figura 11, se muestra el espectrómetro obtenido, donde muestra de forma cualitativa los elementos presentes en la muestra de cristales de sal, en las

zonas ya ubicadas en las figuras 10. En la tabla 4, se muestran los resultados de forma cuantitativa los porcentajes en peso de los elementos presentes en la muestra de cristales de sal.

Figura 10. Imagen de la muestra de cristales de sal obtenida mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 2 puntos específicos (a) y (b).

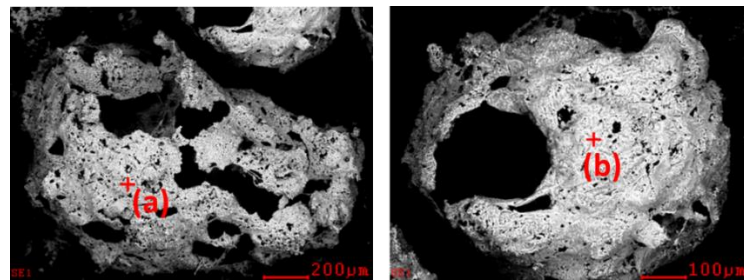


Figura 11. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 10.

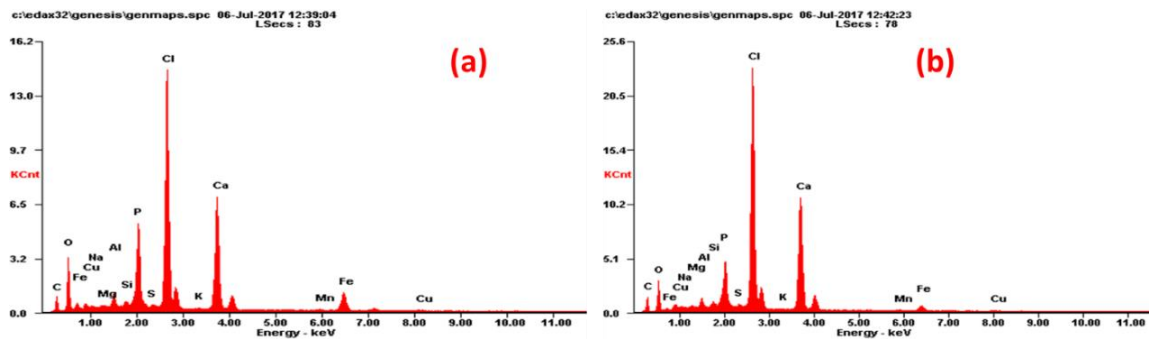


Tabla 4. % en peso de los elementos Cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 10 y 11 de las diferentes zonas.

ELEMENTO	% EN PESO		ELEMENTO	% EN PESO	
	Zona a	Zona b		Zona a	Zona b
C	12,52	17,1	S	0,63	0,65
O	20,67	15,32	Cl	26,42	31,4
Na	0,99	0,89	K	0,32	0,15
Mg	0,84	0,83	Ca	17,75	21,92
Al	1,69	1,48	Mn	0,33	0,39
Si	0,97	1,07	Fe	7,76	2,6
P	8,21	5,45	Cu	0,9	0,76

4.4. CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DE LA FRACCIÓN METÁLICA DESPUÉS DE LA FUNDICIÓN

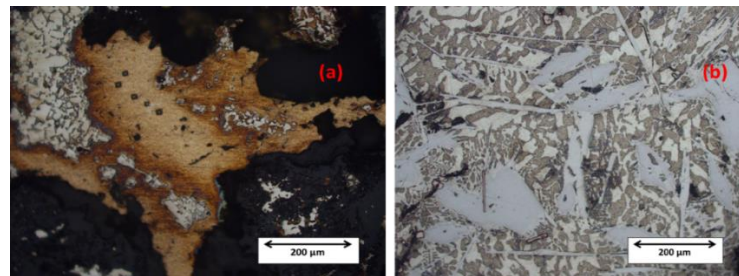
Se muestran los resultados obtenidos mediante un estudio metalográfico, análisis SEM y EDX realizadas a la fundición de las fracciones metálicas de los residuos de luminarias fluorescentes trituradas, obtenida mediante la separación de componentes ya mencionadas.

4.4.1. Microscopia óptica de la fracción metálica. Se muestran las micrografías obtenidas mediante microscopia óptica, las imágenes fueron tomadas a 200X, del proceso de fundición de las fracciones metálicas obtenidas de los residuos de luminarias fluorescentes, se tomaron 2 imágenes como se muestra en la figura 12, en la imagen (a) se muestra las 3 fases presentes en la fracción metálica, se observa la presencia de metal atrapado en la escoria, se observa una fase color amarillo, presumiblemente con alto contenido de Cu y otra de color blanco, presumiblemente con alto contenido de Al, en vista de que estos dos metales suelen formar parte de los cabos y conectores eléctricos presentes en las luminarias fluorescentes¹³. En la

¹³ HERNÁNDEZ, C. Op. Cit.

imagen (b) se observa la fase principal de la fracción metálica, que se presume rica en aluminio, la cual es bifásica, mostrando una fase de color blanco con agujas dentro de ella, en la que se distingue un fondo de color marrón claro. Los análisis microquímicos para confirmar la composición de estas fases se muestra en la sección 4.4.2.

Figura 12. Imágenes obtenidas mediante un microscopio óptico, sin ataque químico, de los productos obtenidos del proceso de fundición de las fracciones metálicas de los residuos de luminarias fluorescentes trituradas. (a) Se muestra la fase escoria, la cual incluye metal atrapado y (b) es la fase metálica obtenida (aleación).



4.4.2. Análisis SEM y EDX de la fracción metálica. Se muestran los resultados obtenidos mediante un análisis SEM y EDX, de una muestra de la fracción metálica obtenida por fundición, provenientes de los residuos de las luminarias fluorescentes. Se enfocan las diferentes fases presentes en la fracción metálica como se muestra en la figura 13. Se tomó una micrografía en la zona amarilla de la muestra metálica en la imagen (a) de la figura 13, donde mediante los resultados obtenidos se evidencia la presencia de un alto porcentaje de Cu, así mismo en la imagen (b), se tomó una micrografía a la zona negra, donde evidencia la presencia de escoria con un porcentaje de Al atrapado allí, en la imagen (c), se tomó la micrografía en la zona gris, donde se evidencia la presencia de un alto porcentaje de Al. En la figura 14, se muestra el espectro EDX obtenido para cada fracción, donde muestra de forma cualitativa los elementos presentes en la fracción metálica, en las zonas ya ubicadas en las figuras 13. En la tabla 5, se muestran los resultados de forma semi-

cuantitativa de los porcentajes en peso de los elementos presentes en las distintas fracciones metálicas obtenidas luego del proceso de fundición.

Figura 13. Imagen de las fracciones metálicas obtenida mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se muestran las diferentes fases presentes en la fracción metálica, se resalta la ubicación de las zonas donde se realizó el microanálisis químico EDX en 3 área específicos, cobre (a), escoria (b) y metal blanco (c).

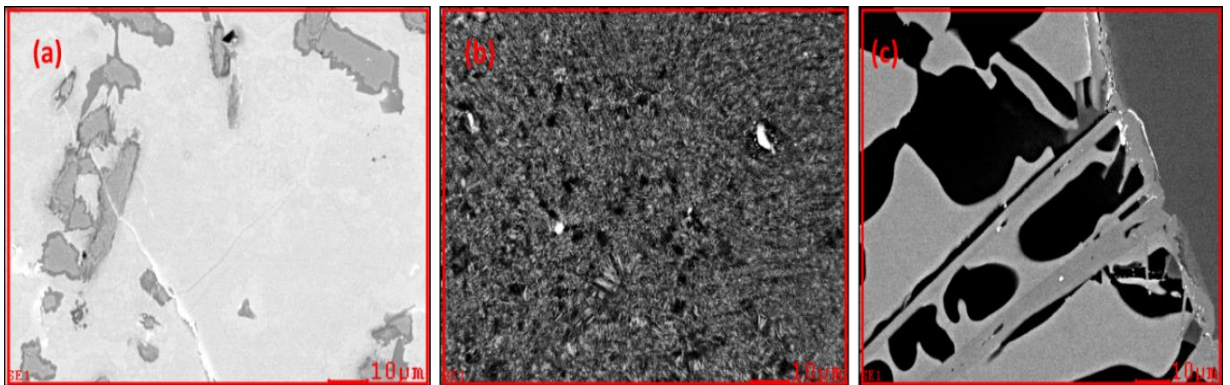


Figura 14. Espectro de Fluorescencia de Rayos X de energía dispersada (EDX) en las zonas señaladas en las imágenes de la figura 13.

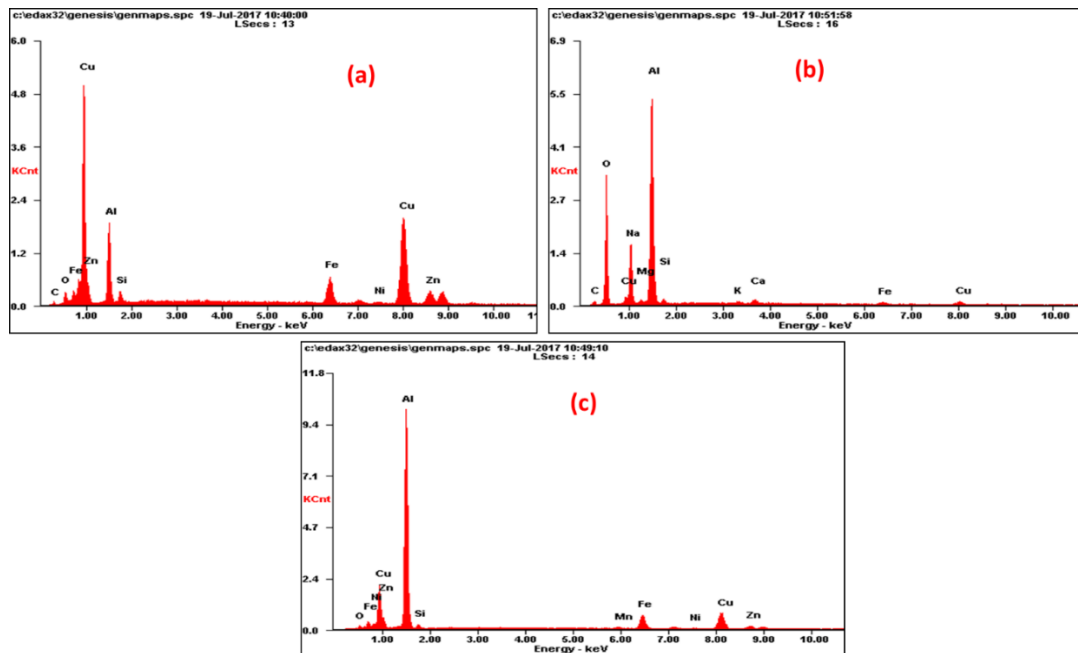


Tabla 5. Porcentajes (%) en peso de los elementos cuantificados, mediante el EDX tomado de las imágenes en las figuras 13 y 14 de las diferentes zonas.

ELEMENTO	% EN PESO			ELEMENTO	% EN PESO		
	Zona a	Zona b	Zona c		Zona a	Zona b	Zona c
C	1,91	4,43	.....	Ca	.....	0,84	.....
O	3,06	38,44	1,34	Fe	7,89	1,11	8,99
Na	.....	12,98	.....	Cu	53,52	2,59	19,58
Mg	.....	0,69	.....	Ni	1	.....	0,48
Al	20,58	37,44	62,95	Zn	9,26	.....	3,75
Si	2,79	1,03	2,14	Mn	.....	.....	0,78
K	.....	0,45	.....			

4.4.3. Medición de micro dureza. En la tabla 6, se muestran los datos obtenidos mediante una serie de tomas de microdureza en las diferentes fases presentes en la fracción metálica ya mencionada, se muestra el promedio y la desviación estándar en cada fase y se especifica el dato perteneciente a cada una de ellas, se tomó microdureza para la escoria, cobre y tres zonas distintas de la fase blanca (Al), las huellas provenientes del indentador en la microdureza, se muestran en el anexo II.

Tabla 6. Microdurezas obtenidas de las fases presentes en la fracción metálica.

Material	Metal Blanco [HV]			Cobre [HV]	Escoria [HV]	Metal blanco		
	fase 1	fase 2	fase 3			fase 1: grano grande	fase 2: grano mediano	fase 3: matriz café
Promedio	634,6	327,7	124,2	118,1	546,6			
desv estandar	72,6	68,2	10,4	16,6	53,1			

5. DISCUSION DE RESULTADOS

Al momento de analizar más a fondo los elementos presentes en estas luminarias fluorescentes, se puede ver que dentro de un tubo de cristal sellado, no solo se encuentra presente, el mercurio en forma de vapor y gas de argón, a su vez se encuentra que el tubo está cubierto por un polvo, este posee un numero de compuestos del fosforo presentes allí, estos agregados son los que determinan el color de la luz que proviene de dichas luminarias¹⁴.

Cuando se habla de análisis granulométrico de cualquier tipo de muestra, se hace referencia al tamaño y distribución de los tamaños de partícula presentes en la misma, como se menciona en la sección 3.2.1, en donde se indica el procesamiento realizado al vidrio recolectado proveniente de las luminarias desechadas. Es primordial conocer la distribución de tamaños del vidrio, ya que de este depende su posterior reutilización, entre ellas su posible incorporación directa en otros materiales, tales como concretos¹⁵ o cerámicas basadas en arcilla¹⁶.

En la figura 3 de la sección 4.1, se puede observar la distribución granulométrica del vidrio (imagen a), y el análisis realizado mediante el método de regresión de Rosin-Rammler, encontrándose que el mismo indica que el tamaño medio de la distribución (d_{50}) es igual a 1175,85 micrómetros (imagen b), este análisis se realizó a partir del porcentaje acumulado pasante con respecto al tamaño de partículas. Ahora bien, si lo que se busca es el reciclaje del vidrio, es decir, su procesamiento para fabricar nuevos artículos de vidrio, el material proveniente de la trituración al vacío de las luminarias fluorescentes no puede emplearse de manera directa. Hay

¹⁴ ANGULO, L, Y ROMERO, M. Op. Cit.

¹⁵ GARCIA, R. Op. Cit.

¹⁶ ESCARPINI, V. Op. Cit.

que tener en cuenta que dentro de las luminarias el vidrio está ligado a varios compuestos que deben ser tratados por separado, vale decir, el polvo fosforado y los restos de metales (conectores).

En el presente trabajo, los metales se retiraron a través de un proceso de tamizado y selección visual, antes de someterse a fundición. El fundido resultó ser una aleación compleja, compuesta de aluminio, hierro, cobre y zinc, principalmente, los cuales son los metales con los que se manufacturan normalmente los cabos y los conectores de las luminarias ^{17 18}.

Por su parte, el vidrio se sometió a un lavado con HCl, este con el fin de separar el vidrio del polvo fosforado, y así obtener un vidrio libre de polvo y limpio para su reutilización, estos resultados se muestran en la sección 4.2.2, donde se muestran los análisis de DRX. Al realizar el lavado como se mencionó en la sección 3.3, es de esperarse que todos los elementos presentes en el polvo fosforado resulten solubilizados y arrastrados por la solución utilizada para dicho lavado, dejando la muestra de vidrio limpia (libre de polvo fosforado). En el presente trabajo, la solución de HCl empleada en este proceso, se sometió a evaporación. Este proceso permitió obtener un sólido (sal mostrada en la figura 10) cuyo análisis químico semicuantitativo se encuentra en la tabla 4. Si bien, no ha sido posible encontrar en la bibliografía consultada valores con los cuales comparar estos resultados, sí existen reportes acerca del contenido de metales de los polvos fosforados utilizados dentro de las lámparas fluorescentes¹⁹, cuyos valores típicos se encuentran mostrados en el anexo 3. Del análisis de la misma se desprende que los polvos fosforados contienen cantidades importantes de calcio, hierro, manganeso, magnesio, sodio y otros metales, lo cual concuerda con los resultados mostrados en la tabla 4. Por otro lado, como se aprecia en la figura 9, en vista de que el vidrio

¹⁷ ANGULO, L, Y ROMERO, M.

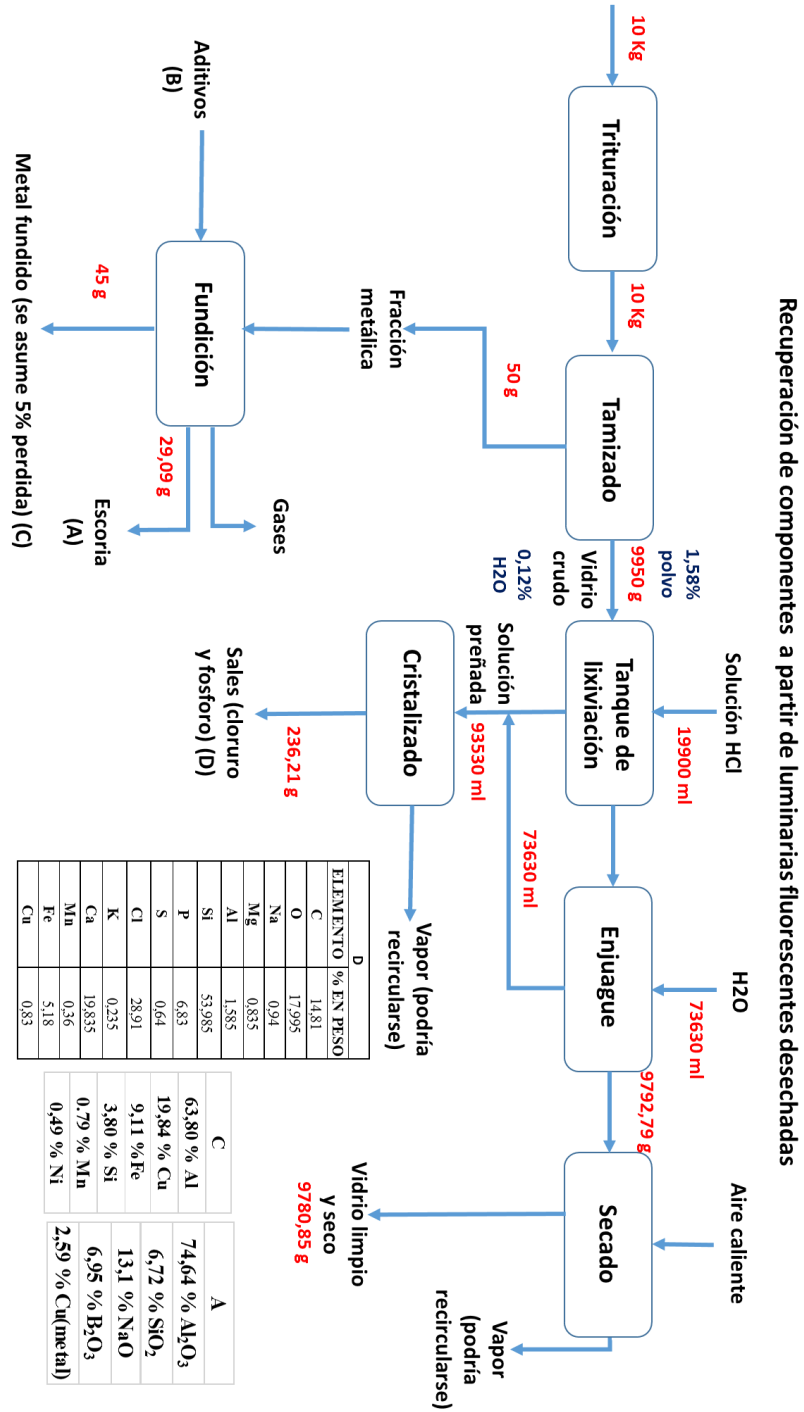
¹⁸ GARCIA, R.

¹⁹ BATTYE, W. Evaluation of mercury emissions from fluorescent lamp crushing, CONTROL TECHNOLOGY CENTER, EPA-453/R-94-018, 1994 pag 3

libre de polvo (lavado) no presenta fases cristalinas en los DRX, ya que es un material amorfo, los máximos de difracción observados en el vidrio crudo (sin lavar) serían generados por la presencia de polvos fosforados en la muestra. Por tanto, se obtiene que los polvos fosforados presentes en las luminarias están compuestos de manera mayoritaria por fases de carbonato de calcio y fluorapatita, un tipo de fosfato de calcio.

Estos resultados son compatibles con las señales importantes de Ca y P mostradas en los análisis EDX de la figura 5 y tabla 1. Ambos elementos, Ca y P, se encuentran de forma importante en los cristales de sal obtenidos de la evaporación de la solución obtenida al lavar el vidrio crudo, lo que significa que se logró extraer y concentrar el polvo fosforado que estaba inicialmente pegado al vidrio crudo, bajo la forma de este subproducto salino. Se aprecia que la sal precipitada contiene importantes cantidades de Cl, como consecuencia de que se utilizó HCl en su procesamiento. Estos resultados permitieron plantear el proceso de recuperación de componentes valiosos, el cual se realizó con el fin de poder diseñar una propuesta de recuperación para el aprovechamiento de los materiales presentes en esta clase de residuos. Así, se diseñó el diagrama de flujo de un proceso conceptual mostrado en la figura 15, para el tratamiento de los residuos de vidrio y fracciones metálicas que se obtienen del procesamiento por trituración al vacío de luminarias fluorescentes gastadas y así mismo desechadas, este proceso se muestra a una escala real, allí se puede observar de manera directa, composiciones, porcentajes, separación y distribución de materiales a medida que se iba desarrollando el proceso, a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo. El diagrama de flujo propuesto a continuación, se muestra como un proceso general a una escala de material de 10 Kg, siendo esta la cantidad utilizada durante todo el proyecto.

Figura 15. Diagrama de flujo conceptual, propuesto a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, para un proceso de reciclaje de residuos de vidrio provenientes de la trituración al vacío de luminarias fluorescentes.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se arriba a las siguientes conclusiones específicas:

- Fue posible la separación efectiva de los tres principales componentes del residuo sólido proveniente del proceso de trituración al vacío de las luminarias fluorescentes desechadas, a saber: vidrio, polvo fosforado y residuos metálicos, a través de procedimientos sencillos de tamizado, selección visual y lavado (lixiviación) con HCl.
- Los análisis de difracción de rayos X y de microscopía SEM con EDX permitieron establecer que el procedimiento de lavado con HCl facilita la total separación del vidrio del polvo fosforado, con lo cual se garantiza la posible reutilización y/o reciclaje de este componente, sin el inconveniente que plantearía el hecho de tenerlo combinado con el polvo fosforado.
- Al someter a un proceso de evaporación/cristalización la solución resultante del lavado del vidrio crudo, se obtiene un producto (sal) rico en calcio y fósforo, el cual puede encontrar aplicaciones industriales, debido a la naturaleza de su composición.
- La fusión de los restos metálicos separados del desecho da lugar a una aleación muy compleja, la cual podría requerir de procesos adicionales para poder ser aprovechadas.
- Con los resultados analíticos obtenidos en el trabajo se logró diseñar un diagrama de flujo conceptual para el aprovechamiento de los componentes

valiosos presentes en los residuos sólidos provenientes del procesamiento al vacío de las luminarias fluorescentes desechadas.

BIBLIOGRAFIA

AMBILAMP, Aparatos Eléctricos y Electrónicos, gestión de residuos (RAEE), Asociación para el reciclaje de lámparas, guía didáctica para alumnos, 2005.

ANGULO, L, Y ROMERO, M. Análisis de alternativas para el manejo de lámparas fluorescentes de tubo desechadas, Área Metropolitana del Valle de Aburra (tesis de pregrado). Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá, Colombia. 2006.

BALLESTER, A.; VERDEJA, L.F.; SANCHO, J.: “Metalurgia extractiva: Volumen I y II”, Síntesis, 2000.

BATTYE, W. Evaluation of mercury emissions from fluorescent lamp crushing, CONTROL TECHNOLOGY CENTER, EPA-453/R-94-018 1994

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO Territorial. “Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Bogotá, D.C. Centro Nacional de Producción más Limpia” 2009.

ESCARPINI, V. Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic, the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2016.

GARCIA, R. Aplicación del vidrio reciclado de luminarias fluorescentes como agregado en mezclas de cemento (tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2014.

HERNÁNDEZ, C. Triturador de lámparas con colector de mercurio (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. 2014.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, resolución N°1511, “Por la cual se establecen los Sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de Residuos de bombillas y se adoptan otras disposiciones”. 2010.

P. AARNE VESILIND. The Rosin-Rammler Particle Size Distribution, Resource Recovery and Conservation. 1980 275-277.

TUFRO, V. Destino final de los equipos electrónicos obsoletos de usuarios corporativos de TIC en Argentina. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2010.

ANEXOS

Anexo A. Ejemplo del análisis de regresión lineal mediante el método de Rosin-Rammler, para el cálculo del d50.

tamaño (X), micrometros	% acum pasante	Ln(-Ln(1-F))	Ln X
6300	97,212	1,275319697	8,7483049
4000	95,329	1,119654998	8,2940496
2000	74,106	0,300962672	7,6009025
850	31,793	-0,960705142	6,7452363
425	15,364	-1,790896973	6,0520892
212	15,146	-1,806438358	5,3565863
150	7,836	-2,505918821	5,0106353
106	5,83	-2,812269261	4,6634391
75	4,27	-3,131816475	4,3174881

$$F=(\%acum\ pas/100)$$

$$\ln(-\ln(1-f)) = 1,0251 \ln(x) - 7,6137$$

d50 es el valor de "x"

Cuando f=0,5

$$\ln(-\ln(1-0,5)) = -0,3665$$

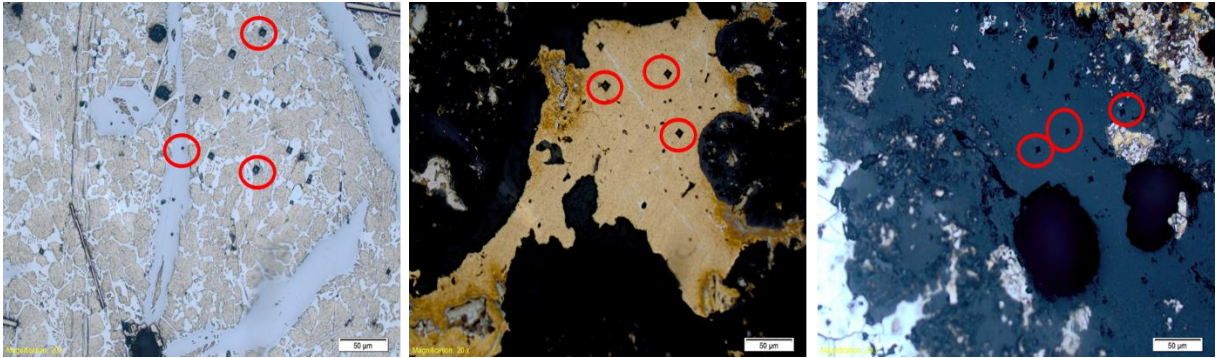
Entonces;

$$-0,3665 = 1,0251 \ln(x) - 7,6137$$

$$\ln(x) = 7,0697$$

$$x = 1175,85 \mu m = d50$$

Anexo B. Huellas provenientes del indentador en la microdureza.



Anexo C. Valores semicuantitativos del contenido de metales de los polvos fosforados utilizados dentro de las lámparas fluorescentes usados como referencia de comparación con los obtenidos en este proyecto.

Element	Concentration (mg element/kg phosphor powder)
Aluminum	3,000
Antimony	2,300
Barium	610
Cadmium	1,000
Calcium	170,000
Chromium	9
Cobalt	2
Copper	70
Iron	1,900
Lead	75
Magnesium	1,000
Manganese	4,400
Mercury	4,700
Nickel	130
Potassium	140
Sodium	1,700