

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

Caracterización y aprovechamiento de residuos sólidos generados en el proceso de copelación mediante su inclusión como materia prima en la fabricación del concreto

Astrid Carolina Carvajal Grimaldos

Plan de proyecto de grado para optar el título de Química Ambiental

Director:

Hernando Alberto Camargo García Qco, Ph.D

Codirectores:

Luis Eduardo Jaimes Reatiga Ing. Qco, .M.Sc

David Ricardo Gutiérrez Serrano Ing. Civil, M.B.A.

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

2018

Dedicatoria

*A Dios, por iluminar mi camino y darme la perseverancia necesaria
para materializar este proyecto.*

*A mis padres Noé y Mary Luz, por estar siempre en mi vida
apoyándome y brindándome todo su amor, comprensión y consejo.*

*A mis hermanos y sobrinas, por la fuerza, la alegría y el optimismo que
infunden en mí.*

Agradecimientos

A mi director, Dr Hernando Alberto Camargo, por la orientación, seguimiento y supervisión continua de la investigación, pero sobre todo por la motivación, apoyo y disposición durante estos años de formación.

Al sector joyero de la ciudad de Bucaramanga, especialmente al Qco. Eladio Lozano quien a pesar de sus ocupaciones siempre estuvo dispuesto a brindar su ayuda y proporcionar el espacio y los materiales necesarios para experimentación en su taller.

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Rayos-X de la Universidad Industrial de Santander en cabeza del Dr. José Antonio Henao, por su colaboración en la toma de datos de difracción de rayos-X.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, por su asesoría y diligente ayuda, cruciales para el desarrollo de la investigación.

Al Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Energías Alternativas (GINMEA), por sus aportes al proyecto, por el empeño y dedicación en el proceso de formación de buenos profesionales y por todos los buenos momentos compartidos.

Tabla de contenido

	Pág.
Lista de tablas	7
Lista de figuras.....	8
Resumen.....	9
Introducción	10
1. Planteamiento del problema	11
2. Justificación.....	13
3. Objetivos.....	14
3.1 Objetivo general	14
3.2 Objetivos específicos.....	15
4. Marco de referencia	15
4.1 Marco de antecedentes	15
4.2 Marco teórico.....	18
4.2.1 Sector joyero en Bucaramanga	18
4.2.2 Métodos de purificación del oro	19
4.2.3 Impacto ambiental del proceso de copelación	24
4.2.4 Análisis del ciclo de vida – SIMAPRO..	25
4.2.5 Caracterización química	29
4.2.6 El óxido de plomo (PbO) y sus regulaciones.....	30
4.2.7 Utilización de residuos peligrosos en elaboración de materiales	32
4.2.8 Sellos verdes y obras civiles	33
5. Metodología.....	36
5.1 Caracterización del oro por el método de copelación.....	36
5.2 Identificación y cuantificación de fases cristalinas de las copelas antes y después del proceso por medio de Difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRX	38
5.3 Análisis del ciclo de vida (ACV) del proceso de copelación.....	40
5.3.1 Definición del objetivo del ACV.....	40
5.3.2 Definición del alcance.	41

5.3.3 Tipos de impacto y metodología de evaluación.	42
5.3.4 Inventario del ciclo de vida (ICV).....	42
5.4 Estudio de aprovechamiento de residuos sólidos	43
5.4.1 Elaboración de concreto	43
5.4.2 Prueba de resistencia a la compresión	47
5.4.3 Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad “Toxicity Characteristic Leaching Procedure” (TCLP).....	48
6. Resultados.....	51
6.1 Caracterización de muestras de oro mina por medio de la metodología de copelación	51
6.2 Identificación y cuantificación de fases cristalinas de las copelas antes y después del proceso	56
6.3 Análisis de ciclo de vida (ACV) mediante el programa SimaPro	58
6.3.1 Esquema general (Balance del proceso).....	58
6.3.2 Evaluación del impacto ambiental a partir del ACV del proceso	60
6.4 Estudio de aprovechamiento de residuos sólidos generados en el proceso de copelación	81
6.4.1 Elaboración de concreto y pruebas de resistencia a la compresión	81
6.4.2 Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad (TCLP).	83
Conclusiones	86
Recomendaciones	88
Referencias bibliográficas.....	89

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Categorías de impacto ambiental</i>	27
Tabla 2. <i>Curva de calibración del plomo (Pb)</i>	50
Tabla 3. <i>Descripción del proceso de copelación</i>	52
Tabla 4. <i>Fases cristalinas copelas antes del proceso</i>	56
Tabla 5. <i>Fases cristalinas de copelas después del proceso</i>	57
Tabla 6. <i>Inventario de ciclo de vida (ICV). Entradas del proceso. Oro mina</i>	60
Tabla 7. <i>Inventario de ciclo de vida (ICV). Salidas del proceso. Oro mina</i>	62
Tabla 8. <i>Concentraciones de plomo (Pb) en lixiviados por medio del procedimiento TCLP</i> .	84

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Copela inicial	19
<i>Figura 2.</i> Materias primas del proceso de copelación	20
<i>Figura 3.</i> Copelas con el doré y plomo absorbido.....	21
<i>Figura 4.</i> Doré atacado por ácido nítrico HNO ₃	21
<i>Figura 5.</i> Calcinación de la muestra de oro final.....	22
<i>Figura 6.</i> Logo del Sello Ambiental Colombiano	34
<i>Figura 7.</i> Ingreso de materias primas del proceso de copelación a la mufla precalentada.....	37
<i>Figura 8.</i> Botón oro-plata (Doré) antes y después del enfriamiento	37
<i>Figura 9.</i> Muestra final de oro puro.....	38
<i>Figura 10.</i> Copelas inicial y final del proceso de caracterización del oro.....	39
<i>Figura 11.</i> Difractómetro de polvo.....	39
<i>Figura 12.</i> Elaboración propia.....	43
<i>Figura 13.</i> Mezcla para concreto	44
<i>Figura 14.</i> Muestras de cilindros de concreto	45
<i>Figura 15.</i> Curado de especímenes de concreto	45
<i>Figura 16.</i> Copela final triturada	46
<i>Figura 17.</i> Prueba de resistencia a la compresión del concreto.....	47
<i>Figura 18.</i> Montaje para agitación rotatoria, TCLP	49
<i>Figura 19.</i> Espectrofotómetro de absorción atómica de llama	50
<i>Figura 20.</i> Diagrama de flujo del proceso de copelación.....	59
<i>Figura 21.</i> Red general de cargas ambientales. Puntuación única	64
<i>Figura 22.</i> Red de cargas ambientales. Categoría NO _x	66
<i>Figura 23.</i> Red de cargas ambientales. Categoría SO _x	67
<i>Figura 24.</i> Red de cargas ambientales. Categoría Pb en el aire	68
<i>Figura 25.</i> Red de cargas ambientales. Categoría Pb en el agua.....	69
<i>Figura 26.</i> Red de cargas ambientales. Categoría cambio climático.....	71
<i>Figura 27.</i> Red de cargas ambientales. Categoría acidificación terrestre.....	73
<i>Figura 28.</i> Red de cargas ambientales. Categoría toxicidad humana.....	75
<i>Figura 29.</i> Red de cargas ambientales. Categoría eutrofización de agua dulce	77
<i>Figura 30.</i> Red de cargas ambientales. Categoría agotamiento de recursos minerales	78
<i>Figura 31.</i> Red de cargas ambientales. Categoría agotamiento de combustibles fósiles	80
<i>Figura 32.</i> Elaboración y curado de los especímenes.....	81
<i>Figura 33.</i> Resultados del ensayo de resistencia a la compresión	82
<i>Figura 34.</i> Curva de calibración para la determinación de plomo (Pb).....	84

Resumen

La ciudad de Bucaramanga es reconocida como una de las principales productoras de joyas del país, sin embargo, actualmente se ignora la problemática ambiental generada en los procesos de purificación y caracterización de los metales preciosos empleados para la elaboración de las prendas, de los cuales el más conocido es la copelación. El desconocimiento de la naturaleza de los subproductos altamente contaminantes derivados de cada una de las etapas de la copelación, hace que no haya ningún control en la emisión de los mismos, provocando que continuamente se liberen residuos sólidos, líquidos y gaseosos que ocasionan un deterioro progresivo al medio ambiente. Sumado a lo anterior no se tiene un control de riesgos laborales para los joyeros que subvaloran los efectos nocivos que tienen las sustancias usadas en dicho análisis del oro.

El presente trabajo tuvo como finalidad caracterizar químicamente mediante Difracción de Rayos-X las copelas de entrada y salida del proceso de copelación, con el fin de elaborar un análisis del ciclo de vida (ACV) que permitió evaluar el impacto ambiental generado. Finalmente, se realizó un estudio de aprovechamiento de los residuos sólidos resultantes de esta metodología de caracterización incorporándolos a la elaboración de concreto.

Palabras clave: Copelación, Difracción de Rayos-X, Análisis de ciclo de vida, Evaluación del impacto ambiental

Introducción

Actualmente las diferentes empresas realizan evaluaciones de impacto ambiental como herramienta de prevención y control en los procesos o actividades que se consideren potenciales generadores de efectos adversos significativos en el entorno. Sin embargo, el rango de acción de este instrumento se limita a procesos de gran envergadura, como por ejemplo la minería a gran escala, dejando de lado a los sectores artesanales que durante su proceso productivo impactan de manera negativa al medio ambiente, como lo es la joyería (Ortegón Acosta, 2016).

El sector joyero en Bucaramanga es reconocido por la elaboración de productos de alta calidad. Sin embargo, la informalidad, la bisutería y la competencia con prendas que se importan de países como China y Panamá (Aldana Piñeros, 2015), hacen que se utilicen procesos de refinación y purificación de metales preciosos a bajos costos, pero con alto impacto en la salud del ser humano y su entorno. La copelación como proceso de caracterización del oro, sigue siendo el método más efectivo y deseado por los joyeros, pero posee una baja tecnificación que trae como consecuencias el mal manejo de los residuos sólidos, líquidos y gaseosos generados.

Por otra parte, la cultura de prevención de los riesgos laborales en el país es aún incipiente, esto debido a que muchas de las actividades productivas se desarrollan de manera informal y sin la capacitación necesaria tanto para los empleadores como para sus empleados, lo que conlleva a la falta de cultura de seguridad en las organizaciones (Garrido Cabarique, 2015).

La industria joyera en la elaboración de sus productos cuenta con procesos de alto riesgo tanto para el medio ambiente como para los seres humanos, debido a que en algunas de sus operaciones de caracterización, purificación, modelación, ensamble, abrillantamiento, entre otros,

se emplean reactivos químicos que originan impactos negativos en el entorno. Por tanto, mediante el presente trabajo se identificaron los riesgos originados en el proceso de caracterización del oro, conocido como copelación, mediante el análisis químico por Difracción de rayos X de las copelas de entrada y de los residuos sólidos resultantes al final de este proceso. Asimismo, se estudió una vía de aprovechamiento de las copelas usadas, con la que se lograría reducir el impacto ambiental y problemas de salud pública generados por la acumulación y disposición final que se lleva a cabo actualmente.

1. Planteamiento del problema

La ciudad de Bucaramanga es reconocida como una de las principales proveedoras de joyería moderna, produce anualmente cerca del 70% de la oferta nacional (Pimiento, Armando, Díaz, & Johanna, 2013), por lo que éste sector es reconocido como una fortaleza económica para la región. Según la Comercializadora Internacional BUC Joyas, para el año 2015 se encontraban registradas cerca de 300 empresas dedicadas a la producción joyera y se estima que el sector en general puede superar los 700 talleres (Garrido Cabarique, 2015).

La elaboración de joyas de alta calidad requiere del uso de oro con bajo contenido de impurezas. Por tal motivo, uno de los procesos que demanda más atención es la caracterización del metal. La copelación es un método muy conocido por el sector joyero enfocado a la caracterización del oro, el cual consiste en el refinamiento químico del metal precioso haciendo uso de agentes como ácido nítrico y plomo, que traen como consecuencia la generación de

emisiones de gases, efluentes líquidas y acumulación de sólidos tóxicos, ocasionando problemas de contaminación ambiental y daños en la salud de los trabajadores.

La copelación es un proceso de gran tradición y es realizado de forma artesanal. Los trabajadores que se dedican a este proceso, subvaloran y en algunos casos, ignoran los riesgos que conlleva el uso de las sustancias químicas empleadas en la caracterización y refinación del oro y el contacto continuo con los desechos generados. La desinformación de las consecuencias que genera manipular las sustancias y residuos de forma inadecuada es un problema actual que debe ser solucionado. El ácido nítrico (HNO_3) es el principal reactivo usado en el proceso, su exposición tiene repercusiones negativas para el ser humano al presentarse tanto en forma líquida como gaseosa, es altamente corrosivo y tóxico, puede generar graves quemaduras y dermatitis. Su exposición a la atmósfera contribuye a la lluvia ácida y al ser desechado a los cuerpos de agua dulce, provoca su acidificación, lo que repercute en la formación de toxinas que afectan a los organismos acuáticos (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Por otra parte, el plomo, metal usado como material colector de las impurezas del oro, se libera a la atmósfera, y gran parte se acumula como residuo sólido dentro de la copela una vez finalizado el proceso, situación que hace que los joyeros tengan contacto directo con dicho metal, catalogado como tóxico según la Organización Mundial de la Salud (OMS), ya que estudios realizados han demostrado que afecta el sistema hematológico, neurológico, renal, gastrointestinal, óseo, entre otros (Cabrera & Paola, 2016). Esta situación que se agudiza al observarse que estos residuos peligrosos se manipulan, almacenan y desechan sin las medidas higiénicas y de seguridad necesarias y exigidas por la normatividad vigente.

La copelación, como se ha mencionado, es un proceso artesanal fundado por la tradición joyera y de bajo desarrollo tecnológico, pero hasta el momento en nuestra región no se han tenido

en cuenta los efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente producidos por los residuos que se generan en cada una de las etapas de dicho análisis del oro.

De acuerdo a la situación identificada, se plantearon las siguientes preguntas problemáticas para su estudio:

¿Es posible caracterizar los residuos sólidos generados en el proceso de copelación?

¿Se puede incluir los residuos sólidos generados en la copelación al proceso de fabricación del concreto sin afectar negativamente las propiedades del mismo?

2. Justificación

Desde la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), realizada en 1992, se planteó la necesidad de actuar de forma prioritaria para reducir y mitigar las acciones que impactan negativamente al medio ambiente. El sector productivo global manifestó el interés de contribuir con esta problemática, por lo que es prelación reevaluar las metodologías empleadas en los diferentes procesos productivos para aminorar los efectos colaterales que causan el deterioro al ambiente. La joyería, siendo uno de los renglones económicos más representativos de la ciudad de Bucaramanga y que entre sus procesos requiere de la caracterización y tratamiento de materias primas para generar piezas de alta calidad competentes en el mercado, hace uso de metodologías como la copelación, la cual origina descargas considerables de contaminantes.

El proceso de copelación se compone de dos etapas: en la primera de ellas se producen gases y sólidos contaminantes (vía seca) y en la segunda se generan residuos líquidos nocivos al

ambiente y a los seres vivos (vía húmeda). En el presente trabajo se realizó la caracterización química de la primera etapa, específicamente de los residuos sólidos, mediante la determinación de fases cristalinas por difracción de rayos-X de las copelas iniciales y finales, haciendo de esta manera un acercamiento real a la carga contaminante del proceso para finalmente evaluar las repercusiones negativas al ser liberadas al medio ambiente.

Por último, es necesario contribuir significativamente en la solución de esta problemática ambiental, buscando alternativas de disposición final de los residuos sólidos generados. Por esta razón, se emplearon los residuos de copelas en la elaboración de concreto, estudiando la viabilidad de esta alternativa en la reducción de los riesgos de contaminación que se producen al ser lixiviados productos tóxicos provenientes del proceso al suelo y cuerpos de agua.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Desarrollar una alternativa de aprovechamiento de residuos sólidos generados en la copelación mediante su inclusión en la fabricación de concreto, teniendo en cuenta la caracterización química y análisis de ciclo de vida.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar por medio de difracción de rayos-X las copelas iniciales y finales del proceso de copelación.

- Elaborar el análisis del ciclo de vida del proceso de copelación haciendo uso del programa SIMAPRO, identificando la carga contaminante y productos de cada una de las operaciones del proceso.

- Analizar las posibles vías de recuperación de los residuos sólidos generados mediante la experimentación a escala de laboratorio.

-

4. Marco de referencia

4.1 Marco de antecedentes

El oro es uno de los metales más conocidos por el hombre desde la antigüedad, pero hasta el siglo XIX no recibía ningún proceso de refinamiento antes de la elaboración de las piezas de interés, simplemente se recogía de sus yacimientos y dependiendo de su maleabilidad se elaboraban las joyas o el material adecuado. Años más tarde, aparecieron los primeros métodos para la caracterización y refinamiento del metal, que fueron los procedimientos pirometalúrgicos, como la copelación. Estos métodos son conocidos como clásicos y son utilizados con frecuencia en la actualidad por los principales países productores de oro pese a que en las últimas décadas se han

estudiado nuevos procesos, esto debido a que la mayoría de talleres dedicados a la joyería lo siguen haciendo de forma artesanal (Alguacil, 1995).

En el año 2005 Ponce Miguel, llevó a cabo una investigación para determinar las metodologías más adecuadas para el análisis del oro, en cuanto a calidad y rendimiento, con el fin de mejorar la comercialización del metal producido en la región de Puno, Perú, debido a que se obtenía oro refogado negro por la presencia de altas concentraciones de otros minerales, dificultando su comercialización y valorización; a partir de sus ensayos, usando los procesos de copelación, agua regia y agua regia encuartante, logró concluir que el proceso de separación del oro que presenta mayor eficiencia es la copelación, dando como producto oro fino con hasta un 99,5% de pureza.

Una de las preocupaciones más latentes derivadas del proceso de copelación es la utilización del plomo, agente altamente contaminante. En respuesta a esta problemática, Toapanta Guido, formuló en el año 2011 un proyecto de investigación titulado “Análisis de oro y plata de concentrados gravimétricos auríferos mediante ensayo al fuego utilizando cobre como colector” con el fin de estudiar la viabilidad de reemplazar el plomo por el cobre como agente colector de los metales preciosos en la segunda etapa del ensayo al fuego. En su desarrollo se trataron las muestras a purificar con hidróxido de cobre en polvo ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) encontrando resultados positivos al recuperarse el oro y la plata totales en una fase metálica compuesta básicamente por cobre, plata y oro en la segunda etapa de fundición (Cartagena Toapanta, 2011).

En el año 2015, Castro Damián y Abraham José, estudiaron la copelación como parte de la metodología para la aplicación de la técnica de encuarte por filtración en métodos gravimétricos, en la cual se adicionaba plata químicamente pura con el fin de aumentar la eficiencia del proceso

y lograr tratar muestras en las que el porcentaje de plata era mayor que el de oro (Castro Damián, 2015).

Un estudio más reciente, realizado en el año 2016 por Rojas William y Saavedra Walter emplea el proceso de copelación sin ninguna variación a la metodología estándar, con el fin de evaluar el rendimiento del nitrato de plata (AgNO_3) obtenido a partir de la solidificación de la solución resultante en la etapa de separación por vía húmeda del botón oro-plata extraído de la copela, con el fin de suplir la demanda de cristales de nitrato de plata (AgNO_3) del Laboratorio Químico de la Empresa Minera Century Mining S.A.C. ubicado en el Departamento de Arequipa, Perú, y que se dedica al procesamiento de minerales auríferos sulfurados y minerales auríferos oxidados empleando dicho compuesto en la purificación del oro cuando las muestras tienen bajo contenido de este metal, con lo que no solo se reducen los costos de reactivos en el laboratorio sino que también se minimiza la problemática de los efluentes líquido resultantes de la utilización de esta metodología (Rojas Ocaña & Saavedra Vargas, 2016).

Teniendo en cuenta la afectación ambiental provocada por los residuos sólidos de la copelación que contienen óxido de plomo (PbO), investigadores de la Universidad Federal de Ouro Preto y de la Universidad Federal de Viçosa en Minas Gerais, Brasil, en el año 2016 (Cerceanu et al., 2016) propusieron un proceso de lixiviación para eliminar el plomo (Pb) de los desechos de la copela, usando ácido sulfúrico (H_2SO_4) como agente lixivante, lo que permitió recuperar el 92% del plomo en forma de sulfato de plomo (PbSO_4). Con este estudio se logró también catalogar estos residuos como peligrosos al comprobar que el plomo se encontraba en niveles superiores a los permitidos por la legislación brasileña.

4.2 Marco teórico

4.2.1 Sector joyero en Bucaramanga. Debido a la tradición joyera de la capital de Santander, la orfebrería se ha convertido en una importante fuente de empleo en la que se forman muchos artesanos que elaboran piezas en oro y plata con incrustaciones de piedras preciosas. Los minerales son extraídos de minas ubicadas en municipios cercanos como California y Vetas y las piedras son traídas principalmente del departamento de Boyacá (Pimiento et al., 2013).

Cifras reportadas indican que en el año 2015 se contaban alrededor de 300 empresas reconocidas en el sector joyero de Bucaramanga. Sin embargo, teniendo en cuenta los pequeños talleres dedicados a éste renglón que emplean en promedio a cinco trabajadores directos, esta cifra podría superar las 700 empresas (Garrido Cabarique, 2015).

En cuanto a los productos, se reporta que el 50% de los talleres se dedican a la elaboración únicamente de anillos, otro 20 % elabora anillos y artes y el porcentaje restante divide su producción en cadenas, dijes y demás prendas. De los productos vendidos en el mercado nacional, tan solo el 31% se comercializa localmente en Bucaramanga y su área Metropolitana, el resto se reparte en otras ciudades del país, principalmente en los mercados de Bogotá, Cúcuta, Medellín, Cali y Barranquilla.

Aunque Colombia no tiene una exportación considerable en cuanto a joyería, ha logrado vender sus productos en países como Estados Unidos, Canadá, Panamá, México, Italia, Alemania y España, mercado del cual Bucaramanga soporta el 70% de la producción de las piezas exportadas (Pimiento et al., 2013).

4.2.2 Métodos de purificación del oro. El oro fue uno de los primeros elementos conocidos por el hombre y desde el primer momento ha tenido gran relevancia debido a su utilización como moneda, elemento decorativo, componente de aparatos electrónicos o por su uso en otros campos, por tanto se han estudiado varios métodos para su refinación, como los procedimientos pirometalúrgicos donde se encuentra la copelación y los hidrometalúrgicos de los cuales el más relevante es el método de purificación con agua regia (Alguacil, 1995).

4.2.2.1 Copelación. La copelación es un método de separación basada en las diferencias existentes entre los puntos de fusión del plomo y los metales preciosos, junto con la afinidad para absorber el oxígeno, comportamiento que se debe a que los metales preciosos o nobles no se oxidan a altas temperaturas.

El procedimiento comienza con el precalentamiento de la copela, material poroso usado en la copelación, mostrada en la figura 1, la cual es introducida a una mufla que se encuentra a $\pm 750^{\circ}\text{C}$ por un espacio de 30 minutos.



Figura 1. Copela inicial

Una vez eliminada la humedad de la copela, se coloca en su superficie la lámina de plomo, que contiene el oro a purificar y la plata, este conjunto se introduce en la mufla que se encuentra a

$\pm 900^{\circ}\text{C}$, allí el óxido de plomo (PbO) formado por el plomo metálico que se evapora y el aire dentro de la mufla, debe alcanzar una temperatura no menor a 890°C , ya que de no ser así no se puede garantizar una fluidización suficiente del botón al colocarse el óxido de plomo (PbO) en la superficie del plomo sólido impidiendo de esta manera que se funda. El peligro que existe en esta temperatura es la pérdida significativa que puede haber de plata, debido a que ésta presenta una elevada presión de vapor a los 900°C .



Figura 2. Materias primas del proceso de copelación

Así, una gran parte del total del plomo es absorbida por la copela, que es un material poroso constituido por una mezcla comprimida de ceniza de hueso y cemento gris en proporción 31:69 respectivamente, para dar lugar a la formación de un botón (doré) constituido por los metales preciosos oro-plata que queda en la superficie de la copela (figura 3).



Figura 3. Copelas con el doré y plomo absorbido

Una vez obtenido el botón se hace necesario separar el oro y la plata, siguiendo un procedimiento por vía húmeda, no sin antes haber laminado y pesado dicho botón. Cuando se haya realizado esta operación, la lámina se lleva a un crisol de porcelana y se somete al ataque de ácido nítrico (HNO_3) diluido (1:7) (figura 4), se calienta hasta antes del punto de ebullición y luego de haber realizado este primer proceso, se vacía el licor a un vaso de precipitado para posteriormente recuperar la plata disuelta y a la lámina que permanece en el crisol se somete a una nueva reacción con ácido nítrico (HNO_3) de concentración mayor (1:1), y se seguirá este último proceso hasta que el analista considere que se ha lixiviado toda la plata de la lámina.



Figura 4. Doré atacado por ácido nítrico HNO_3

Una vez se dé por terminado el ataque, se hace un lavado riguroso para evitar que parte del nitrato de plata (AgNO_3) formado permanezca en el crisol. La lámina que en ese momento debe contener sólo el oro, se somete a calentamiento para lograr que doré (figura 5) y se pesa en una balanza analítica (Gaviria, Restrepo, & Bustamante, 2007).

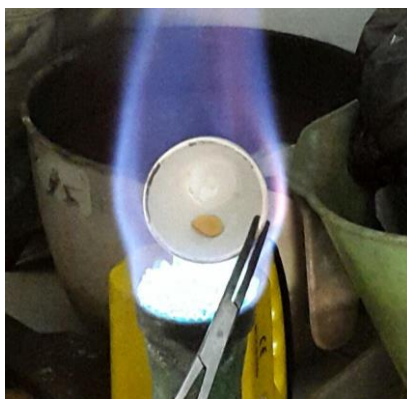
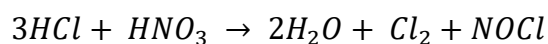


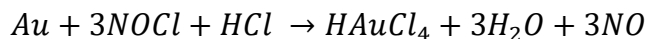
Figura 5. Calcinación de la muestra de oro final

4.2.2.2 Purificación con agua regia. Esta es una técnica de purificación conocida desde hace muchos años, por tanto ha sido un proceso altamente estudiado y fundamentalmente aplicado a la refinación química del oro, enfocada a muestras con alto contenido de metal amarillo y bajas proporciones de plata, ya que si no se cumplen estas condiciones, se dificulta la disolución debido a la formación de capas de cloruro de plata (AgCl) sobre la superficie metálica del oro (Nordberg, 2012).

El agua regia, es una solución compuesta de ácido nítrico (HNO_3) y ácido clorhídrico (HCl) en proporción (1:4), los cuales reaccionan de la siguiente forma:



Para esta metodología, la muestra a purificar se prepara mediante calcinación hasta reducir el peso original en un 10% para luego introducirla en agua regia, donde se produce la disolución del oro por acción del agente oxidante formado (NOCl), de acuerdo a la reacción:



El óxido nítrico (NO) producido es un gas inestable que se combina rápidamente con el oxígeno de la atmósfera, liberando entonces vapores de dióxido de nitrógeno (NO₂) de color pardo rojizo. Con el fin de garantizar una completa disolución del oro, se añade agua regia adicional por lo menos cuatro veces con intervalos de tiempo previamente establecidos.

Posteriormente, el material se filtra haciendo uso de papel filtro cualitativo colocado en un embudo de vidrio, realizando lavados con ácido clorhídrico (HCl) y agua caliente. La solución finalmente obtenida, puede presentar colores como verde esmeralda, azul pastel o amarillo miel, colores que tienen relación con la presencia de iones plata, cobre u oro disueltos.

Una vez el material ha sido disuelto, es necesaria la liberación del ácido nítrico (HNO₃), para lo que se deja en ebullición la disolución filtrada resultante con exceso de ácido clorhídrico (HCl). Finalmente, la recuperación del oro se hace por reducción química selectiva del cloruro áurico a metal. Este procedimiento se puede llevar a cabo con varios agentes reductores como el sulfato ferroso (FeSO₄), ácido oxálico (C₂H₂O₄), anhídrido sulfuroso (SO₂), sulfato de sodio (NaSO₄), bisulfito de sodio (NaHSO₃), entre otros. Para cada uno de ellos se deben realizar procedimientos específicos, siendo algunos gaseosos y otros requiriendo la aplicación de calor (Nordberg, 2012).

4.2.3 Impacto ambiental del proceso de copelación. La copelación como técnica de caracterización y refinación química del oro, es un proceso pirometalúrgico que tiene emisiones contaminantes de tipo líquido, sólido y gaseoso.

Esta metodología emplea ácido nítrico (HNO_3) como único solvente para la purificación del oro por vía húmeda, lo que genera efluentes líquidos con gran contenido de iones metálicos de cobre, plata, aluminio, sodio, zinc y níquel. Debido a que este proceso se lleva a cabo de forma artesanal, no se realiza ningún tratamiento previo a los residuos líquidos generados antes de ser vertidos a la red de alcantarillado, ocasionando problemas de contaminación ambiental. Según estudios, la caracterización fisicoquímica de los efluentes reportan valores de concentración de los iones metálicos citados anteriormente y de pH que sobrepasan la normatividad ambiental (Mindiola, Pedraza, & Escalante, 2008).

A su vez, una parte del plomo empleado para la copelación reacciona con el oxígeno presente en la atmósfera dando lugar a la formación de óxido de plomo (PbO) que es liberado al entorno, y el restante se almacena en las copelas como residuo sólido. En ambas formas se perjudica directamente la salud de los trabajadores, debido a que el plomo y sus derivados pueden afectar los ojos, la sangre y los sistemas nervioso y digestivo. Además, a bajos niveles de exposición, los compuestos de plomo originan problemas de anemia y deterioro de los riñones (Monar & Carlos, 2004).

El problema de la disposición final de residuos sólidos peligrosos contaminados con PbO es alarmante, Brasil reportó en el año 2016 la eliminación de cerca de 135 toneladas de desechos anuales resultantes de las actividades de copelación (Cerceanu et al., 2016). Sin ningún tratamiento de eliminación de plomo dichos residuos pueden causar daños considerables a los ecosistemas y a la salud, debido a que las copelas expuestas a las condiciones de los botaderos de residuos sólidos

urbanos pueden lixiviar el PbO contenido al suelo, originando que éste producto tóxico llegue a las plantas y a los cuerpos de agua, lo que causa no solamente la contaminación de los mismos sino también el deterioro en la salud de los animales y seres humanos a los que llegue el plomo bioacumulado a través de las cadenas tróficas.

4.2.4 Análisis del ciclo de vida – SIMAPRO. Esta metodología se ha implementado a nivel mundial como un sistema de evaluación, con el fin de determinar los impactos ambientales ocasionados por los diferentes procesos productivos y se encuentra estandarizada mediante las guías de la serie ISO 14000 (Sanes Orrego, 2012).

El análisis de ciclo de vida (ACV) es un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados que han sido generados a lo largo del ciclo de vida. Esta metodología recopila y analiza las entradas y salidas del sistema para finalmente mostrar como resultado los impactos ambientales potenciales, con el objetivo de determinar estrategias para reducir sus efectos.

Los parámetros ambientales que se consideran en el ACV son principalmente, el agotamiento de recursos (agua, energía, materiales pétreos); la salud humana (impactos sobre la salud durante la manufactura); contaminación global y regional (calentamiento global, destrucción de la capa de ozono); impacto sobre animales y vegetación (diversidad biológica) (Sanes Orrego, 2012).

El ACV se caracteriza por tener un enfoque holístico, que se fundamenta en que no puede interpretarse de manera individual todas las partes que componen un sistema, sino que se deben integrar todos los aspectos que participan. Los elementos más relevantes de este análisis son los siguientes:

- Entradas: Se componen de los recursos, materias primas, partes y productos, transporte, fuentes de energía, entre otros elementos que ingresan al proceso.
- Salidas: Emisiones al agua, aire y/o suelo, residuos y subproductos que surgen del proceso en cada etapa.

Las categorías de impacto ambiental que se desarrollan principalmente en el análisis de ciclo de vida para tocar los aspectos fundamentales de sostenibilidad, son los mostrados en la tabla 1 (Niembro, J., ; González, & M., 2008).

Tabla 1. *Categorías de impacto ambiental*

Categoría del impacto ambiental		Unidad de referencia	Factor de caracterización
Calentamiento Global	Fenómeno observado en las medidas de la temperatura en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera y de los océanos en las últimas décadas	Kg – Eq CO ₂	Potencial de Calentamiento Global (PCG)
Consumo de Recursos Energéticos	Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución uso y fin de vida del elemento analizado.	Mj	Cantidad consumida
Reducción de la Capa de Ozono	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica	Kg. Eq. CFC – 11	Potencial de agotamiento de la capa de ozono (PAO)
Eutrofización	Crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	Kg. Eq. de NO ₃	Potencial de Eutrofización (PE)

Adaptado de Niembro, J. ; González, & M. (2008). Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: Revisión y prospectiva. *Internacional Conference on Project Engineering*.

Con base a la normativa ISO 14040 (2007), los proyectos de ACV se dividen fundamentalmente en cuatro fases: objetivo y alcance del estudio, inventario, análisis del impacto e interpretación. (*Gestión ambiental. análisis de ciclo de vida. principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006)2006*)

- **Objetivo y alcance del estudio:** Aquí se define el tema de interés teniendo en cuenta los motivos que se tienen para realizarlo y se establece la unidad funcional del sistema en cuestión. En esta parte además, se debe limitar el sistema, incluyendo la aplicación que se proyecte del estudio, las hipótesis planteadas, los criterios de exclusión y los datos y limitaciones de tipo económico.
- **Unidad funcional:** Se manifiesta de forma clara la función o funciones del producto o proceso en estudio cuantificándolas. Por supuesto, la unidad funcional debe ser consecuente con el objetivo y alcance planteado. La principal función de esta unidad, es la posibilidad de disponer de una referencia para la normalización de los datos de entrada y salida.
- **Inventario:** Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar los efectos ambientales adversos que se encuentran asociados a la unidad funcional (carga ambiental).
- **Análisis del impacto:** El propósito de esta tercera fase es evaluar los resultados del análisis de inventario del ciclo de vida para comprender mejor su significado ambiental. El análisis modela las variables ambientales seleccionadas y utiliza los indicadores de cada categoría para condensar y explicar los resultados.
- **Interpretación:** En esta última fase, se combinan los resultados del análisis de impacto. En esta parte se manifiestan las conclusiones y recomendaciones que tengan lugar para la toma de decisiones de forma consistente y real de acuerdo al objetivo y alcance trazado para el estudio.

El ACV se lleva a cabo mediante herramientas informáticas como el programa SimaPro, uno de los más utilizados y el usado para el presente estudio. SimaPro, fue desarrollado por la empresa de origen holandés, PRé Consultants, mediante el uso de sus bases de datos para la identificación de la carga contaminante de diversos procesos. Este software facilita el cálculo, análisis y representación gráfica de cada proceso o actividad mediante un manejo sistemático (SimaPro:Herramienta de ACV.2015).

4.2.5 Caracterización química. La difracción de rayos X (DRX) es un método de alta confiabilidad, debido a que permite identificar diversos compuestos en cuanto a sus fases cristalinas. Esta técnica tiene la ventaja de ser no destructiva y altamente precisa.

4.2.5.1 Difracción de muestras policristalinas. Este método de análisis estructural permite determinar la composición de la muestra analizada con una buena aproximación del contenido de los elementos mayoritarios. En el fenómeno de difracción, las redes periódicas cristalinas están formadas por planos reticulares regularmente espaciados, a su vez, una red cristalina contiene planos reticulares en orientaciones diversas, que se denotan mediante tres enteros “*hkl*” llamados índices de Miller. El espaciado correspondiente a cada sucesión de planos paralelos *h,k,l* se indica mediante el símbolo d_{hkl} , el cual se determina por medio de la Ley de Bragg, para de este modo permitir la identificación correspondiente.

La Ley de Bragg establece que los rayos X se reflejan sobre los planos de los cristales según el ángulo (θ) que depende del espaciado d_{hkl} y se representa por la siguiente ecuación:

$$\lambda = 2d\text{Sen}\theta$$

Donde λ corresponde a la longitud de onda de los rayos X, generalmente radiación de cobre ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$).

Cada material está caracterizado por una serie de valores d_{hkl} , por tanto, una vez realizado el proceso de difracción y conocidos estos valores, son tabulados y comparados con la base de datos mediante la cual es posible identificar el material en estudio. En caso de que dos o más materiales posean casi los mismos parámetros de celda y por tanto sus espaciados d_{hkl} sean casi idénticos, se debe tener en cuenta otro resultado de difracción, la intensidad con la que cada plano reticular refleja los rayos X. Este último parámetro, depende de los átomos de la celda y de su distribución (Melgarejo, Proenza, Galí, & Llovet, 2010).

4.2.6 El óxido de plomo (PbO) y sus regulaciones. El óxido de plomo (PbO) es uno de los principales subproductos generados en el proceso de copelación del oro, este es usado actualmente en el campo de la cerámica, debido a que posee características propias de los materiales usados para este fin, como son: alta temperatura de fusión, baja densidad, dureza, resistencia estructural, resistencia a la corrosión y es buen aislante térmico y eléctrico.

Se resalta además, que el óxido de plomo (PbO) se volatiliza a temperaturas superiores a los 1200°C , por lo que a temperatura ambiente presenta estabilidad térmica.

Sin embargo, dicho derivado del plomo tiene desventajas por su toxicidad, por lo que diferentes organismos recomiendan tomar medidas esenciales de protección durante su manipulación directa para evitar problemas de salud en los trabajadores (González Clvet, Torres Pardo, & García González, 2009).

En los últimos años, se ha resaltado la importancia de reducir la utilización de pigmentos de plomo en la elaboración de pinturas debido a los impactos negativos que se pueden generar sobre la salud si se exceden las concentraciones permisibles. Debido a esto, países como Estados Unidos han desarrollado regulaciones relacionadas con esta utilización de compuestos de plomo en pinturas (LBP). Mediante estas normativas, se prohibió el uso residencial de pinturas que contengan más del 0,06% de plomo. En 2001 la Agencia de Protección Ambiental (EPA) anunció este límite como el máximo aceptable para los niveles de plomo en el polvo de pisos, ventanas y áreas de juego (Wadanambi, Dubey, & Townsend, 2008).

Por otra parte, los residuos sólidos que contienen plomo, actualmente deberían estar sujetos a regulación mediante la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) de los Estados Unidos que ha sido aceptada por diversos países incluido Colombia, en la que se expone que la cantidad de plomo que se lixivia de un desecho usando el proceso de lixiviación característico de toxicidad (TCLP) como control, no puede exceder el límite de 5 mg/L, de lo contrario el desecho sólido debe manejarse como peligroso a menos que se excluya de otra manera. A pesar de que la gestión de residuos sólidos peligrosos acarree más costos económicos teniendo en cuenta los pretratamientos que se requieran antes de su disposición final, se está en la obligación de realizarla, ya que se debe minimizar el costo ambiental (Wadanambi et al., 2008).

4.2.7 Utilización de residuos peligrosos en elaboración de materiales. Los residuos son catalogados como peligrosos si cumplen con alguna de las siguientes características: toxicidad, reactividad, inflamabilidad y corrosividad. El manejo de éstos se ha convertido en un problema global ya que son generadas por diversas fuentes, desde grandes industrias hasta pequeñas empresas, hospitales, fincas y hogares. El tratamiento inadecuado de estos residuos causa daños sustanciales al medio ambiente, a la salud humana y a la seguridad. Actualmente, esta problemática es un punto crítico para todos los países en especial para los desarrollados, ya que se enfatiza la relación costo-eficiencia y la seguridad que existe en la gestión de estos residuos peligrosos (Rabbani, Heidari, Farrokhi-Asl, & Rahimi, 2018).

A pesar de que la eliminación de residuos peligrosos se ha convertido en un problema ambiental grave que va en crecimiento, el reciclaje es un punto clave para minimizar los problemas de contaminación y los costos de tratamiento. Es decir, utilizar los desechos catalogados como peligrosos en la fabricación de otros materiales, promueve la economía circular disminuyendo el consumo de energía primaria y recursos naturales además de reducir el calentamiento global (Rabbani et al., 2018).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el hecho de reciclar este tipo de desechos posee varias limitaciones, en primer lugar, los residuos peligrosos tienen características que restringen su compatibilidad con ciertos tipos de procesos; en segundo lugar, se deben tener en cuenta los factores de riesgo para los seres humanos y el medio ambiente que se puedan generar con el proceso de aprovechamiento seleccionado; y tercero, incluso cuando los desechos peligrosos se procesan correctamente pueden surgir productos secundarios también nocivos que requieren algún tratamiento (Yilmaz, Kara, & Yetis, 2017).

En los últimos años, se ha estudiado el uso de residuos peligrosos en la elaboración de materiales, por ejemplo, en Turquía se diseñó un sistema que enlista, selecciona y cuantifica las cantidades de estos desechos que cumplan con las características para ser empleados en las industrias de fabricación de productos plásticos (Öncel et al., 2017). Otra industria interesada en la incorporación de residuos en sus productos es la cementera, la cual en los últimos años ha buscado el empleo de diferentes residuos y subproductos industriales como materiales alternativos en la fabricación de cemento, sustitución parcial de combustibles convencionales y en la incorporación de adiciones activas al cemento y/o clínker, esto debido al interés de cumplir con el Protocolo de Kioto y su concepto de sostenibilidad (Puertas et al., 2006).

Las investigaciones de este tipo de aprovechamiento van en crecimiento, ya que la necesidad de mejorar y preservar el entorno salvaguardando los recursos naturales es cada vez mayor, lo que ha llevado al cambio de mentalidad de las industrias priorizando el reciclaje y la recuperación de materiales frente a la tendencia tradicional de extraer materias primas de la fuente y utilizar procesos constructivos y energéticos basados en productos y energías no renovables.

4.2.8 Sellos verdes y obras civiles. La construcción sostenible es un concepto que no solamente abarca los edificios propiamente dichos, sino que también tiene en cuenta el entorno y la forma como se agrupan todos los elementos en el espacio para formar las ciudades. El urbanismo sostenible tiene dentro de sus objetivos crear lugares que no atenten contra el medio ambiente y que a la vez proporcionen eficiencia energética, agua, funcionalidad y calidad de vida.

Teniendo en cuenta que el sector de la construcción civil es uno de los principales consumidores de recursos naturales y que representa gran generación de impactos negativos al medio ambiente, actualmente han surgido iniciativas para desarrollar proyectos sustentables (De

Castro Brasil, Bittencourt Lomardo, Pilares Vera, & Marx de Andrade, 2011). En Colombia particularmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el marco del Plan Estratégico de Mercados Verdes que busca consolidar la producción de bienes y servicios sostenibles y ecológicamente amigables en los diferentes mercados, creó el Sello Ambiental Colombiano (SAC), reglamentando su uso por medio de la Resolución 1555 de 2005.

El SAC, es una etiqueta ecológica representada por el logo que se presenta en la figura 6, que se obtiene de forma voluntaria y es otorgada por una institución independiente, conocida como “organismo de certificación” que está debidamente reconocida por el Organismo Nacional de Acreditación (ONAC) y legalizado por la Autoridad de Licencias Ambientales (ANLA). Este sello puede ser obtenido por cualquier bien o servicio siempre y cuando cumpla con los requisitos expuestos en la Resolución anteriormente mencionada, lo que significa que aplican criterios ambientales y sociales a lo largo de su ciclo de vida (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).



Figura 6. Logo del Sello Ambiental Colombiano

Fuente: “Tomado de Resolución 1555 de octubre de 2005”, por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (República de Colombia, 2005).

Contar con el Sello Ambiental Colombiano, es considerado no solamente como una práctica de desarrollo sustentable, sino también como una estrategia comercial y una ventaja competitiva por parte del sector productivo y por parte de los consumidores puede ser visto como el ofrecimiento de bienes y servicios con valor agregado frente a otras que no cuentan con este instrumento de diferenciación ambiental.

Potencialmente, los bienes y servicios que han adquirido el SAC pueden tener beneficios como por ejemplo: mejorar su competitividad; orientar su estrategia comercial hacia nichos de mercado especializados y de alto crecimiento; lograr procesos más eficientes con menor uso de materiales, energía y reducción de residuos; superar las expectativas del cliente mejorando su fidelidad; atraer inversionistas y fuentes de financiamiento; mejorar la motivación de los empleados; aumentar el reconocimiento de su producto o servicio; reducir la responsabilidad teniendo en cuenta la disminución de los impactos ambientales generados; mejorar las relaciones con los entes reguladores; facilitar la identificación y gestión de los requisitos legales; entre otros (Turismo Sostenible, 2009).

Involucrando las investigaciones que se encargan del estudio de la economía circular de los residuos sólidos con la implementación del Sello Ambiental, se puede considerar que el uso seguro de materiales de desecho en la construcción podría dar lugar a una iniciativa de gran relevancia en cuanto a la diferenciación ambiental. El Consejo Nacional de Política Económica y Social de la República Colombia (Conpes), en el año 2014 expidió el documento 3819 el cual se encuentra dentro de las guías tenidas en cuenta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para la formulación e implementación del SAC, ya que considera en el ítem 11 del plan de acción la formulación de proyectos de residuos sólidos para el sistema de ciudades que incluyan acciones en temas de aprovechamiento, tratamiento y valorización de los residuos acorde a los

planes de gestión de residuos sólidos y en el ítem 27 la creación de una estrategia orientada al incremento de la productividad, teniendo en cuenta planes que involucren el aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos y biosólidos, incentivos a la ciencia, tecnología e innovación, oportunidades comerciales, formación para el trabajo y desempeño ambiental (Conpes, 2014).

5. Metodología

5.1 Caracterización del oro por el método de copelación

El proceso de copelación del oro se llevó a cabo de acuerdo a la metodología planteada en la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5051-2002, DETERMINACIÓN DE ORO EN LAS ALEACIONES DE JOYERÍA DE ORO. MÉTODO DE COPELACIÓN (ENSAYO AL FUEGO) (Icontec Internacional, 2002) y en el documento guía para Hidrometalurgia aplicada en la línea de metales preciosos de la Universidad Nacional de Colombia (Gaviria et al., 2007). Los materiales y reactivos del proceso de caracterización fueron suministrados por un joyero artesanal de la ciudad de Bucaramanga.

Como primera actividad se sometió la copela (material donde se realiza el análisis) a un proceso de calentamiento a $\pm 750^{\circ}\text{C}$ durante 20 minutos. Posteriormente, se pesaron 433,7 mg (2,2019 mmol) de la muestra de oro (Au) a purificar y 1516 mg (14,0542 mmol) de plata pura (Ag), estas dos muestras se envolvieron en una lámina de plomo (Pb) de 10,5961 g (0,0511 mol) y se colocaron en el interior de la copela. La muestra se llevó a la mufla precalentada a 920°C ,

donde se realizó la reacción en un tiempo estimado de 30 minutos. En la Figura 7 se muestra el ingreso de las muestras a la mufla precalentada.



Figura 7. Ingreso de materias primas del proceso de copelación a la mufla precalentada

Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se verificó que la muestra en estudio (doré) hubiese tomado un color opaco y se retiró la copela de la mufla hasta alcanzar la temperatura ambiente (Figura 8). El botón resultante compuesto por oro y plata fue limpiado con agua y posteriormente laminado.



Figura 8. Botón oro-plata (Doré) antes y después del enfriamiento

La lámina obtenida, se introdujo en un vaso de precipitados y se adicionó ácido nítrico (HNO_3) diluido 1:7 hasta cubrirla completamente, se calentó hasta 250°C durante 20 minutos.

Terminado este proceso, se decantó y agregó HNO_3 en relación 1:1 hasta cubrirla y nuevamente se calentó a 250°C durante 20 minutos. Se vaciaron los licores y se hicieron cuatro lavados con agua caliente. El producto obtenido se colocó en un crisol y se calentó, al observarse la superficie sin manchas se dio por terminada la fase de ataques con ácido.

La muestra se mantuvo en el crisol y se calcinó con una llama a aproximadamente 700°C durante dos minutos (Figura 9), con lo que se obtuvo oro del color amarillo característico. Finalmente, se dejó enfriar la lámina a temperatura ambiente para ser pesada.



Figura 9. Muestra final de oro puro

5.2 Identificación y cuantificación de fases cristalinas de las copelas antes y después del proceso por medio de Difracción de rayos X de muestras policristalinas (DRX)

Los especímenes seleccionados de las copelas sin usar y obtenidas al final del proceso, mostradas en la Figura 10, se molturaron y se homogenizaron en un mortero de ágata para ser llevados a un tamaño de partícula menor a $38\ \mu\text{m}$ (400 mesh). Posteriormente, las muestras preparadas fueron montadas en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.



Figura 10. Copelas inicial y final del proceso de caracterización del oro

La toma de datos se realizó en un difractómetro de polvo de marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci (figura 11), bajo las siguientes condiciones: Voltaje 40 (kV) Corriente 40 (mA), Rendija de Divergencia 0,6 mm, Rendijas Soller Primario y Secundario $2,5^\circ$ Muestreo $0,02035^\circ$ 2Theta Rango de Medición $3,5^\circ$ - $70,0^\circ$ 2Theta Radiación $\text{CuK}\alpha 1$ Filtro Níquel Uso de Anti-dispersor de Aire Si Detector Lineal LynxEye Tipo de barrido a pasos Tiempo de muestreo 1,2 segundos.

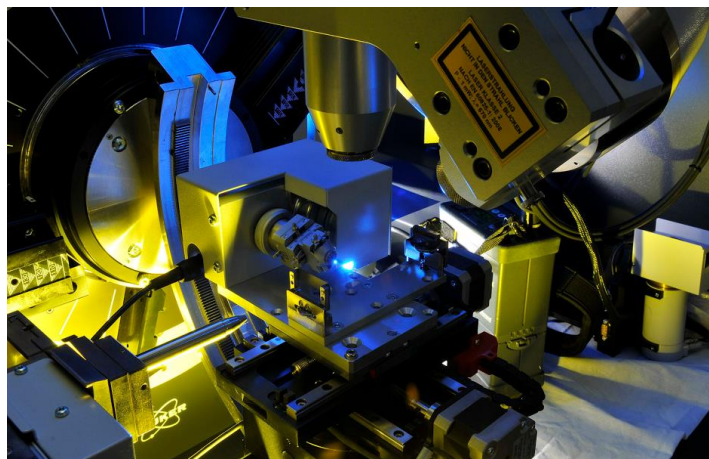


Figura 11. Difractómetro de polvo

La identificación de las fases cristalinas se llevó a cabo mediante el programa especializado Crystallographica Search Match (CSM), por medio de la comparación de los patrones de

difracción obtenidos con la base de datos PDF-2 de patrones de polvo. Los análisis cuantitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento por el Método de Rietveld entre los perfiles observados y los perfiles de difracción reportados en la base de datos, empleando el programa RIQAS.

5.3 Análisis del ciclo de vida (ACV) del proceso de copelación

El análisis de ciclo de vida ACV se realizó una vez ejecutada la metodología estándar del proceso de copelación realizada por los talleres de joyería convencionales, teniendo en cuenta el uso de los mismos insumos y materias primas.

5.3.1 Definición del objetivo del ACV. Se obtuvo el perfil de impactos ambientales del proceso de copelación, identificando las etapas donde se generaron las emisiones contaminantes más notables.

5.3.2 Definición del alcance.

5.3.2.1 Sistema bajo estudio. Se limitó como sistema bajo estudio el proceso de caracterización del oro (copelación). La metodología general se subdividió en las etapas que se indican a continuación: La primera, consistió de la eliminación de humedad de la copela inicial y la reacción de purificación del oro al interior de la mufla; la segunda, fue el ataque con ácido nítrico (HNO_3) realizada al doré y la etapa final fue la calcinación haciendo uso de un mechero a gas de la muestra final de oro purificado. Las etapas fueron definidas de acuerdo a las emisiones generadas al término de cada una.

5.3.2.2 Unidad funcional. Se seleccionó como unidad funcional 1 (una) copela.

5.3.2.3 Límites del sistema.

5.3.2.3.1 Límites del proceso. Se incluyeron las etapas de copelación mencionadas en el numeral del presente documento y la disposición final de las copelas utilizadas en el proceso.

5.3.2.3.2 Límites geográficos. El análisis se limitó a la ciudad de Bucaramanga, Santander, teniendo en cuenta que el departamento cuenta con varias reservas auríferas y un número considerable de talleres de joyería cuyas actividades impactan ambientalmente a toda la región.

5.3.2.3.3 Límites temporales. Se tomó como horizonte temporal los datos del proceso de copelación tomados directamente de un taller de joyería durante el año 2017.

5.3.2.3.4 Etapas excluidas del análisis. Para el presente estudio, las cargas ambientales generadas en las operaciones de extracción y transporte del oro y demás materias primas no fueron tomadas en cuenta.

5.3.3 Tipos de impacto y metodología de evaluación. Se escogió como método de análisis y valoración de los impactos ambientales durante todo el ciclo de vida del proceso de copelación la metodología ECOPOINTS 97, desarrollada por el Ministerio Suizo del medio ambiente que se basa en la evaluación de impactos relacionados con los metales pesados, dentro de los que se incluye el plomo (Pb), elemento de mayor relevancia en el presente estudio.

Fueron estimadas como las categorías de impacto más representativas de la copelación los contaminantes atmosféricos principales como NO_x, SO_x y CO₂, metales pesados en el aire (Pb) y metales pesados en el agua (Pb). Debido a los límites establecidos para el ACV, no se tuvieron en cuenta los impactos ambientales y energéticos de la extracción del oro (Au), la plata (Ag), el plomo (Pb), ni el gasto energético de la pulverización del hueso utilizado en la fabricación de la copela.

5.3.4 Inventario del ciclo de vida (ICV). Se cuantificaron los flujos de materia asociados a cada una de las etapas de la copelación llevadas a cabo en el taller de joyería. Para ello se recopilaron datos y cálculos de las entradas y salidas del proceso de acuerdo a la unidad funcional. Fueron definidas como entradas las materias primas y energía y como salidas, las emisiones al aire, agua y suelo.

Adicionalmente, fueron ingresados como datos del inventario las fases cristalinas de los materiales de las copelas tanto iniciales como finales identificadas mediante Difracción de Rayos-X. En etapas intermedias se realizaron hipótesis metodológicas para completar la lista de materiales de ICV.

5.4 Estudio de aprovechamiento de residuos sólidos

5.4.1 Elaboración de concreto. La fabricación de este material se realizó con base a la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 550-2000, CONCRETOS. ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO EN OBRA, la cual establece los parámetros de manufactura de cilindros y prismáticos tomados como muestras representativas de concreto fresco para construcción (Icontec Internacional, 2000).

Se tomó para ello como materia prima cemento, arena y grava para ser mezclados en proporciones de 1:2:3 respectivamente (Figura 12).

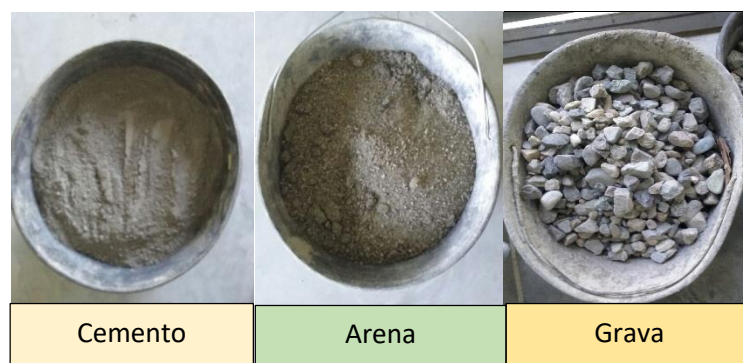


Figura 12. Materias primas para la elaboración de concreto.

La medida de volumen empleada fue un balde de concreto estándar de capacidad estimada de 12 litros. Inicialmente se adicionaron a una batidora de eje inclinado los tres volúmenes de grava y se humedecieron con agua, posteriormente se agregó el volumen de cemento y los dos de arena al tiempo que se incorporó agua, aproximadamente 4 litros. El mezclado se realizó durante 1,5 minutos hasta que se observó la textura deseada, evidenciada mostrada en la Figura 13.



Figura 13. Mezcla para concreto.

Una vez se obtuvo la mezcla, se tomaron cilindros de acero de 15 cm de diámetro por 30 de largo y se engrasaron con aceite mineral. El llenado se realizó en tres capas iguales cada una con profundidad de aproximadamente 10 cm. Cada capa fue apisonada con el extremo redondo de una varilla compactadora, se dieron 25 golpes por capa distribuyendo uniformemente la mezcla de concreto sobre toda la sección transversal del cilindro. Luego del apisonamiento se golpearon los bordes exteriores del molde suavemente con un martillo de caucho 15 veces con el fin sacar las burbujas de aire atrapadas.

Cuando se agregaron las capas finales se adicionó la cantidad de concreto necesaria para llenar el molde consolidándolo por los lados y bordes del molde con ayuda de un palustre. Se enrasó la superficie quitando el exceso de concreto, quedando una superficie homogénea y lisa. Se evitaron depresiones superiores a 3 mm. Se rotularon los cilindros y se reservaron protegiéndolos del sol, viento o cualquier fuente de rápida evaporación. En la Figura 14 se aprecian los moldes con el concreto preparado.



Figura 14. Muestras de cilindros de concreto

Pasadas 24 horas se desmoldaron los cilindros (Figura 15) e inmediatamente fueron sumergidos en un tanque de curado con agua libre a temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Icontec Internacional, 2000).



Figura 15. Curado de especímenes de concreto

5.4.1.1 Incorporación de residuos de copelación al concreto. Las NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS NTC 5828-2010, PINTURAS AL AGUA TIPO EMULSIÓN PARA USO EXTERIOR DE ALTA RESISTENCIA (Icontec Internacional, 2010b) y NTC 1335-2015, PINTURAS AL AGUA TIPO EMULSIÓN (Icontec Internacional, 2015), contemplan la presencia de metales como el plomo (Pb) en este tipo de materiales, limitando su contenido a máximo 100 partes por millón, de manera que no resulte nocivo para la salud.

De acuerdo a estos lineamientos y tomando como base la densidad aparente promedio medida en los cilindros previamente elaborados ($2432,36 \text{ kg/m}^3$), se calculó la cantidad de residuos sólidos de copela a usar para obtener un producto final que no sobrepase los límites permisibles de plomo (Pb) (26 g de muestra por probeta), esto contando con la cuantificación de las diferentes fases de cristalinidad del óxido de plomo (PbO) previamente realizada a las copelas de desecho.

Se trituraron las copelas usadas hasta obtener un polvo con las características mostradas en la Figura 16, el cual fue incorporado al proceso de elaboración de concreto en la etapa de mezclado junto con el cemento, la arena y la grava. Se continuó con el mezclado, fundición y curado sin ninguna variación a la metodología anteriormente descrita contemplada en la NTC-550.



Figura 16. Copela final triturada

5.4.2 Prueba de resistencia a la compresión. Se realizó la rotura de los cilindros de acuerdo a lo estipulado por la NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 673, CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO (Icontec Internacional, 2010a), a edades específicas de 7 y 14 días tanto para concreto sin adición copelas usadas con contenido de óxido de plomo (PbO) como para los especímenes que si lo contenían.

Completado el tiempo de curación estipulado para cada cilindro, éstos fueron medidos y llevados aún húmedos a una prensa calibrada, donde se realizó la medición de resistencia a la compresión, aplicando una velocidad de carga de 0,25 MPa/s sobre la superficie superior del cilindro. Una vez ocurrió la falla se detuvo la máquina (Figura 17). El esfuerzo de rotura del concreto se calculó dividiendo el valor de la carga aplicada a la que falló la probeta por el área transversal del cilindro.



Figura 17. Prueba de resistencia a la compresión del concreto

5.4.3 Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad “Toxicity Characteristic Leaching Procedure” (TCLP).

5.4.3.1 Extracción. Se determinó la movilidad de especies tóxicas (Pb) presentes en las copelas de desecho y en las muestras de concreto (con y sin adición de copelas usadas con contenido de PbO), de acuerdo a la metodología indicada en el Decreto Supremo N° 148 “Reglamento Sanitario sobre manejo de Residuos Peligrosos” del Ministerio de Salud de Chile, que se basa en el método 1311 descrito por la EPA, aceptado en diversos países incluido Colombia, aplicable a muestras de residuos tales como residuos industriales, lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua servida, suelos contaminados, entre otros que requieren ser evaluados para determinar el grado de peligro que representan considerando elementos de origen inorgánico (Ministerio de Salud, 2004).

Se trituraron muestras de copelas usadas y de concreto con y sin adición de copelas usadas con contenido de PbO hasta que se obtuvo un tamaño granulométrico menor a 45 μ m. Se transfirieron 10 g de cada muestra a botellas PET donde fueron tratadas con 200 mL de solución extractora. Esta última fue previamente preparada mezclando 5,7 mL de ácido acético glacial (CH₃COOH); 64,3 mL de hidróxido de sodio (NaOH) 1M y aforando a 1 L con agua ultrapura. Las botellas fueron cerradas y agitadas durante 18 horas usando el montaje mostrado en la Figura 18 a temperatura ambiente con una velocidad de rotación de 30 rpm (Agencia de Protección Ambiental, EPA, 1989).



Figura 18. Montaje para agitación rotatoria, TCLP

Terminado el tiempo de agitación, se filtraron las muestras usando papel filtro de grado analítico. Las extracciones se llevaron a cabo por duplicado y los extractos se sometieron a análisis químico por espectroscopía de absorción atómica (EAA).

5.4.3.2 Espectroscopía de absorción atómica (EAA). Se preparó la curva de calibración para plomo (Pb) tomando 10 mL de una solución patrón de 1000 mg/L de Pb y aforando a 100 mL con una solución de ácido nítrico (HNO₃) al 5 % p/v. Se obtuvo de esta manera, la solución intermedia de trabajo 100 mg/L (Agencia de Protección Ambiental, EPA, 1989). Se tomaron los volúmenes de la solución intermedia y se aforaron según se indica en la tabla 2.

Tabla 2. *Curva de calibración del plomo (Pb).*

Número de matraz	Volumen de alícuota estándar intermedio [mL]	Volumen final de la solución [mL]	Concentración para la curva de calibración [mg/L]
1	0	25	Blanco
2	0,125	25	0,5
3	0,25	25	1
4	0,5	25	2
5	0,75	25	3
6	1	25	4
7	1,25	25	5
8	1,5	25	6
9	1,75	25	7
10	2	25	8

Adaptado de “Caracterización de residuos peligrosos método TCLP inorgánico” (Agencia de Protección Ambiental, EPA, 1989).

Se analizó el metal en consideración (Pb) para la curva y soluciones extraídas de las muestras de copelas de desecho y concreto previamente filtradas. Para este procedimiento se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica marca Thermo Solar Ice 3000 acoplado al equipo Vapor kit modelo VP 100 mostrado en la Figura 19. El equipo fue calibrado de acuerdo al programa SOOLAR (manual operativo) donde se indicada concentración de chequeo con la respectiva absorbancia para cada metal, en el caso del plomo (Pb) se indicó una concentración de 7 mg/L para una absorbancia esperada de 0,4.

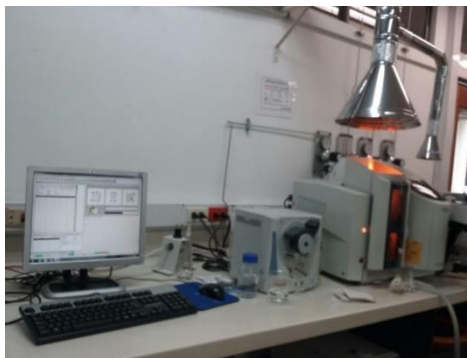


Figura 19. Espectrofotómetro de absorción atómica de llama

La lectura de las muestras se llevó a cabo a longitud de onda $\lambda=217$ nm, corriente de lámpara de 75%, mediante el uso de gases Aire- acetileno y tipo de señal continuo.

Las soluciones extraídas fueron analizadas sin ningún tratamiento posterior, a excepción de la solución obtenida a partir de la copela usada, la cual fue diluida con un factor de 100 debido a la alta concentración de Pb presente. Los datos de absorbancia fueron utilizados para la elaboración de la curva y obtención de la ecuación de recta correspondiente, empleada para la posterior lectura de las concentraciones de plomo presentes en cada una de las muestras estudiadas.

6. Resultados

6.1 Caracterización de muestras de oro mina por medio de la metodología de copelación

Según la primera actividad planteada en la metodología, se realizó el proceso de copelación a escala real en un taller de joyería de la ciudad de Bucaramanga. El análisis se llevó a cabo por duplicado

Con el fin de recopilar las muestras y datos para las siguientes partes de la metodología, se efectuó la copelación sobre cada muestra de oro mina de igual procedencia, en un mismo laboratorio, y con condiciones operativas iguales.

A continuación en la tabla 3 se presenta la descripción y las evidencias fotográficas obtenidas del procedimiento realizado en la visita de campo.

Tabla 3. Descripción del proceso de copelación

DESCRIPCIÓN	REGISTRO FOTOGRÁFICO
<p><i>Pesado y selección de muestras</i></p> <p>Se pesaron las muestras iniciales de Pb, Au y Ag proporcionales a la cantidad de oro mina, según las cantidades especificadas en la metodología utilizando balanza con incertidumbre ± 0.00001</p>	
<p>Se envolvieron en la lámina de Pb las cantidades de Ag y Au mina pesadas, con el fin de facilitar el ingreso a la mufla y garantizar la efectividad de la absorción de impurezas.</p>	
<p>Se secaron las copelas necesarias a 750°C para los ensayos, con el fin de eliminar la humedad, lo que amplió la porosidad del material.</p>	

Tabla 3. (Continuación)







<p>Se realizó la fusión de materiales durante 30 min a 920°C con el fin de que el Pb funcionara como colector de impurezas de los metales preciosos.</p> <p>Aproximadamente el 90% de Pb quedó atrapado en las copelas y el 10% se eliminó en subproductos gaseosos.</p>	 Una fotografía que muestra el interior de un horno industrial durante un proceso de fusión. El ambiente está iluminado por una intensa luz naranja-rojo, proveniente de las paredes y los elementos calefactores del horno. En primer plano, se ven varias copelas (recipientes de cerámica) que contienen material fundido. Hay cables y tuberías visibles a lo largo de las paredes del horno.
<p>Completada la reacción se obtuvo el doré, aleación de oro y plata.</p> <p>El objetivo de la etapa anterior es la obtención de botón, donde se encuentran únicamente estos dos metales preciosos libres de impurezas.</p>	 Una fotografía que muestra seis copelas de cerámica dispuestas en una fila de dos sobre una superficie blanca. Cada copela contiene un pequeño botón de metal brillante, que es el doré obtenido. Las copelas tienen un aspecto ligeramente usado y algunas muestran grietas.
<p>Se laminó el doré (oro-plata), cuidando no fracturar la muestra.</p>	 Una fotografía que muestra un proceso de laminación. Una mano está presionando un botón de metal brillante sobre una superficie que parece ser un rodillo o una prensa. El metal está siendo aplastado y se están formando fragmentos pequeños. El proceso se realiza sobre un fondo de periódicos para evitar daños o contaminación.

Tabla 3. (Continuación)

<p><i>Tratamiento con ácidos</i></p> <p>En crisoles de porcelana sobre una plancha de calentamiento a 120°C, se adicionó ácido nítrico en concentraciones de 1:5, luego 1:3 y finalmente 1:1 para disolver toda la Ag, obteniendo una solución de nitrato de plata (AgNO_3) y Au sólido.</p>	
<p><i>Lavado</i></p> <p>Se realizaron 3 lavados principales con agua destilada (1 por cada concentración de HNO_3), con el fin de obtener el Au libre, eliminando completamente el AgNO_3. Adicionalmente se realizaron 10 lavados finales para garantizar que no quedaran residuos el botón de oro.</p>	
<p><i>Calcinación final</i></p> <p>Posterior al tratamiento con ácidos se calcinó la muestra purificada para darle el color característico del oro. Para esto se introdujo la muestra en un crisol de porcelana y se sometió a calor por medio de una mechera a gas a 700°C durante 1min. Finalmente, cuando la muestra de Au alcanzó la temperatura ambiente se pesó.</p>	

Al final del proceso guía se pesaron 0,26016 g de oro puro (Au), para un ensayo y el duplicado, un peso de 0,26117 g, lo que representó una pérdida aproximada del 40% en este tipo

de oro mina. Según la literatura, se estima que las pérdidas corresponden a un desecho (escoria) compuesto por materiales como SiO_2 , Na_2O y trazas de Zn, As, Fe.

Los anteriores resultados se promediaron y a partir de ellos se determinó la ley del oro y su equivalencia en Quilates mediante las ecuaciones mostradas a continuación. Estos cálculos son el fin último de la caracterización. Para el uso de la ecuación 2, se emplea el valor de la fracción de la Ley.

$$\text{Ley del oro} = \frac{\text{Peso oro puro}}{\text{Peso total muestra}} \times 1000 \quad \text{Ecuación 1. Cálculo de la ley del oro}$$

$$\text{Equivalencia en quilates} = 14 \times \text{fracción Ley del oro} \quad \text{Ecuación 2. Cálculo de la equivalencia en quilates}$$

La ecuación 2 se basa en el factor de 24 quilates para las muestras de oro puro.

De acuerdo al peso promedio de las muestras caracterizadas y aplicando las ecuaciones, se encontró una Ley promedio de 599,8504 con desviación estándar 0,01584 y una equivalencia en quilates de 14,4, lo que significa que el oro mina caracterizado se clasifica como de segunda ley.

6.2 Identificación y cuantificación de fases cristalinas de las copelas antes y después del proceso

Las copelas recolectadas antes y después de someterse al proceso de caracterización, fueron pulverizadas, molturadas y analizadas por medio de difracción de rayos-X de muestras policristalinas (DRXP). Las fases cristalinas fueron identificadas con la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) y la cuantificación con el Software RIQAS, empleando el método de Rietveld. Los resultados obtenidos se resumen en las tablas 4 y 5 presentadas a continuación.

Tabla 4. *Fases cristalinas copelas antes del proceso.*

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalina	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	Hidroxiapatita	37,0%
	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Calcita	31,6%
	SiO_2	Cuarzo	2,3%
	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Aragonita	11,5%
	$\text{Ca}_2(\text{FeAl}_{0.95}\text{Mg}_{0.05})\text{O}_5$	Brownmillerita	4,4%
	$\text{Ca}_{18}\text{Mg}_2\text{H}_2(\text{PO}_4)_{14}$	Whitlockita	1,8%
	Ca_3SiO_5	Hatrurita	6,8%
	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	Yeso	0,8%
	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Vaterita	2,1%
	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0.5}$	Bassanita	1,6%
	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Calcita alta	N.C
	SiO_2	Tridimita	N.C

Nota: * N.C = No Cuantificable (Las fases son identificadas, pero debido a su baja proporción no fue posible realizar su cuantificación). Elaborado por Laboratorio de Rayos-X, Universidad Industrial de Santander

Tabla 5. Fases cristalinas de copelas después del proceso.

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	Hidroxiapatita	36,6%
	PbO	Masicotita	4,4%
	PbO	Litargirio	0,5%
	$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$	α -Calcio olivino	29,7%
	Ca_2SiO_4	Larnita	18,3%
	$\text{Ca}_2(\text{FeAl}_{0.95}\text{Mg}_{0.05})\text{O}_5$	Brownmillerita	5,1%
	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Al}_{1.22}\text{Si}_{0.78}\text{O}_{6.78})(\text{OH})_{0.22}$	Gehlenita	1,6%
	SiO_2	Cuarzo	0,2%
	$(\text{CaO})_{12}(\text{Al}_2\text{O}_3)_7$	Mayenita	3,4%
	PbO	Litargirio alto	0,2%

Elaborado por Laboratorio de Rayos-X, Universidad Industrial de Santander

Los datos del análisis por difracción de rayos-X de las copelas antes y después del proceso muestran claramente que se incorporan cantidades considerables de óxido de plomo (PbO) en los residuos sólidos después de la copelación. Tomando las tres fases cristalinas de PbO identificadas y cuantificadas (Masicotita, Litargirio y Litargirio alto), se tiene un porcentaje de 5,2% (52000 mg/L) de este compuesto tóxico absorbido por la copela.

Se comprobó la existencia de óxido de plomo en las copelas usadas, lo que hace que sean considerados como residuos peligrosos. El acceso a la información de los niveles de riesgo de estos desechos es crucial para determinar y evaluar las estrategias de manejo de estos desechos contaminados. Los anteriores resultados justifican la preocupación sobre la eliminación de los desechos de copelas y resaltan la relevancia del desarrollo y aplicación de una medida de aprovechamiento que minimice la entrada de los mismos al botadero de residuos urbanos.

6.3 Análisis de ciclo de vida (ACV) mediante el programa SimaPro

6.3.1 Esquema general (Balance del proceso). El diagrama mostrado en la Figura 20 representa el flujo de materia estimado para el proceso de copelación realizado y limitado para el ACV. Una vez hechas las copelaciones se pudo estimar que cada muestra de oro mina a caracterizar pierde un porcentaje de masa de aproximadamente 40%, estas pérdidas son causadas por la eliminación de impurezas. Cabe resaltar que este porcentaje puede variar dependiendo de la ley del oro caracterizado.

La primera etapa crea la totalidad de residuos sólidos, ya que elimina del proceso la copela, en cuyo interior queda gran parte del plomo introducido como material colector y demás impurezas que ésta ha absorbido, con el fin de dar lugar a la formación del botón oro-plata (doré).

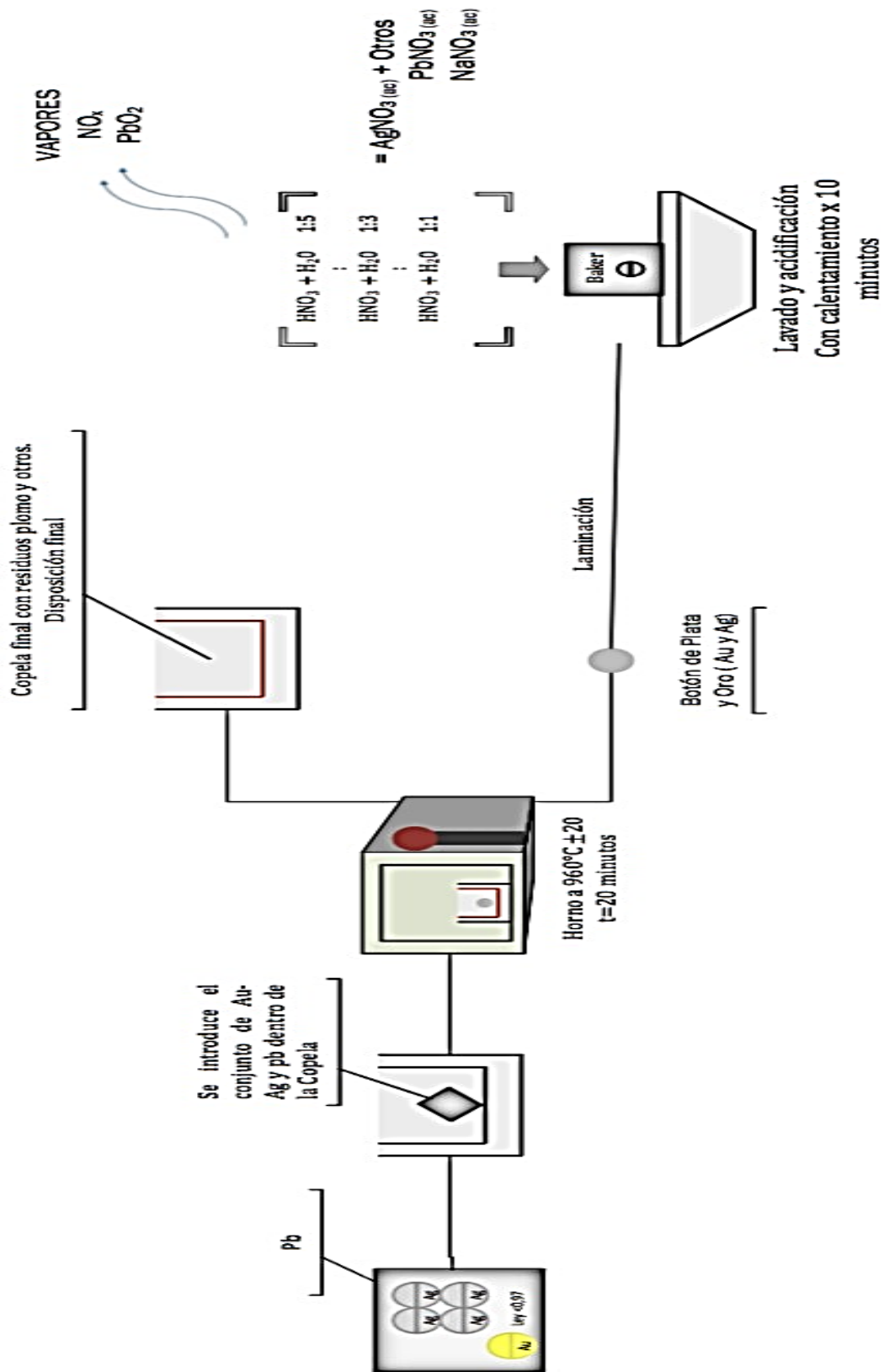


Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de copelación

6.3.2 Evaluación del impacto ambiental a partir del ACV del proceso. A partir de los valores medios registrados del proceso de copelación de las muestras de oro mina, y teniendo en cuenta la unidad funcional seleccionada para el estudio (1 copela) y las fases cristalinas cuantificadas mediante DRX, se formuló el inventario mostrado en las tabla 6 y 7 ingresándolos al programa SimaPro para la correspondiente evaluación.

Tabla 6. *Inventario de ciclo de vida (ICV). Entradas del proceso. Oro mina*

		ENTRADAS DEL PROCESO	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
Reacción en la mufla	Copela	Hidroxiapatita	37,0	%	Composición de la copela: <ul style="list-style-type: none"> • 12,4 g (31%) de hueso de res • 24,6 g (69%) de cemento.
		Calcita	31,6	%	
		Cuarzo	2,3	%	
		Aragonita	11,5	%	
		Brownmillerita	4,4	%	
		Whitlockita	1,8	%	
		Hatrurita	6,8	%	
		Yeso	0,8	%	
		Vaterita	2,1	%	
		Bassanita	1,6	%	
	Peso total	40	g		
		Plomo (Pb)	10	g	
		Muestra Oro (Au)	0,4337	g	
	Plata (Ag)	1,5169	g		
	Mufla	750	Wh	Consumo 1800 w por el tiempo empleado (2.5 horas) dividido en el número máximo de copelas que caben en la mufla (6 copelas)	
	Doré	1,9149	g	Resultado de la	

Tratamiento con ácido				fundición conjunta de Au, Pb y Ag.	
	HNO ₃	1:1	7,55	g	
		1:3	3,775	g	
		1:7	2,52	g	
	Placa de calentamiento		62,5	Wh	Consumo 500 w por el tiempo empleado en el proceso de copelación (15 minutos) dividido en el número máximo de crisoles que caben en la placa (2 crisoles)
Agua destilada		151	mL	Se determinó a partir de los siguientes datos: <ul style="list-style-type: none"> • 3 lavados principales de 10 ml • Agua utilizada en la preparación de soluciones HNO₃. 	
Calcinación final	Muestra de oro purificado		0,3582	g	Peso de la muestra luego del tratamiento con ácido.
	Mechera a gas		0,1064	L/min	Para cuantificar el flujo volumétrico se tomaron los siguientes datos: <ul style="list-style-type: none"> • Gasto de 1 pipeta de gas propano de 100

				libras al mes. <ul style="list-style-type: none"> La pipeta contiene 23 Galones (87,0645 L) Conversión de presión: 8,8 bar
--	--	--	--	--

Tabla 7. Inventario de ciclo de vida (ICV). Salidas del proceso. Oro mina.

		SALIDAS DEL PROCESO	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
Reacción en la mufla	Dore de oro		1,9149	g	Resultado de la fundición conjunta de Au, Pb y Ag.
	Copela con plomo	Hidroxiapatita	23,1	%	Datos del informe de resultados difracción de rayos-X
		Masicotita	14,1	%	
		Calcio olivino	19,8	%	
		Cuarzo	1,5	%	
		Litargirio	2,7	%	
		Brownmillerita	3,8	%	
		Larnita	21,3	%	
		Gehlenita	0,8	%	
		Mayenita	2,6	%	
		Indialita	1,2	%	
		Litargirio alto	2,4	%	
		Anortita	6,8	%	
		Peso total	46,402	g	
Tratamiento con ácido	Muestra tratada con ácidos		0,3582	g	Peso de la muestra luego del tratamiento con ácido nítrico
	Nitrato de Plata AgNO ₃		21,5	g	Para determinar la cantidad de AgNO ₃ se utilizó: <ul style="list-style-type: none"> Cantidad de HNO₃: 13,84

				<ul style="list-style-type: none"> • Peso muestra antes del ataque: 1,91490 • Peso muestra calcinada: 0,3582
	Agua destilada + HNO ₃ + sales	151	g	Se asume la eliminación total
Calcinación final	Muestra final de oro puro	0,1725	g	Peso de la muestra luego de la calcinación con una mechera a gas.

A continuación se presentan las redes del proceso que muestran las cargas ambientales a lo largo de la copelación con la metodología ECOPOINTS 97, de igual forma se exponen las gráficas que las representan.

Como se aparecía en la Figura 21, la red general de cargas ambientales muestra un impacto total de 411 puntos. Se observa que los componentes más contaminantes durante el ciclo de vida de la copelación son el plomo y la energía eléctrica, siendo el plomo el elemento central de la presente investigación.

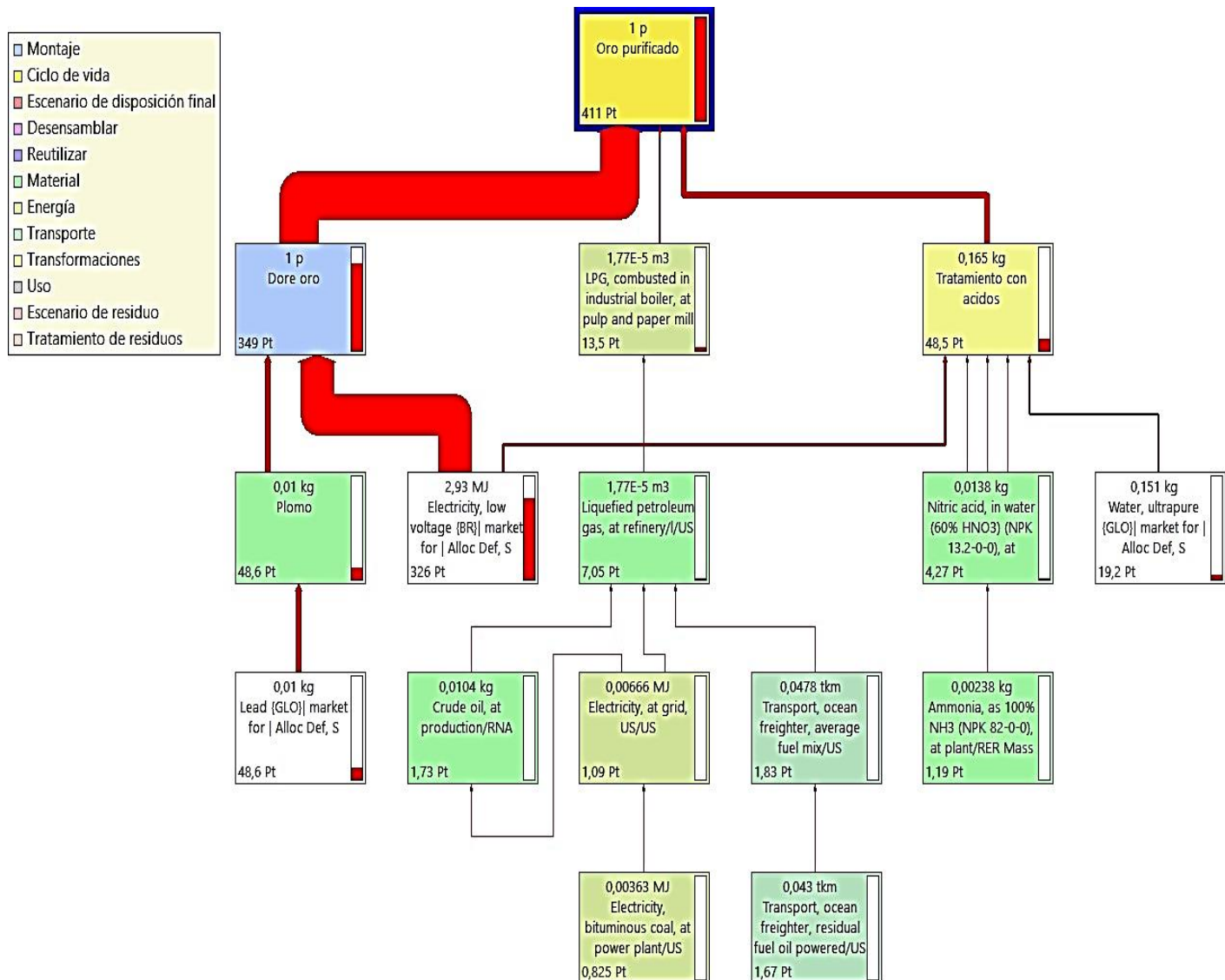


Figura 21. Red general de cargas ambientales. Puntuación única

La mayoría de actividades con impacto significativo se presentan en las etapas de obtención del doré, siendo las más sobresalientes las emisiones de plomo (Pb) al aire y al agua, esta última debido a la disposición de copelas usadas en el botadero de residuos sólidos urbanos sin ningún escenario de recuperación, donde lixivian el PbO contenido llegando a las aguas subterráneas. Asimismo, se tomaron en cuenta para el análisis las categorías de NO_x y SO_x ya que son otro impacto relevante por causa del tratamiento con ácidos que se le realiza a la muestra durante el proceso. Cabe resaltar que se evidencian otras categorías con altos impactos, sin embargo no se tomaron en consideración por la temática de la investigación.

6.3.2.1 NO_x. A partir de la red de cargas ambientales de caracterización del NO_x mostrada en la Figura 22, se obtiene el análisis de los óxidos de nitrógeno producidos al hacer reaccionar el ácido nítrico (HNO₃) con los metales, procedimiento que se realiza en la etapa del tratamiento con ácido a diferentes concentraciones al doré con el fin de eliminar el elemento plata de la muestra. Es importante resaltar que los dos óxidos de nitrógeno son significativos desde el punto de vista toxicológico, siendo el NO₂ el más nocivo.

6.3.2.2 SO_x. Como se muestra en la Figura 23 referente a las cargas ambientales del SO_x, la energía eléctrica y el plomo son los factores más influyentes. La energía eléctrica marca el mayor impacto debido a que los hidrocarburos y el carbón usados como fuente de energía en las centrales eléctricas pueden producir cantidades considerables de óxidos y dióxidos de azufre. Por otra parte, la copela tiene dentro de sus componentes elementales azufre (S), el cual en el proceso de oxidación del plomo (Pb) al ser sometido a temperaturas elevadas en la mufla, llega a un proceso de calcinación en el que al tener contacto con el oxígeno produce dióxidos de azufre. Este al ser un proceso repetitivo y constante produce cantidades considerables de estos subproductos y con ellos gran impacto al ambiente

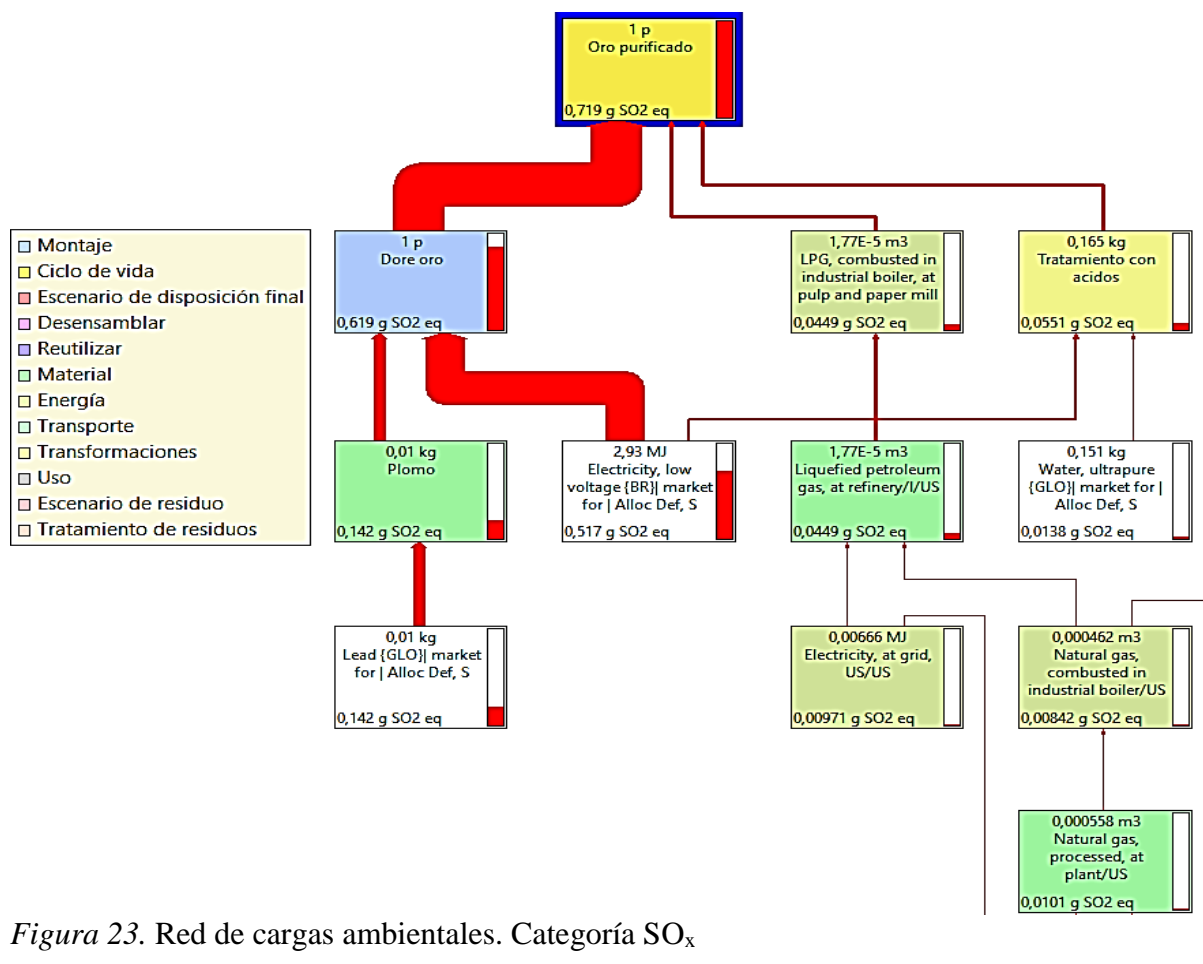


Figura 23. Red de cargas ambientales. Categoría SO_x

6.3.2.3 Plomo en el aire. En la Figura 24 se observa que el mayor aporte a esta categoría es debido a la lámina de plomo. El Pb contamina el aire de varias formas, entre ellas por las emisiones de material particulado resultante de su transporte, manipulación y almacenamiento. Adicionalmente, gran parte del plomo que entra al proceso de copelación se oxida al someterse a la calcinación, emitiéndose a la atmósfera en forma de óxido de plomo (PbO) gaseoso.

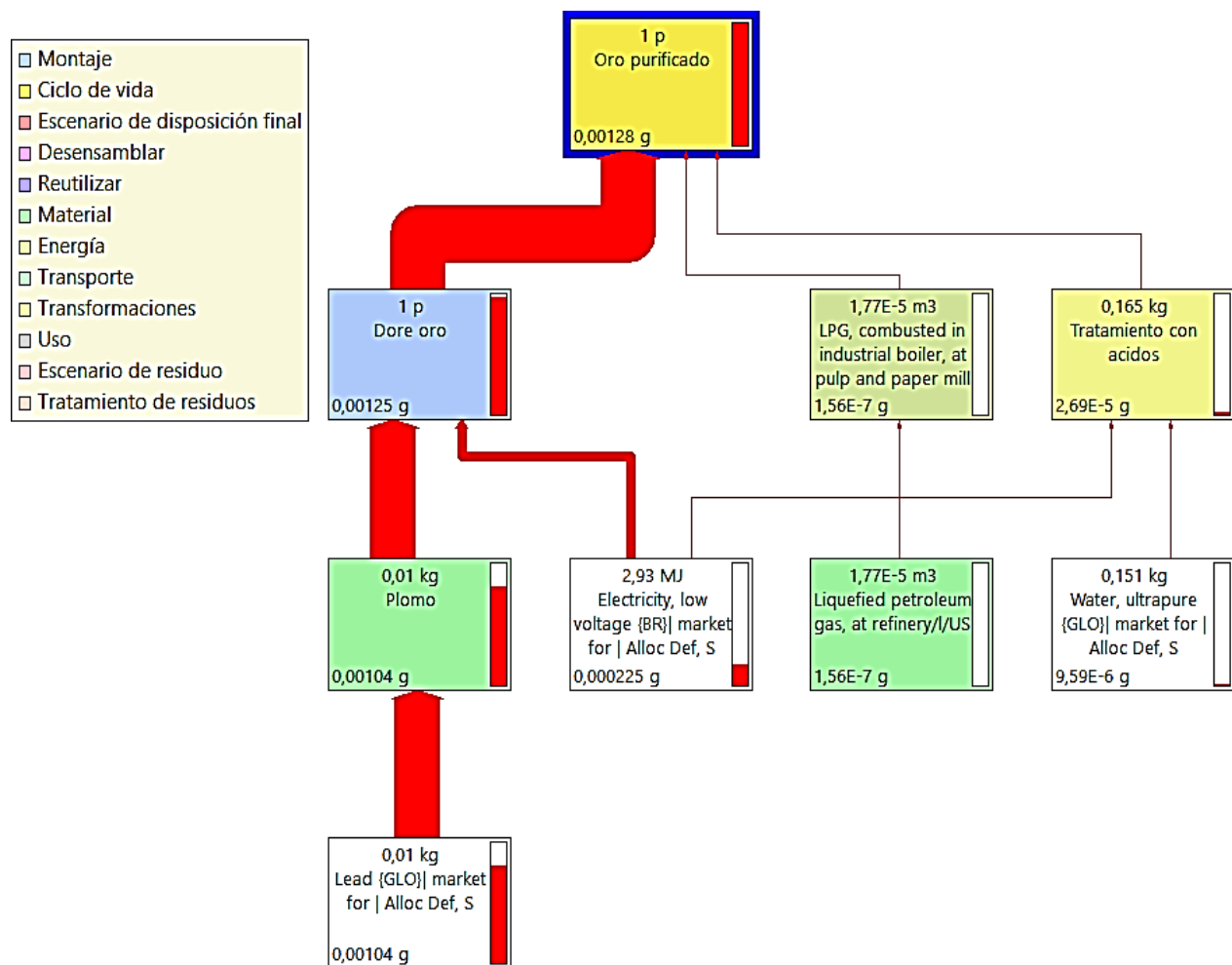


Figura 24. Red de cargas ambientales. Categoría Pb en el aire

6.2.2.4 Plomo en el agua. A partir de la evaluación de esta categoría (Figura 25), se demuestra el impacto ambiental producido por el plomo adicionado en el proceso de copelación a las fuentes hídricas, derivado de la disposición de residuos sólidos que contienen el óxido de plomo absorbido de manera convencional sin ningún pretratamiento. Si bien el PbO suele ser poco reactivo con solventes como el agua, puede reaccionar con ácidos. Los lixiviados ácidos provenientes de diversos desechos tienen contacto con las copelas descartadas, por lo que se genera un desprendimiento de PbO que provoca que éste se infiltre en el suelo de modo que puede llegar a los afluentes de agua.

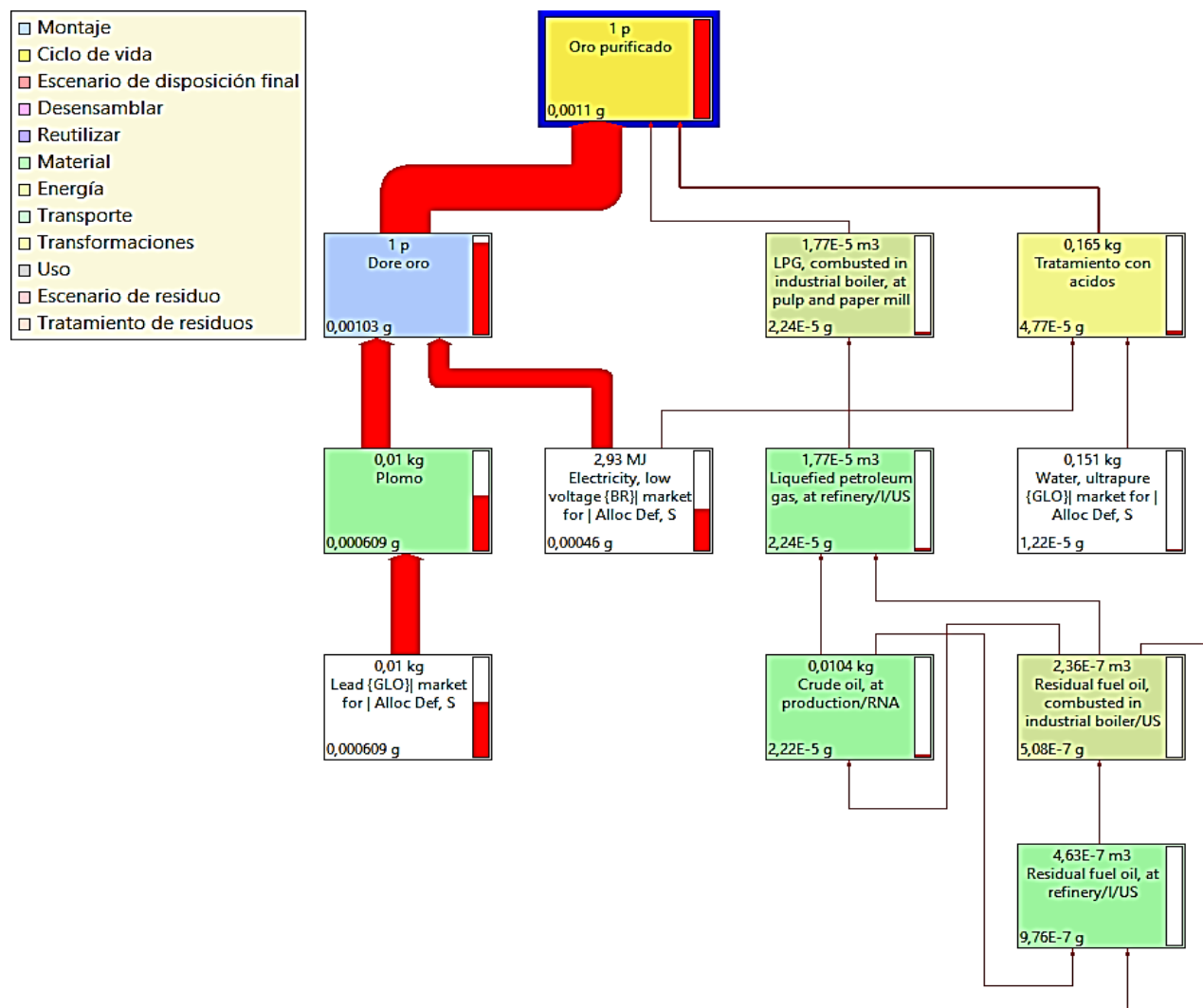


Figura 25. Red de cargas ambientales. Categoría Pb en el agua

Por medio de la metodología ReCiPe se realizó un análisis comparativo con el fin de relacionar los compuestos específicos analizados en Ecopoints 97 con las categorías de impacto cambio climático, acidificación, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles.

6.3.2.5 Cambio climático. En la categoría cambio climático el mayor porcentaje de impacto lo tiene la energía eléctrica, seguido del gas propano y el plomo como se observa en la Figura 26. A partir del análisis se determinó que la energía eléctrica y el propano deben su impacto a las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O y CO) producidas a partir del uso de combustibles fósiles. De igual manera, la energía tomada para realizar el ACV proviene principalmente de hidroeléctricas, las cuales son fuentes del CH_4 , gases que causan el sobrecalentamiento en la atmósfera. En el caso del plomo, llega a la atmósfera a través de las emisiones de los talleres de joyería y son nocivas debido al alto nivel de almacenamiento en el ambiente.

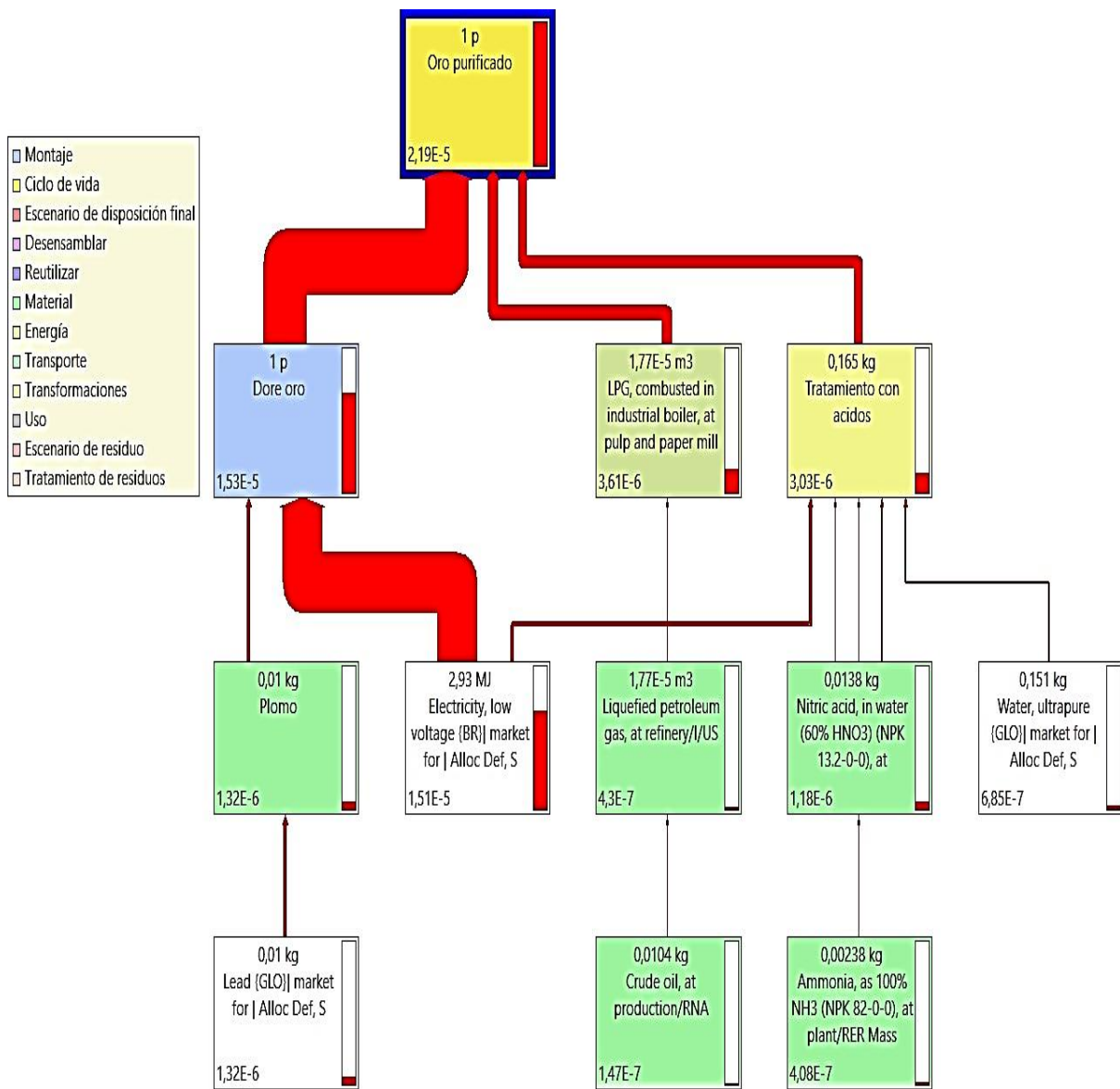


Figura 26. Red de cargas ambientales. Categoría cambio climático

6.3.2.6 Acidificación terrestre. Los impactos más representativos para esta categoría son debidos a la energía eléctrica, el plomo y el GLP (Gas licuado del petróleo). A partir del análisis realizado, se determinó que la energía eléctrica y el GLP tienen alta participación en la acidificación, ya que aportan a la introducción de sustancias ácidas al medio ambiente, las cuales son provocadas por las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre y de nitrógeno provenientes principalmente de la quema de combustible fósiles para la generación de energía; tras reaccionar con el vapor de agua presente en el aire, estos óxidos se convierten en compuestos ácidos que la lluvia precipita sobre la superficie terrestre. El plomo también es un factor importante a tener en cuenta debido a que los metales pueden quedar retenidos por procesos de adsorción y de precipitación y así incorporarse a las cadenas tróficas ocasionando daños en la corteza terrestre y en los seres vivos.

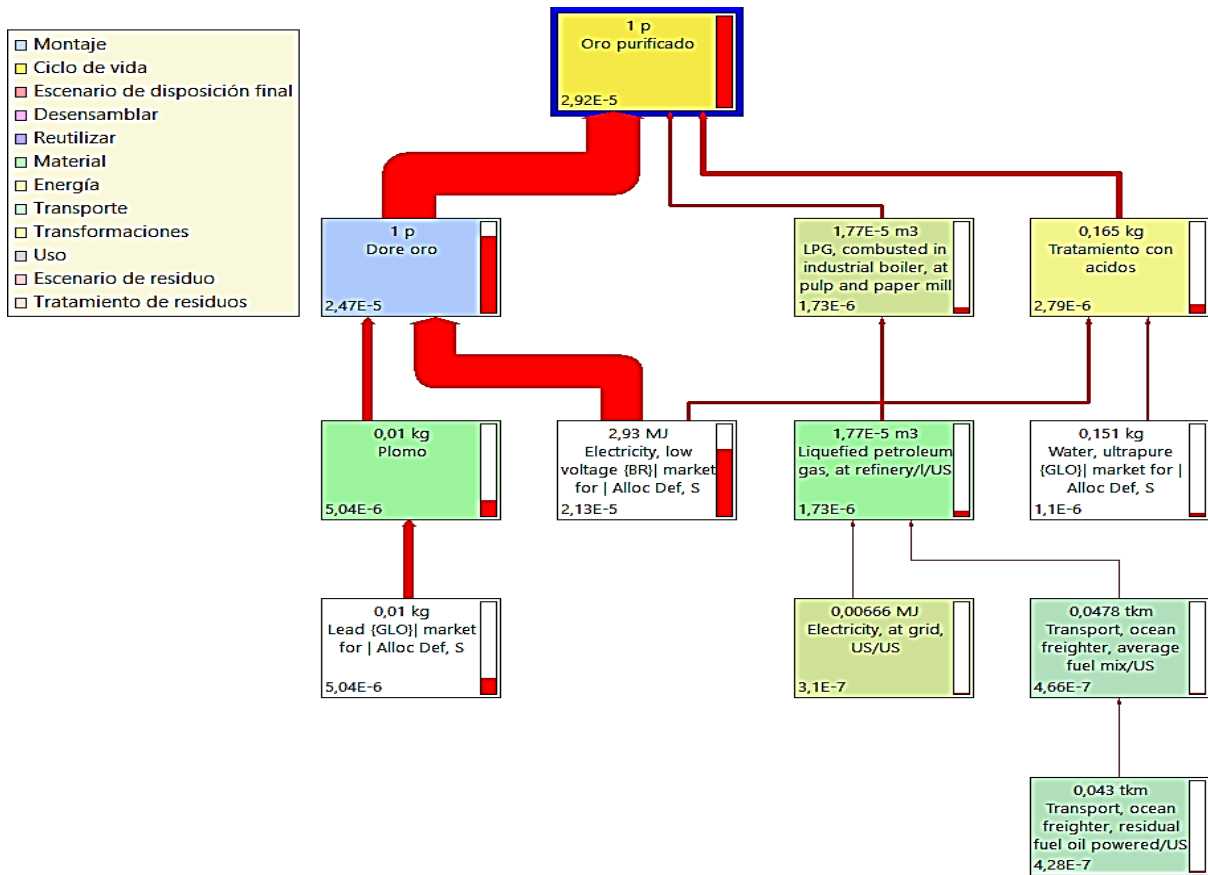


Figura 27. Red de cargas ambientales. Categoría acidificación terrestre

6.3.2.7 Toxicidad humana. Teniendo en cuenta que este indicador se basa en las concentraciones tolerables de sustancias tóxicas en el aire y en el agua admisibles para los seres humanos, se realizó un análisis tomando como eje central el hecho de que el proceso de copelación emplea sustancias tóxicas como es el caso del plomo y que la generación de energía eléctrica aporta significativamente en esta categoría. El impacto del plomo en este ítem se debe principalmente a que los talleres dedicados a la copelación están ubicados en el área urbana, haciendo que los habitantes del sector queden directamente expuestos a altos niveles de concentración de los compuestos de plomo derivados del proceso; por otra parte, como ya se mencionó anteriormente los residuos sólidos peligrosos descartados durante el proceso pueden desprender sustancias tóxicas que llegan a través del agua y las cadenas tróficas a los humanos. Asimismo, las emisiones producidas en la generación de energía eléctrica crean compuestos que pueden quedar suspendidos en la atmósfera o precipitarse a través de la lluvia ácida, llegando por cualquier vía al ser humano.

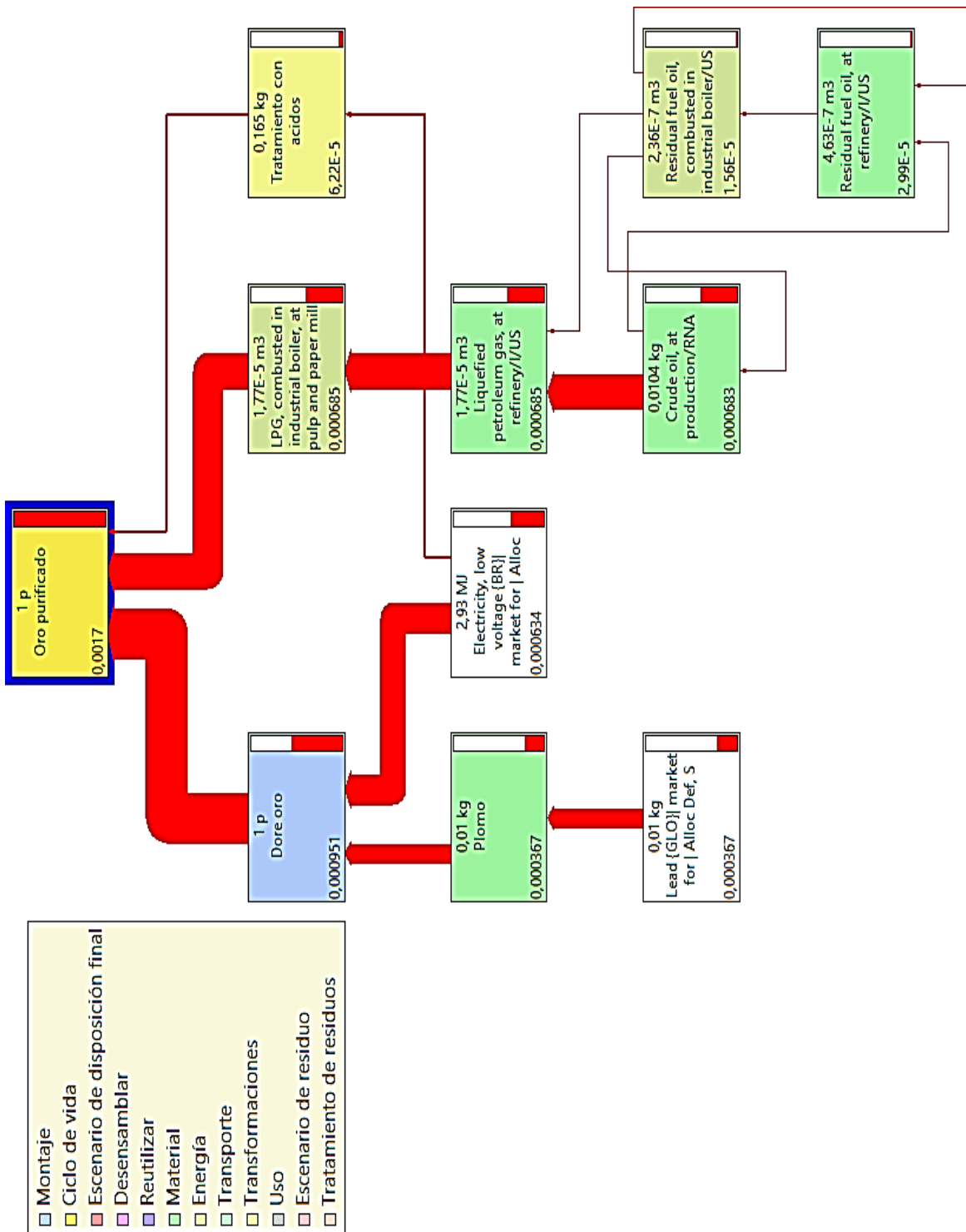


Figura 28. Red de cargas ambientales. Categoría toxicidad humana

6.3.2.8 Eutrofización de agua dulce. Se evidenció que los impactos que aportan en esta categoría son la energía eléctrica, el plomo y la copela con plomo, este último se destaca debido a que es la única categoría en la que la fase de fin de vida representa una parte independiente en la red de cargas ambientales, debido a la contribución representada en los lixiviados que la copela con plomo pueda generar luego de su disposición final en un relleno sanitario, contribuyendo a la contaminación de aguas subterráneas. El plomo afecta a la eutrofización de agua dulce puesto que se contamina el agua con agentes eutrofizantes, como compuestos de metales tóxicos que aceleran el proceso hasta convertirlo en un grave problema de contaminación, provocando desequilibrio ecológico y consecuencias en la cadena trófica como la bioacumulación.

Del impacto de la energía eléctrica se infiere que es dado por los sistemas térmicos de generación de electricidad basados en los combustibles fósiles, a causa de la emisión de fosfatos y nitratos al medio hídrico y atmosférico durante la fase de combustión.

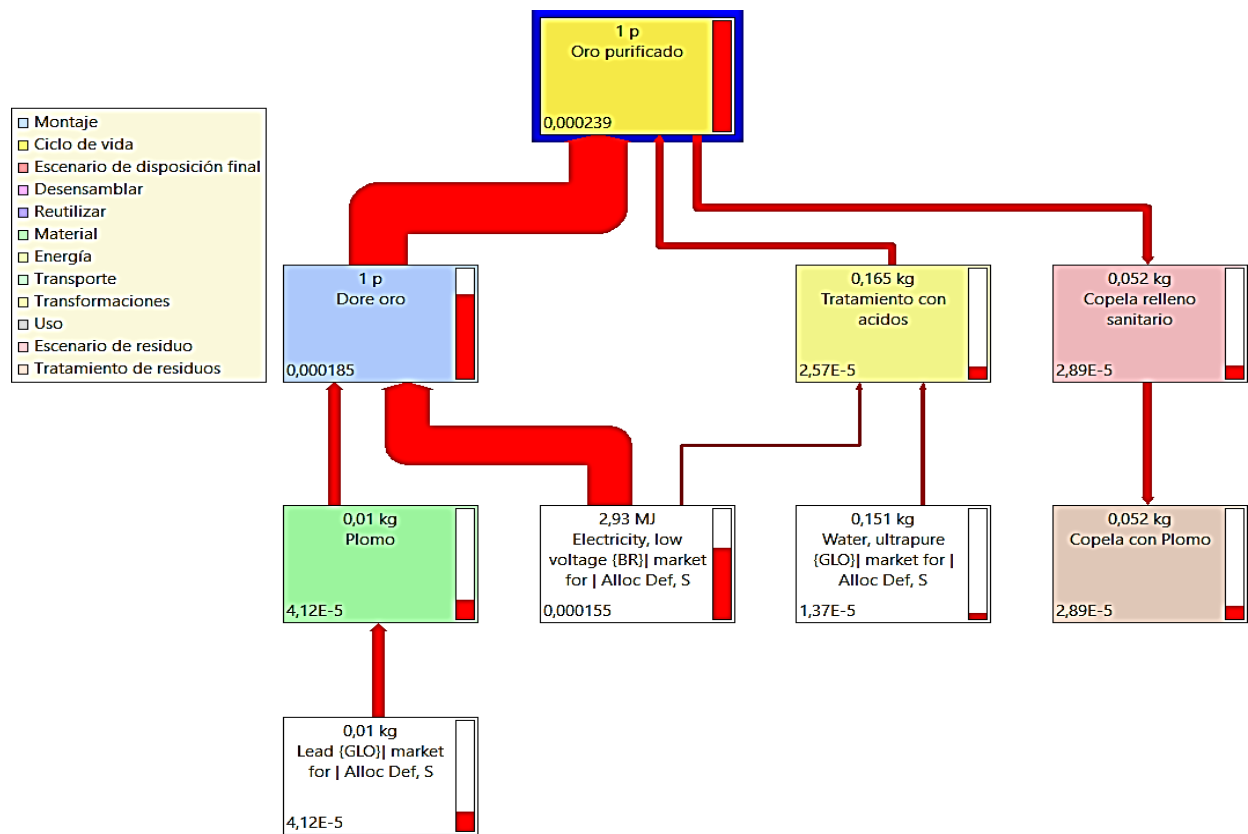


Figura 29. Red de cargas ambientales. Categoría eutrofización de agua dulce

6.3.2.9 Agotamiento de recursos minerales. Como se evidencia en la Figura 30, la etapa que aporta casi la totalidad del impacto de esta categoría es la obtención del doré. Esto se debe a que el oro (Au) es uno de los elementos más escasos de acuerdo a su porcentaje en la corteza terrestre por lo que la gran demanda de este recurso mineral en la industria joyera contribuye notoriamente al agotamiento de las reservas de este mineral. Además de este metal, la plata (Ag) también es requerida en cantidades considerables para la separación del oro en la copelación, por lo que se sobreentiende la disminución de este elemento en el caso de no realizarse su recuperación al final del proceso.

Esta categoría de impacto remarca la importancia realizar la explotación de minerales de forma responsable, adquiriendo el compromiso de reducir el consumo de estos recursos minerales, con la finalidad de mantener el equilibrio del planeta.

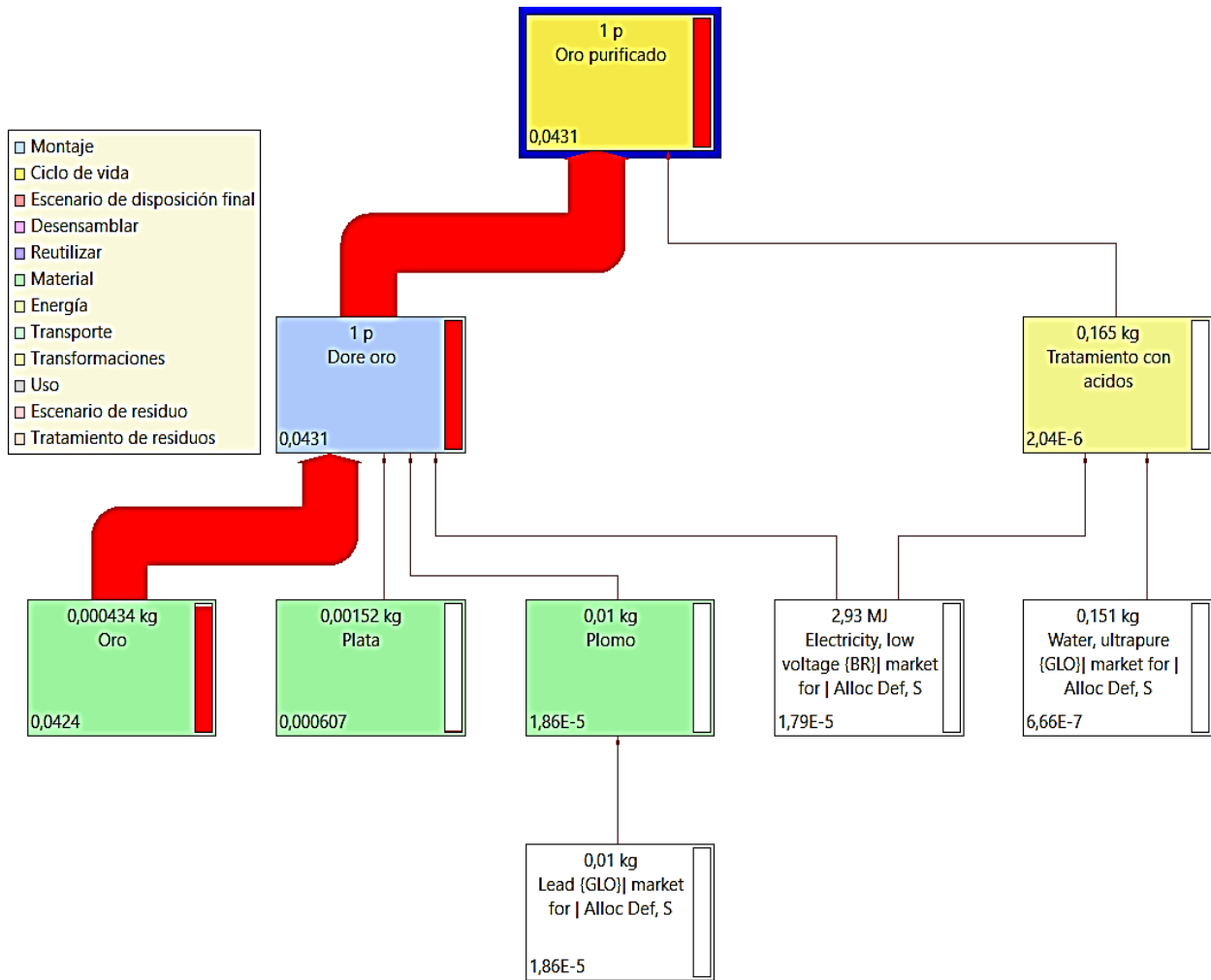


Figura 30. Red de cargas ambientales. Categoría agotamiento de recursos minerales

6.3.2.10 Agotamiento de combustibles fósiles. Según la red de cargas ambientales presentada en la Figura 31, se muestran como impactos mayoritarios los asociados a los consumos energéticos de la mufla y la mechera a gas, seguidos de la contribución del plomo.

Se examina entonces que el consumo de energía eléctrica es el principal impacto debido a que su generación se da en centrales termoeléctricas que funcionan a partir de la combustión de fueloil, gas natural o carbón. En el caso del plomo, se encuentra presente en esta categoría de impacto debido a que este metal pesado se emplea en la extracción y tratamiento de recursos fósiles. A partir de ello se concluye que aunque el plomo en este caso no causa un impacto directo en el agotamiento de recursos fósiles, si es un insumo que se utiliza en la obtención de otros, por lo tanto impacta en este proceso de agotamiento.

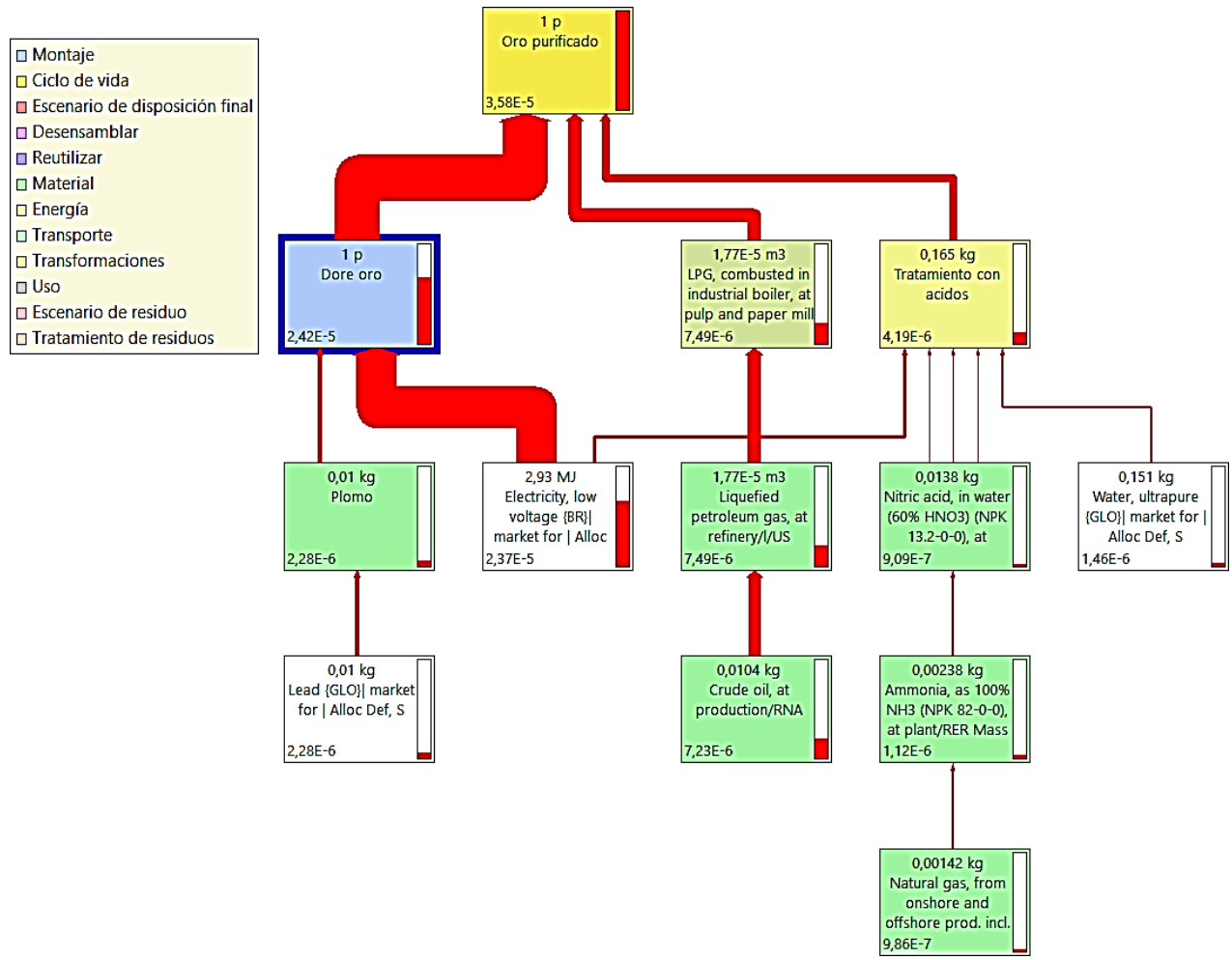


Figura 31. Red de cargas ambientales. Categoría agotamiento de combustibles fósiles

6.4 Estudio de aprovechamiento de residuos sólidos generados en el proceso de copelación

6.4.1 Elaboración de concreto y pruebas de resistencia a la compresión. Como primera medida, se elaboraron las probetas presentadas en la Figura 32 a partir de las muestras de concreto estándar y las de adición de residuos del proceso de copelación.



Figura 32. Elaboración y curado de los especímenes

Después de ser sometidas a un proceso de curado en las condiciones indicadas en la metodología, se procedió a fallar a compresión las muestras con edades específicas de 7 y 14 los dos tipos de concreto elaborados.

Cada ensayo se realizó por duplicado, una vez completado el proceso de curado se midieron las dimensiones de cada espécimen y se fallaron en estado húmedo aplicando una velocidad de carga de prueba de 0,25 MPa/s. Los resultados de resistencia a la compresión, resumidos en la Figura 33, son el promedio de los valores obtenidos al dividir la carga aplicada a la que falló cada cilindro entre las dimensiones reales de los mismos. En la misma figura, se especifica la desviación estándar de para cada prueba.

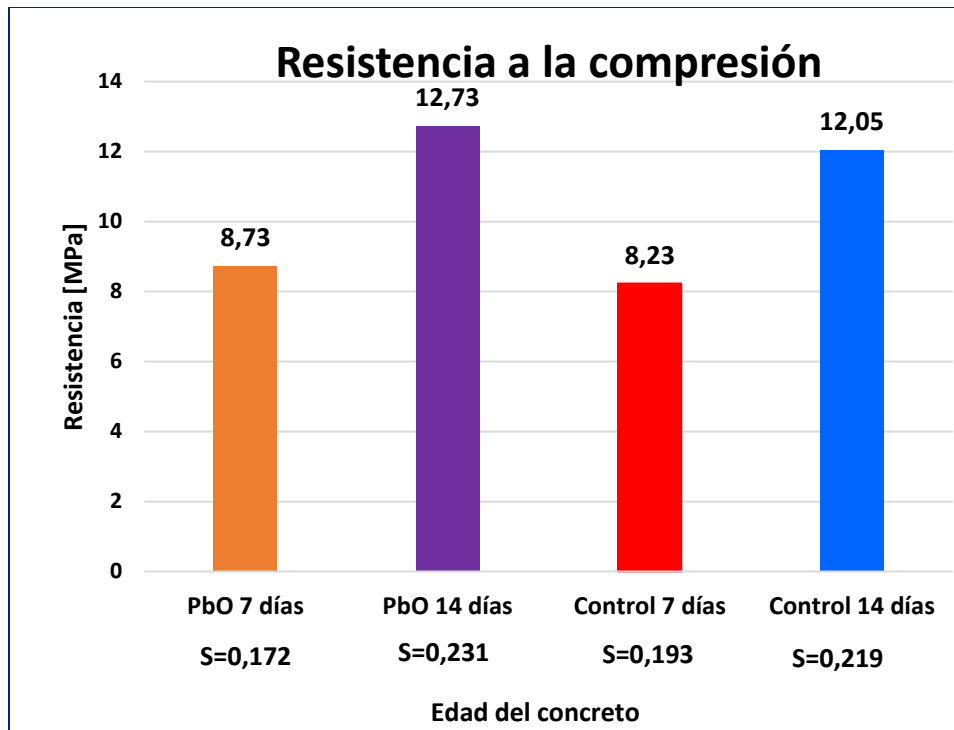


Figura 33. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

Como se puede observar, la resistencia tuvo un incremento en las diferentes muestras, tanto las de control como las de adición de residuos de copela con contenido de PbO, sin embargo, este valor estuvo por debajo de lo esperado, teniendo en cuenta que los protocolos de elaboración empleados fueron los diseñados para obtener concreto de resistencia 3000 psi (28,427 MPa) para el material de 28 días de edad, lo que se traduce a valores estimados de resistencia a la compresión del 65% y 90% para las edades de 7 y 14 días respectivamente, según datos bibliográficos (Universidad Politécnica de Valencia, 2010).

Tener resistencias menores a las especificadas disminuye el factor de seguridad de la estructura, este comportamiento puede deberse a falencias en la dosificación, mezcla, transporte, colocación, compactación y curado del concreto.

Por otra parte, los resultados encontrados evidencian un leve incremento de la resistencia para los cilindros elaborados con adición de residuos de copela, lo que representaría que el óxido de plomo (PbO) por sus propiedades puede ser un aditivo importante al imprimir dureza a las estructuras, no obstante, este hecho está sujeto a estudios más exhaustivos que los realizados, teniendo en cuenta la elaboración de más ensayos y evaluación a edades de 3, 7, 14 y 28 días para corroborar estos efectos.

6.4.2 Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad (TCLP). Con el fin de evaluar la viabilidad del aprovechamiento de los residuos peligrosos originados en el proceso de copelación y de comprobar los impactos ambientales producidos a causa de la lixiviación de óxido de plomo (PbO) de los mismos encontrados en el ACV, se realizó el procedimiento de lixiviación característico de toxicidad (TCLP) por medio del cual fue posible simular las condiciones a las que se exponen las copelas desechadas en las condiciones normales dentro del botadero de residuos sólidos urbanos.

Se sometieron a este análisis muestras de copelas usadas, concreto estándar y concreto con adición de los residuos de copelación. Siguiendo la metodología citada anteriormente, se obtuvo licores de lixiviación de todas las muestras que posteriormente fueron analizados por medio de Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA).

La curva de calibración obtenida para la determinación de plomo diseñada para la presente investigación se muestra en la figura 34.

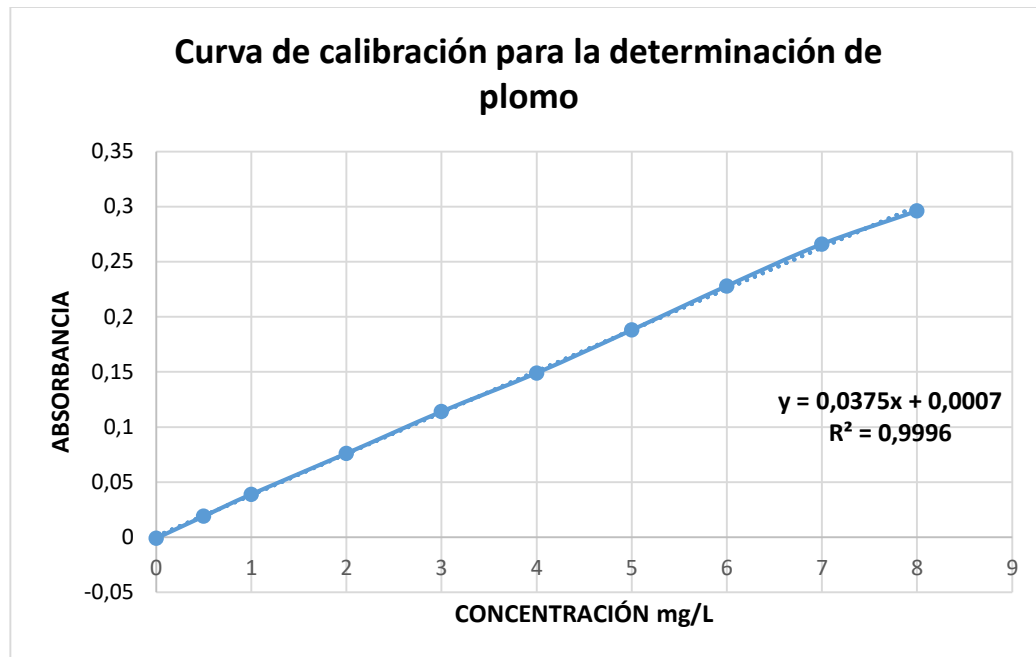


Figura 34. Curva de calibración para la determinación de plomo (Pb)

De acuerdo a los resultados de absorbancia arrojados por el equipo de absorción atómica de llama para las diferentes muestras analizadas y a partir del uso de la ecuación de la recta obtenida de la curva de calibración, se obtuvo los resultados de concentración de plomo (Pb) en los lixiviados luego del procedimiento TCLP para las tres muestras (Tabla 8).

Tabla 8. Concentraciones de plomo (Pb) en lixiviados por medio del procedimiento TCLP

MUESTRA	CONCENTRACIÓN [mg/L]
Copela	8,80
Concreto de control	$2,67 \times 10^{-3}$
Concreto con adición de copelas usadas	0,51

Los resultados demuestran que el plomo (Pb) contenido en las copelas usadas fue lixiviado en concentraciones superiores a la máxima permisible estipulada por la EPA en la metodología TCLP que es de 5 mg/L (Agencia de Protección Ambiental, EPA, 1989), de acuerdo a los

resultados de absorción atómica para esta muestra preparada con factor de dilución 100 que mostró 8,80 mg/L de Pb. Este resultado indica que este material descartado en el proceso de copelación se catalogue como un residuo sólido peligroso.

Asimismo, según el valor de la concentración de Pb obtenido en el ensayo, se muestra el aprovechamiento de estos residuos peligrosos en la elaboración de concreto como una alternativa eficaz que disminuye considerablemente la lixiviación del plomo, evitando de esta manera la eutrofización del agua dulce que por medio de su llegada a las aguas subterráneas.

Conclusiones

A partir del peso obtenido una vez eliminadas las impurezas de la muestra se halla la Ley característica, lo que indica el grado de pureza de cada muestra del metal precioso. El oro mina analizado en el presente estudio arrojó una ley de 0,6 y con una equivalencia de 14,4 quilates, clasificándolo como oro de segunda ley.

De acuerdo a las pruebas realizadas se encontró que el proceso de copelación tiene repercusiones ambientales negativas, debido a las emisiones de distintos subproductos tóxicos y a la acumulación de copelas usadas con un contenido aproximado de óxido de plomo (PbO) del 5,2% en peso, equivalente a 52000 mg/L (teniendo en cuenta los estudios de difracción de rayos X de muestras policristalinas realizados a dichos desechos).

Con base en el análisis del ciclo de vida, se establece como actividad de mayor impacto ambiental la encaminada a la obtención del doré con un aporte en la mayoría de las categorías del 60%. Asimismo, se posicionan como principales impactos negativos la llegada del plomo al agua y al aire, ya que según los datos entregados en el ACV, este insumo tiene un impacto superior al 80% en estos ítems.

La evaluación de la categoría de toxicidad humana muestra nuevamente al plomo como el material que más afecta por sus emisiones atmosféricas y material particulado. La eutrofización de agua dulce es la única evaluación que muestra la copela usada de forma individual como una amenaza ambiental, lo que se traduce en la importancia de una correcta disposición final de este residuo para evitar la contaminación de las aguas con plomo y su bioacumulación.

El procedimiento de lixiviación característico de toxicidad (TCLP) cataloga las copelas usadas como un residuo peligroso al exceder el límite aceptable de concentración de plomo, mostrando un resultado promedio de 8,80 mg/L, hecho que requiere la búsqueda de alternativas de tratamiento o aprovechamiento para reducir los problemas de gestión de estos residuos sólidos.

Se destaca la utilización de las copelas usadas en la fabricación de concreto como una buena alternativa para reducir la cantidad de emisiones tóxicas al ambiente, lo cual se comprueba a partir del procedimiento TCLP que presenta resultados de concentración de Pb en los lixiviados de concreto con adición de copelas usadas de 0,51 mg/L, valor inferior al máximo aceptado por esta misma metodología, lo que se traduce en una disminución de Pb lixiviado de 94,2% comparado con el que se emitiría de las copelas de desecho sin tratamiento.

La utilización de la copela usada proporciona un aumento en la resistencia a la compresión del concreto. Otro valor agregado de la implementación de estos sistemas de economía circular a los diferentes procesos productivos, en este caso de obras civiles, es la obtención de sellos verdes que pueden no solamente demostrar el compromiso ambiental de las empresas sino también valorizar los diferentes productos y servicios.

Recomendaciones

- El estudio preliminar de aprovechamiento de residuos sólidos provenientes de la copelación en la elaboración de concreto mostró resultados favorables que merecen ser tomados en cuenta para la profundización del estudio, no solamente en cuanto a aspectos ambientales, sino también de ingeniería civil, ahondando en la investigación de las cantidades de copelas que pueden entrar al proceso de acuerdo a la producción de las mismas y a las propiedades de resistencia que el óxido de plomo (PbO) puede aportar al concreto.

- Se recomienda complementar el estudio de aprovechamiento de residuos de copelas con análisis del concreto por medio de difracción de rayos X de muestras policristalinas y de fluorescencia de rayos X, con el fin de corroborar las concentraciones de plomo finales en el material elaborado y servirse de estos resultados para estandarización de cantidades y proporciones a usar a gran escala, de manera que se garanticen los límites establecidos por las normas NTC 5828-2010 y NTC 1335-2015 para la adición de plomo (Pb).

Referencias bibliográficas

Agencia de Protección Ambiental, EPA. (1989). *method 1311: Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)*. (). United States:

Aldana Piñeros, W. (2015). *La competitividad y el ínfimo desarrollo tecnológico en la elaboración de joyas como agentes reductores de las exportaciones de joyería colombiana*

Alguacil, F. J. (1995). El refinado del oro. *Revista De Metalurgia*, 31(3), 182-191.

doi:10.3989/revmetalm.1995.v31.i3.965

Cabrera, M., & Paola, K. (2016). *Determinación de los niveles de plomo en sangre en trabajadores de una fábrica de pinturas en la ciudad de quito, por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito* Retrieved from

<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/12367>

Cartagena Toapanta, R. G. (2011). *Análisis de oro y plata de concentrados gravimétricos auríferos mediante ensayo al fuego utilizando cobre como colector* Retrieved from

<http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1189>

Castro Damián, J. A. (2015). *Aplicación de la técnica de encuarte por filtración en métodos gravimétrico y absorción atómica en ensayo de oro en el laboratorio químico de la empresa administradora chungar S.A.C.* Retrieved from

<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/1008>

Cerceau, C. I., Carvalho, C. d. F., Rabelo, A. C. S., dos Santos, C. G., Gonçalves, S. M. D., & Varejão, E. V. V. (2016). Recovering lead from cupel waste generated in gold analysis by pb-fire assay. *Journal of Environmental Management*, 183, 771-776.

doi:10.1016/j.jenvman.2016.08.052

Conpes. (2014). *Política nacional para consolidar el sistema de ciudades en colombia*. Milano: Corbaccio.

De Castro Brasil, P., Bittencourt Lomardo, L., Pilares Vera, C., & Marx de Andrade, F. (2011). *Capacitación de mano de obra: Adecuaciones en la construcción civil direccionadas a la sustentabilidad*

Garrido Cabarique, D. (2015). *Plan de negocios para la incorporación y comercialización de una nueva línea de productos en la empresa JW joyeros*

Gaviria, A. C., Restrepo, O. J., & Bustamante, O. (2007). *Hidrometalurgia aplicada. línea de metales preciosos*. Medellín:

Gestión ambiental. análisis de ciclo de vida. principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006) (2006).

González Clvet, J. M., Torres Pardo, A., & García González, E. (2009). *Nuevas propiedades en materiales ferroeléctricos clásicos* Universidad Complutense de Madrid.

Icontec Internacional. (2000). *Norma técnica ntc colombiana 550*. Bogotá, Colombia:

- Icontec Internacional. (2002). *Norma técnica colombiana 5051*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Retrieved from https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?gid=MIVJTEAAAAAAAAAAAA&input_doc_number=AENOR UNE-EN ISO 11426
- Icontec Internacional. (2010a). *Norma técnica colombiana ntc 673. ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Bogotá, Colombia:
- Icontec Internacional. (2010b). *Norma técnica ntc colombiana 5828*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Icontec Internacional. (2015). *Norma técnica ntc colombiana 1335*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-33222010000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Mindiola, M., Pedraza, J., & Escalante, H. (2008). Índice de carga contaminante para los vertimientos generados durante el proceso de refinación química de oro en los talleres de joyera de Bucaramanga. *Dyna*, 75(156), 135-146.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Sello ambiental colombiano.

- Ministerio de Salud, C. (2004). Decreto supremo n° 148. reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Retrieved from /es/normativa/decreto-supremo-no-148-reglamento-sanitario-sobre-manejo-residuos-peligrosos
- Monar, S., & Carlos, J. (2004). *Sistema de gestión para la prevención de riesgos laborales*
Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14670>
- Niembro, J., ; González, & M. (2008). Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: Revisión y prospectiva. *Internacional Conference on Project Engineering*,
- Nordberg, G. (2012). *Recuperación de metales preciosos a partir de residuos de joyería*. La Paz: D - INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- Öncel, M. S., Bektaş, N., Bayar, S., Engin, G., Çalışkan, Y., Salar, L., & Yetiş, Ü. (2017). Hazardous wastes and waste generation factors for plastic products manufacturing industries in turkey. *Sustainable Environment Research*, 27(4), 188-194.
doi:10.1016/j.serj.2017.03.006
- Organización Mundial de la Salud. (2005). *Manual de bioseguridad en el laboratorio* (Tercera Edición ed.). malta: Organización Mundial de la Salud.
- Pimiento, A., Armando, E., Díaz, G., & Johanna, L. (2013). *Análisis del uso de nuevas tecnologías de información y comunicación en las PYMES de los sectores de calzado y marroquinería, joyería, avícola y metamecanico de bucaramanga y su área metropolitana*
Retrieved from <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/970>

Puertas, F., Barba, A., Gazulla, M. F., Gómez, M. P., Palacios, M., & Martínez-Ramírez, S.

(2006). Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento portland: Caracterización y activación alcalina. *Materiales De Construcción*, 56(281) doi:10.3989/mc.2006.v56.i281.94

Rabbani, M., Heidari, R., Farrokhi-Asl, H., & Rahimi, N. (2018). Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types. *Journal of Cleaner Production*, 170, 227-241.

doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.029

Resolución 1555 de octubre de 2005, (2005).

Rojas Ocaña, W. O., & Saavedra Vargas, W. S. (2016). *Evaluación del rendimiento de nitrato de plata por solidificación a partir del relave del doré en el laboratorio químico de century mining Perú S. A. C.* Retrieved from <http://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/66323>

Sánchez Ponce, M. Á. (2005). *Investigación comparativa de los métodos clásicos de refinación de oro en eficiencia y costos, proceso agua regia, proceso ácido nítrico, proceso agua regia sin encuarte, proceso outokumpu modificado, para pequeñas refinerías de oro*

Sanes Orrego, A. (2012). *El análisis de ciclo de vida (ACV) en el desarrollo sostenible:*

Propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos

Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/8875/>

SimaPro:Herramienta de ACV. (2015). Retrieved from

<http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/simapro-herramienta-de-analisis-de-ciclo-de-vida>

Turismo Sostenible. (2009,). Turismo sostenible: Sello ambiental colombiano. Retrieved from

<http://sostenibleturismo.blogspot.com.co/2009/01/sello-ambiental-colombiano.html>

Universidad Politécnica de Valencia. (2010). *Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura.*

Wadanambi, L., Dubey, B., & Townsend, T. (2008). The leaching of lead from lead-based paint in landfill environments. *Journal of Hazardous Materials*, 157(1), 194-200.

doi:10.1016/j.jhazmat.2007.12.088

Yilmaz, O., Kara, B. Y., & Yetis, U. (2017). Hazardous waste management system design under population and environmental impact considerations. *Journal of Environmental*

Management, 203, 720-731. doi:10.1016/j.jenvman.2016.06.015