



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA
DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO**

Marvin Eduardo Mérida Cano

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA
DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARVIN EDUARDO MÉRIDA CANO

ASESORADO POR ELING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy OlympoPaiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

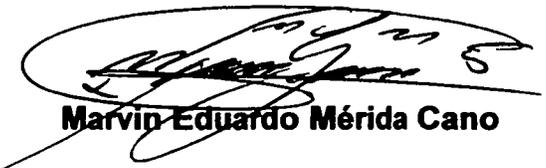
DECANO	Ing. MurphyOlympoPaiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha julio de 2012.



Marvin Eduardo Mérida Cano



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 14 de agosto de 2013

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
Dirección
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Respetable Ing. Monzón:

Deseando que sus labores se realicen con éxito, dirijo la presente para hacer de su conocimiento que he revisado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación titulado **“EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO”**, el cual se llevó a cabo por el estudiante de Ingeniería Química **Marvin Eduardo Mérida Cano**, identificado con el carné No. **2007-22377**.

Considerando que dicho documento cumple satisfactoriamente con los requisitos exigidos, solicito sirva darle continuidad al proceso para su aprobación.

Agradeciendo su atención, me suscribo atentamente,

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656

Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

Guatemala, 28 de agosto de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.049.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-035-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Marvin Eduardo Mérida Cano.**

Identificado con número de carné: **2007-22377.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

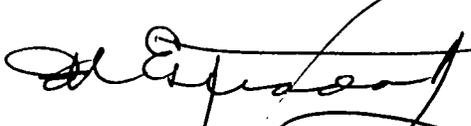
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA
DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Víctor Manuel Monzón Valdez**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"




Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

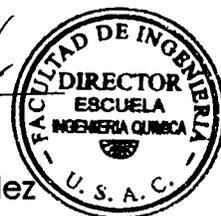




UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.265.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **MARVIN EDUARDO MÉRIDA CANO** titulado: **"EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL PLOMO PRESENTE EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE LA DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE ORO Y PLATA EN UN LABORATORIO METALÚRGICO**, presentado por el estudiante universitario **Marvin Eduardo Mérida Cano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, septiembre de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por resguardarme y guiarme en todo este camino.
- Mis padres** Marco Tulio Mérida Tello (q.e.p.d.) y Estela Josefina Cano Morales, por su amor, sus consejos y el apoyo para alcanzar este sueño.
- Mis hermanos** Alberto Rolando, Marco Vinicio y Pablo Josué Mérida Cano, por el apoyo, sus consejos y amor para poder llegar a alcanzar este triunfo.
- Mi abuela** Alejandra Morales, por sus sabios consejos y amor que siempre me ha brindado.
- Mis padrinos** Edwin Enrique Cano Morales y Telma Maricela Cano Morales, por el apoyo, sus consejos, sus enseñanzas y cariño que me brindaron.
- Mis tíos** Con mucho cariño y respeto.

Mis primos

Por su cariño y compartir conmigo muchas etapas de mi vida.

Mis amigos

Con mucho cariño, porque fueron parte importante en toda esta etapa y han prevalecido engrandeciendo nuestra amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por conducirme por el buen camino y bendiciéndome cada día.
Ing. Víctor Monzón	Por la asesoría brindada, por sus enseñanzas, consejos y su apoyo incondicional para realizar este estudio.
Ing. Daniel W. Kappes	Por su confianza y apoyo incondicional para la realización experimental de este proyecto.
<i>Kappes, Cassidy & Associates</i>	Por su apoyo y ayuda en la realización de este proyecto.
Colaboradores	Amigos y personas que me ayudaron en la realización de este estudio.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por prepararme como profesional.
Mi revisor	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias, por su dedicación, apoyo, consejos y revisión de este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Metalurgia.....	5
2.1.1. Historia de la metalurgia.....	5
2.1.2. Metalurgia.....	6
2.2. Plomo.....	6
2.2.1. Historia del plomo.....	6
2.2.2. Características del plomo.....	7
2.2.3. Propiedades físicas y químicas del plomo.....	8
2.2.3.1. Propiedades físicas.....	8
2.2.3.2. Propiedades químicas.....	8
2.2.4. Distribución y usos del plomo.....	10
2.2.5. Evaluación del plomo.....	10
2.2.6. Balance de masa.....	11
2.2.7. Determinación cuantitativa por medio de absorción atómica (AA).....	13
2.2.8. Efectos sobre la salud humana.....	14

2.2.9.	Efecto del plomo al ambiente	15
2.3.	Determinación analítica de oro y plata	16
2.3.1.	Oro	16
2.3.1.1.	Características físicas y químicas del oro	17
2.3.2.	Plata	18
2.3.2.1.	Características físicas y químicas de la plata	18
2.3.3.	Ensayos al fuego (método de vía seca)	19
2.3.3.1.	Etapas de fundición	20
2.3.3.2.	Fundentes	22
2.3.3.3.	Etapas de copelación	24
2.3.3.4.	Etapas de separación	26
2.3.3.5.	Proceso de pesaje	27
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	29
3.1.	Definición de operación de las variables	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio	30
3.3.	Recursos humanos disponibles	30
3.4.	Recursos materiales disponibles y equipo	30
3.4.1.	Materia prima y reactivos	31
3.4.2.	Equipo de laboratorio a utilizar	31
3.5.	Técnica cuantitativa	33
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	36
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	36
3.7.1.	Metodología experimental para la determinación de la cantidad de óxido de plomo en el reactivo de ensayos de fuego (flux)	36

3.7.2.	Metodología experimental para la determinación del botón de plomo en la etapa de fusión.....	37
3.7.2.1.	Equipo y materiales para el área de fusión	40
3.7.3.	Metodología experimental para la determinación del Doré (aleación de oro y plata)	41
3.7.3.1.	Equipo y materiales para el área de copelación.....	42
3.7.4.	Metodología experimental para la determinación de la cantidad de oro y plata en el Doré (aleación de oro y plata).....	42
3.7.4.1.	Material y equipo en el área de gravimetría	43
3.7.5.	Metodología experimental para la determinación de la cantidad de plomo en la escoria (vidrio) luego del proceso de fusión	44
3.7.5.1.	Material y equipo en el área de fusión	45
3.7.6.	Metodología experimental para la determinación de la cantidad de plomo en la copela luego del proceso de copelación.	46
3.7.6.1.	Material y equipo en el área de copelación.....	46
3.7.7.	Metodología experimental para la determinación de la cantidad de plomo en el Doré (aleación de oro y plata).....	46
3.7.7.1.	Material y equipo en el área de gravimetría	48

3.7.8.	Metodología experimental para el balance de masa en el proceso de la determinación de oro y plata	48
3.7.9.	Tablas de tabulación de datos	50
3.8.	Análisis estadístico.....	52
4.	RESULTADOS	55
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	69
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA	83
	APÉNDICES	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de la etapa de fusión a la de copelación.	21
2.	Esquema del horno con los crisoles en el proceso de fusión	21
3.	Diagrama del diseño experimental	34
4.	Posición de muestras para pesar	37
5.	Vaciado de muestras y recipiente de escoria con plomo	39
6.	Correlación de la cantidad de plomo absorbida por la copela en función de los días de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo en la copela se obtuvo con la temperatura constante en cada día de análisis	55
7.	Correlación de la cantidad de plomo que contiene el residuo (escoria) en el área de fusión en función a los días de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada día de análisis.	56
8.	Correlación de la cantidad de óxido de plomo que está contenida en el Doré (aleación de oro y plata) en el área de gravimetría en función de los días de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso.	57
9.	Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 1 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso.	58

10. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 2 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 59
11. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 3 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 60
12. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 4 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 61
13. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 5 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 62
14. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 6 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 63
15. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 7 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 64
16. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 8 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso. 65

TABLAS

I.	Definición de las variables para la evaluación de plomo presente en la determinación cuantitativa de oro y plata.....	29
II.	Dato de la masa del botón de plomo, la copela vacía, copela con PbO y de la escoria.....	50
III.	Dato de la masa del inquant, de la muestra, Doré, y botón de oro.....	50
IV.	Dato de la cantidad de plomo en la aleación de oro y plata en absorción atómica.....	51
V.	Datos típicos para el diseño de bloques al azar.....	52
VI.	Análisis de varianza para el experimento de bloque aleatorio.....	54
VII.	Análisis de varianza para determinar si existe diferencia significativa en la cantidad de plomo en el área de fusión para los días de evaluación.....	66
VIII.	Análisis de varianza para determinar si existe diferencia significativa en la cantidad de plomo en el área de copelación para los días de evaluación.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AA	Absorción Atómica
cm	Centímetro
v/v	Concentración en volumen/volumen
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados centígrados
g	Gramos
ml	Mililitro
mg	Miligramo
mm	Milímetro
min	Minuto
M	Molaridad (mol/L)
No	Número
%	Porcentaje
Ppm	Partes por millón
F	Prueba F de Fisher

GLOSARIO

Aleación	Es una combinación de propiedades metálicas, que está compuesta por dos metales.
Balance de Masa	Se basa en la ley de conservación de la materia, que establece que la masa de un sistema cerrado permanece siempre constante.
Botón de Plomo	Plomo metálico reducido que contiene el metal precioso resultante de la fase de colección de la fusión.
Copela	Recipiente poroso y absorbente hecho de ceniza de hueso y cemento u óxido de magnesio.
Copelación	Una fusión oxidante de una mezcla de plomo, oro y plata en un recipiente absorbente conocido como copela, en la que el plomo metálico se oxida a óxido de plomo (PbO) con la subsecuente absorción del óxido de plomo en la copela soltando la mezcla de metal precioso.
Carga	Es la muestra que contiene el crisol, el fundente y el inquant; la acción de cargar el crisol en el horno o los botones de plomo en las copelas.

Crisoles	Vasos de barro para fuego donde se mezclan y se funden las muestras y el fundente.
Doré	Mezcla o aleación de oro y plata.
Ensayos al Fuego	Rama de análisis químico cuantitativo en el que se determinan metales en minerales y productos metalúrgicos con la ayuda de calor y reactivos secos.
Escoria	Es la fase de la fusión que contiene la mayor parte de los constituyentes del fundente y las impurezas o material ganga de la muestra.
Flujo	Mezcla de reactivos utilizado en ensayos al fuego que disminuyen la temperatura de fusión de la muestra y al neutralizarla.
Fundentes	Una mezcla de reactivos que cuando se mezclan con la muestra y se fusionan, proporciona una separación de materiales; escoria, donde se juntan las impurezas y una fase que junta metales preciosos.
Fusión	Producción a altas temperaturas de plomo fundido para promover la solubilidad de los metales preciosos de los materiales y productos mineros.

Gravimetría	Fase del procedimiento de ensayos de fuego en donde se realiza la separación de la aleación de Oro y Plata.
Inquart	Cantidad de plata fina (pureza 99,99%) para proporcionar un mínimo de tres (3) veces la cantidad de plata a oro en materiales mineros para asegurar una separación completa.
Oxidación	Reacción química muy poderosa donde un elemento cede electrones aumentando su estado de oxidación.
Reducir	Proceso electroquímico por el cual un átomo o ion gana electrones. Implica la disminución de su estado de oxidación.

RESUMEN

Se realizó el monitoreo de plomo en el procedimiento de la determinación analítica de oro y plata por medio de ensayos al fuego, el cual se realizó en el laboratorio metalúrgico de una empresa minera que se encarga del análisis de minerales preciosos como los son oro y plata.

Se tuvo por objetivo la determinación del plomo en todo el proceso, la cantidad de plomo que la copela absorbía en la etapa de copelación, la evaluación de la cantidad de óxido de plomo que está presente en el residuo en el área de fusión y la evaluación de plomo en el Doré en el área de gravimetría.

Para realizar esta evaluación se midió la cantidad de óxido de plomo al inicio y se le agregó la cantidad de flujo (flux) a las muestras de análisis, las cuales se fusionaron a altas temperaturas para poder obtener la cantidad de plomo metálico y el residuo del área de fusión (escoria), se determinó la masa de plomo en esta área por medio de una refusión y la masa del botón de plomo. En el área de copelación en donde se evaluó por medio de la masa de la copela la cantidad de óxido de plomo que absorbe y al final se analizó el Doré para determinar la cantidad de plomo que existía en esa aleación.

Según la evaluación, el área que contiene mayor cantidad de óxido de plomo es el de fusión seguido del área de copelación y se determinó que en la aleación de oro y plata existe una cantidad mínima (insignificante comparada con el valor de las otras áreas) de óxido de plomo. Con los datos obtenidos se realizó el balance de masa el cual demostró que las pérdidas de óxido de plomo están presentes en el área de fusión y en el área de copelación.

OBJETIVOS

General

Determinar el plomo presente en cada etapa del proceso en la determinación analítica de oro y plata.

Específicos

1. Evaluar la cantidad de plomo que se absorbe en la copela al final del proceso de copelación.
2. Evaluar el contenido de plomo que se encuentra en la escoria (vidrio) luego del proceso de fusión.
3. Determinar la cantidad de plomo que existe en la aleación de oro y plata luego del proceso de copelación
4. Realizar un balance general de masa de plomo en todo el proceso para determinar si hay pérdidas.
5. Determinar si hay diferencia significativa en la cantidad de plomo en cada etapa del proceso por medio de análisis estadístico.

HIPÓTESIS

1. En el proceso de la determinación de oro y plata por medio de ensayos al fuego, existen pérdidas mayores del 10 por ciento en la cantidad de plomo.
2. En la escoria (vidrio) residuo de la etapa de fusión hay presencia de plomo.
3. En la aleación de oro y plata luego del proceso de copelación, existe una cantidad de plomo menor al 5 por ciento.
4. La copela absorbe al menos el 90 por ciento de la cantidad de plomo que se oxidó en el proceso de copelación.

INTRODUCCIÓN

El plomo es un elemento que se encuentra en la naturaleza como mineral y en varios productos químicos como reactivo, el cual es un agente sumamente tóxico y dañino para la salud. El plomo se utiliza en muchas actividades de la vida y tiene un valor significativo en la industria, por lo que existen varias empresas que se encargan de extraer y utilizarlo en varios procesos.

En la industria minera el plomo se utiliza en el laboratorio metalúrgico como el reactivo principal, para realizar ensayos de fuego que se utilizan para determinar la cantidad de oro y plata que existe en una cantidad de muestra significativa, para el estudio del área de exploración y explotación de los minerales preciosos que se encuentran en un área determinada.

El plomo es un agente colector que por sus propiedades químicas ayudan al proceso a recolectar los minerales preciosos que se encuentran en la muestra, pero a pesar de su trabajo como agente colector posee un nivel alto de peligrosidad a la salud, cuando se exponen a valores mayores de los límites de exposición permisibles en un tiempo determinado. Por lo que si se trabaja con este reactivo se debe de garantizar que el contenido de plomo en el ambiente y en el lugar de trabajo no sobrepase los límites de exposición permitidos.

Un monitoreo en procesos de análisis en un laboratorio en donde se utilicen químicos tóxicos es recomendable para garantizar un ambiente saludable, por lo que se realizó el monitoreo con varios puntos de control en donde el analista tuviera contacto o donde sea una etapa en la cual se eliminó por completo el reactivo tóxico.

Por lo tanto, se realizó un monitoreo en el área de ensayos al fuego con terminación gravimétrica para el análisis de oro y plata, por lo que se determinó la cantidad de plomo que contiene el flujo de ensayos al fuego (flux) como base inicial para realizar el balance de masa, se tomó como puntos críticos cada área del ensayo, como lo fue fusión, copelación y gravimetría.

Se realizaron los monitoreos por varios días en análisis de oro y plata en terminación gravimétrica para muestras ácidas y ácidas sulfúricas, por lo cual se determinó la cantidad inicial de PbO en cada muestra, en el área de fusión al terminar el proceso de reducción del óxido de plomo a plomo metálico se determinó la cantidad de PbO que la escoria (residuo del proceso de fusión) contenía, y se pesó la cantidad de plomo metálico como parte del balance de masa.

Se determinó en el área de copelación el porcentaje de óxido de plomo que la copela adsorbe al ser oxidado el plomo metálico por el aire para determinar la cantidad de reactivo que se pierde en esta etapa, al final se determinó si en la aleación de oro y plata había una cantidad significativa de reactivo tóxico (plomo) por lo que se analizó el agua de lavado del Doré después de la separación del oro y la plata por medio de absorción atómica por flama.

Con los monitoreos en los puntos críticos se realizó un balance de masa general de todas las áreas, para determinar la existencia de óxido de plomo en los residuos y la cantidad de reactivo que se pierde en las etapas del proceso para poder evitar la contaminación de los analistas en esta área.

1. ANTECEDENTES

Dentro de la ingeniería química y otras ramas afines a esta, se han realizado varios estudios para la evaluación y recuperación del plomo, tanto en el ambiente como para la salud en procesos industriales; a continuación se presentan los más destacados:

En el informe de tesis realizado en el 2003 por Ingrid Verónica Vásquez Fuentes, estudiante de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que tiene por título Determinación de plomo, cadmio y cobre en fuentes de agua en la República de Guatemala por voltamperometría diferencial de disolución aniónica, en el cual se determinó la cantidad de plomo en concentraciones en miligramos por litro o partes por millón (ppm) en las fuentes de agua de la República de Guatemala, el método que se utilizó fue el de voltamperometría por disolución que también se denomina cronoamperometría de redisolución.

Según los resultados obtenidos se confirmó la presencia de metales como plomo y cobre en las fuentes de agua en la República de Guatemala, en la cual la mayor concentración de plomo se encontró en el departamento de San Marcos en una concentración de 7,6 partes por millón (ppm), la cual sobrepasa los límites de permisibles según la agencia de Protección Ambiental.

En el informe de tesis realizado en el 2007 por Elmer Geovanny López Aguilar, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que tiene por título Diagnóstico ambiental debido al proceso de producción de una fábrica de

láminas galvanizadas, en el cual se realizó un diagnóstico ambiental en el proceso de galvanizado en donde se tiene como objetivo determinar las fuentes de contaminación y los impactos que provoca en el medio ambiente, para implementar medidas de mitigación que minimicen el deterioro del ambiente, utilizaron el plomo en el flux que se utiliza en el proceso de galvanización, por lo que se realizó un monitoreo del plomo en los residuos que se obtienen en esta etapa de producción.

Se realizó un monitoreo en la escoria que es el vidrio del residuo en donde se determinó la cantidad de plomo por métodos fisicoquímicos que fue de 0,076 por ciento en la escoria y en el agua residual de esa área el valor de plomo que se detecto fue menor a 0,10 miligramos por litro por lo que es menor a los límites permisibles del plomo.

En el informe de tesis de posgrado realizado en el 2008 por la licenciada química bióloga Norma Edith Gil Rodas De Castillo, de la Maestría en Ciencias y Tecnología del Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que tiene por título Interpretación quimiométrica de la BV calidad de agua de los ríos que conforman la microcuenca del río Villalobos, principal tributario del lago de Amatitlán, durante 1996 a 2006, en el cual se realizó un estudio del nivel que posee los ríos respecto a propiedades físicas como el DQO, DBO, turbidez, análisis bacteriológico, fósforo y nitrógeno total, dureza, sólidos totales y metales pesados como plomo, cromo (IV), cadmio, cobre, silicio y cianuro.

La cantidad de plomo se determinó por medio de una solución alcalina la cual reacciona con 4-(2-piridilazo) resorcina (PAR), el cual formará un complejo rojo que se determinará espectrofotométricamente a una longitud de onda de 515 nanómetros. Se determinó el valor de plomo que contiene el río de

Villalobos es en promedio de 1,056 miligramos por litro por lo que no sobrepasa los límites permisibles de sustancias tóxicas en aguas residuales.

Carlos Tetzaguic Car, (2003), realizó una sistematización de la información de la calidad del agua del lago de Amatitlán, con parámetros que determinan su contaminación, en la cual demuestra que la contaminación del lago, se ha incrementado durante las últimas décadas, por lo que en la actualidad es el cuerpo de agua de Guatemala, que presenta la mayor contaminación física, química y biológica, debido a las descargas de agua servidas domésticas e industriales, que sin ningún tratamiento son transportadas por corrientes de agua (ríos y riachuelos) los cuales finalmente vierten estas aguas al río Villalobos y éste transporta directamente al lago de Amatitlán.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Metalurgia

La metalurgia es la ciencia que desde las antigüedades ha sobresalido grandemente tanto en la obtención, procesamiento y la purificación de metales, hoy en día es una de las ciencias más utilizada para la obtención de metales preciosos.

2.1.1. Historia de la metalurgia

Alrededor del 3 500 antes de Cristo, ya existía la metalurgia del hierro esponjoso; el hierro colado no se descubrió hasta en 1 600 a. C. Algunas técnicas usadas en la antigüedad fueron el moldeo a la cera perdida, la soldadura o el templado del acero. Las primeras fundiciones conocidas empezaron en China en el siglo I a. C., pero no llegaron a Europa hasta el siglo XIII, cuando aparecieron los primeros altos hornos.

El empleo de los metales, característico de la Edad de los Metales, se debe a que el hombre, motivado por sus nuevas actividades, necesitó sustituir las herramientas de piedra, hueso y madera por otros muchos más resistentes al calor y al frío.

En Mesoamérica era muy común la extracción de los metales, sobre todo por su representación de los dioses que poseían, los más comunes eran el oro, la plata, el cobre y el estaño. Al trabajar y adornarse con ellos se honraban a los dioses y se adquiría el poder para representarlos.

2.1.2. Metalurgia

La metalurgia es la ciencia que trata de la extracción de los metales a partir de sus minerales para hacer aleaciones y objetos metálicos. Ciencia aplicada cuyo objeto es el estudio de las operaciones industriales tendientes a la preparación, tratamiento (físico y/o químico) y producción de metales y sus aleaciones.

En términos generales, la técnica metalúrgica comprende las siguientes fases: obtención del metal a partir de uno de sus minerales (mena) afino o purificación del metal, preparación de aleaciones, tratamientos mecánicos, térmicos o termoquímicos para su mejor utilización

2.2. Plomo

El plomo es metal maleable que desde la antigüedad lo utilizaron en diferentes procesos, hoy en día es un reactivo que tiene varios usos en diferentes procesos de la vida diaria.

2.2.1. Historia del plomo

Los primeros en conocer el plomo fueron los egipcios, que lo obtuvieron simultáneamente con el hierro y la plata. Dos milenios antes de Cristo, en la China y la India ya sabían fundir plomo, el metal se empezó a utilizar cuatro siglos antes de Cristo. El conocimiento del plomo es de fecha muy remota, puesto que existía ya entre los egipcios, indios y hebreos, es decir, en los pueblos de historia más antigua. Los indios utilizaban el plomo sisa, para amuletos y en forma de pesos para mantener en tensión los hilos al tejer, para purificar plata y para preparar el minio empleado como afeite.

El método de copelación (3 000-2 500 a.C.) no solo permitía la extracción de plata de gran pureza, sino que gracias a ella se difundió el uso de plomo, la copelación constituye uno de los primeros ejemplos de los procesos metalúrgicos en el que la producción de plata, producto primario, presenta un desecho utilizable a manera de subproducto, de esta manera la difusión del plomo se debió a la explotación de plata, pero el plomo como tenía fácil manejo y alta resistencia a la corrosión, contribuyó a su utilización.

2.2.2. Características del plomo

Elemento químico, Pb, número atómico 82 y peso atómico 207,19. El plomo es un metal pesado (densidad relativa o gravedad específica, de 11,4 a 16 grados centígrados (61°F)) de color azulado, que se empaña adquiriendo un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad, a 327,4 grados centígrados (621,3°F) y hierve a 1 725 grados centígrados (3 164°F). Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico.

El plomo se obtiene de las minas de galena y de los sulfuros de plomo y se separa calentando el mineral a bajas temperaturas. También se encuentra plomo en varios minerales de uranio y de torio, ya que proviene directamente de la desintegración radiactiva (decaimiento radiactivo). Los minerales comerciales pueden contener solo un 3 por ciento de plomo, pero lo más común es un contenido de poco más o menos el 10 por ciento.

2.2.3. Propiedades físicas y químicas del plomo

El plomo es un metal que se encuentra en la tierra y se considera uno de los metales tóxicos, a continuación se mencionan las propiedades físicas y químicas del plomo.

2.2.3.1. Propiedades físicas

El plomo es un metal color gris azulado, brillante en las superficies recientes, muy blando tan blando que se raya con la uña, muy maleable y es el menos tenaz de todos de los metales. Posee gran densidad y punto de fusión bajo. Sus principales parámetros físicos son:

- Densidad: 11,85 g/cc
- Número atómico: 82
- Símbolo: Pb
- Peso atómico: 207,21
- Solubilidad: poco soluble en agua
- Sistema cristalino: regular
- Estado físico: sólido
- Punto de fusión: 888°C
- Estados de oxidación: +2 y +3

2.2.3.2. Propiedades químicas

El plomo según sus propiedades químicas, puede reaccionar cuando está en contacto con el agua, cuando esta fundido se oxida, cuando se mezcla con ácido sulfúrico concentrado, ácido nítrico y ácido clorhídrico concentrado.

- El plomo en contacto con el aire se oxida superficialmente, recubriéndose de una capa de color gris de sub óxido de plomo (Pb_2O), que le quita el brillo metálico, pero que a su vez lo protege de ulterior oxidación.
- Cuando está recién fundido se oxida rápidamente formando el producto PbO que se conoce como litargirio.
- El agua químicamente pura casi no lo ataca, pero como está siempre contiene anhídrido carbónico y oxígeno libre, hay siempre un ataque cuando se halla en contacto. Este proceso es continuo.
- El ácido sulfúrico diluido no lo ataca, en cambio concentrado y caliente genera sulfuros de plomo II.
- El ácido clorhídrico diluido en frío tampoco reacciona, pero concentrado ataca el plomo.
- El ácido nítrico en frío lo disuelve dando nitrato de plomo II y vapores nitrosos muy tóxicos.



- Si el plomo se calienta en presencia del aire el plomo se convierte en litargirio.



2.2.4. Distribución y usos del plomo

Los minerales de plomo se encuentran en muchos lugares del mundo. El mineral más rico es la galena (sulfuro de plomo) y constituye la fuente principal de producción comercial de este metal. En muchos casos, los minerales de plomo pueden contener otros metales tóxicos.

Los minerales de plomo se separan de la ganga y de otros elementos del mineral mediante el triturado en seco, la molturación en húmedo (para obtener una pasta), la clasificación gravimétrica y la flotación. Los minerales de plomo liberados se funden mediante un proceso en tres etapas: preparación de la carga (mezcla, condicionamiento, etc.), sinterizado y reducción en hornos altos.

2.2.5. Evaluación del plomo

En todo el mundo se está revisando permanentemente la legislación para asegurarse de que tanto el hombre como el ambiente están adecuadamente protegidos de las propiedades peligrosas del plomo. A finales de los 90 se hizo claro que, a pesar de la inmensa cantidad de información disponible sobre el plomo, todavía se carecía de datos en algunas áreas.

El plomo metálico y sus compuestos, tanto inorgánicos como orgánicos, constituyen hoy, probablemente, el factor químico de riesgo para la salud de los trabajadores más conocido desde la antigüedad. A la vez, es el factor (sólo compitiendo con el ruido) más tratado en la literatura especializada desde tiempos inmemoriales. Esto se debe fundamentalmente no sólo a su toxicidad intrínseca, sino también a su amplio espectro y variedad de aplicaciones en la vida humana, sobre todo en los procesos industriales.

Es extenso, además, el conocimiento que se tiene sobre sus efectos tóxicos por exposición ambiental (en especial la ocupacional), tanto a corto como a mediano y largo plazos. Todo ello se refleja en la actualidad en que la inmensa mayoría de los sistemas y programas de vigilancia higiénica ambiental y de salud de los trabajadores en el mundo incluya al plomo como uno de los factores principales de riesgo ocupacional a identificar, evaluar, controlar y prevenir en los puestos de trabajo.

2.2.6. Balance de masa

El balance de materia es un método matemático utilizado principalmente en ingeniería química. Se basa en la ley de conservación de la materia, que establece que la masa de un sistema cerrado permanece siempre constante (excluyendo, por supuesto, las reacciones nucleares o atómicas y la materia cuya velocidad se aproxima a la velocidad de la luz). La masa que entra en un sistema debe, por lo tanto, salir del sistema o acumularse dentro de él, es decir:

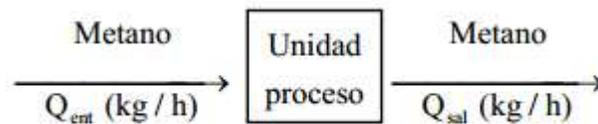
$$\text{entradas} = \text{salidas} + \text{acumulación}$$

Los balances de materia se desarrollan comúnmente para la masa total que cruza los límites de un sistema. También pueden enfocarse a un elemento o compuesto químico. Cuando se escriben balances de materia para compuestos específicos en lugar de para la masa total del sistema, se introduce un término de producción:

$$\text{entradas} + \text{producción} = \text{salidas} + \text{acumulación}$$

El término de producción puede utilizarse para describir velocidades de reacción. Los términos de producción y acumulación pueden ser tanto positivos como negativos. A continuación se presenta la ecuación general de balance:

Dado el siguiente proceso:



Si $Q_e \neq Q_s \Rightarrow$

- Consume o genera metano
- Acumula metano en la unidad
- Hay errores de medición

Empleando el principio de conservación de la masa, un balance de masa se expresa como:

$$\text{Entrada} + \text{generación} - \text{salida} - \text{consumo} = \text{acumulación}$$

La ecuación de balance se formula para cualquier material que entra o sale en cualquier sistema de proceso. Pueden formularse dos tipos de balance:

- Diferenciales: indican lo que sucede en un instante. Cada término es una velocidad.
- Integrales: describen lo que ocurre entre dos instantes. Cada término es una cantidad de la sustancia medida.

Los términos de generación y consumo = 0 si el balance es global.

2.2.7. Determinación cuantitativa por medio de absorción atómica (AA)

La espectroscopia de emisión y absorción atómica se usa casi exclusivamente para el análisis de átomos. Por consiguiente, la técnica resulta casi insuperable como método de análisis elemental de metales. En principio, la espectrofotometría de emisión puede utilizarse para la identificación y para la determinación cuantitativa de todos los elementos de la tabla periódica.

La espectrofotometría de absorción atómica (a menudo llamada AA) es un método que utiliza comúnmente un nebulizador prequemador (o cámara de nebulización) para crear una niebla de la muestra y un quemador con forma de ranura que da una llama con una longitud de trayecto más larga. La temperatura de la llama es lo bastante baja para que la llama de por sí no excite los átomos de la muestra de su estado fundamental. El nebulizador y la llama se usan para desolvatar y atomizar la muestra, pero la excitación de los átomos del analito es hecha por el uso de lámparas que brillan a través de la llama a diversas longitudes de onda para cada tipo de analito.

En la AA, la cantidad de luz absorbida después de pasar a través de la llama determina la cantidad de analito en la muestra. Una mufla de grafito para calentar la muestra a fin de desolvatarla y atomizarla se utiliza comúnmente hoy día para aumentar la sensibilidad.

Un átomo absorbe luz de longitudes de onda muy discretas. Para poder medir esta absorción de bandas tan angostas con la máxima sensibilidad, es necesario usar una fuente que emita longitudes de onda muy específicas que puedan ser absorbidas por el átomo.

La sensibilidad de la absorción atómica depende del número de átomos que se encuentran en el estado fundamental. Normalmente, tan sólo un pequeño porcentaje de átomos se encuentran en estado excitado en la llama. Por lo tanto, la absorción atómica da lugar, en general, a una mayor sensibilidad presentando menos interferencias y es más simple lo que explica el espectacular desarrollo de la técnica en los últimos años donde se han desarrollado a gran velocidad los espectrofotómetros de absorción atómica y en el mercado existen desde los instrumentos muy sencillos de haz simple hasta diseños complejos automatizados. La mayoría de los instrumentos se diseñan de modo que puedan utilizarse en fotometría de llama.

2.2.8. Efectos sobre la salud humana

El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%). La exposición a plomo tiene como origen, entre otros, las pilas y baterías, el cemento Portland, la masilla, polvo de algunas industrias, tuberías de plomo o las soldaduras de estas, equipamiento para las granjas, elementos de joyerías y cosméticos.

Las comidas como fruta, vegetales, carnes, mariscos, refrescos y vino pueden contener cantidades significantes de plomo, así como el humo de los cigarros. Actualmente ya no se utilizan tuberías de plomo ya que la corrosión de éstas provoca que el plomo entre en el agua potable. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida, por eso en los sistemas de tratamiento de aguas públicas se requería llevar a cabo un ajuste de pH en el agua que serviría como agua potable.

El plomo no cumple ninguna función esencial en el cuerpo humano. Puede causar, entre otros, estos daños y perturbaciones:

- Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia
- Incremento de la presión sanguínea
- Daño a los riñones
- Abortos
- Perturbación del sistema nervioso
- Daño al cerebro
- Disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma
- Disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños
- Perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad.

2.2.9. Efecto del plomo al ambiente

Las partículas de plomo se emiten al aire a partir de las distintas fuentes y se depositan en el polvo, el suelo, el agua y los alimentos. El plomo se libera al aire desde los volcanes activos y por actividades humanas como el humo del cigarrillo, de modo que las personas que fuman tabaco o que respiran el humo del tabaco podrían estar expuestas a más plomo que aquellas personas no expuestas al humo del cigarrillo.

Los alimentos y las bebidas pueden contener plomo, si el polvo que contiene plomo llega a las cosechas durante su crecimiento, sobre todo cuando se utilizan fertilizantes que contienen fangos. Las plantas pueden recoger el plomo del suelo, como el que podría encontrarse en un sitio de desechos peligrosos o cerca de áreas con un elevado tránsito automotriz.

La combustión de gasolina, que contiene tetra etilo de plomo como antidetonante, ha incorporado plomo a la atmósfera; aunque en la actualidad proviene menos de la gasolina ya que se han tomado medidas enérgicas para reducir la cantidad de plomo que puede usarse en la gasolina.

Otras fuentes de liberación al aire pueden incluir emisiones de la producción de hierro y acero, operaciones de fundición. Las fuentes principales del plomo liberadas al agua son las tuberías y accesorios de plomo, y la soldadura en las casas, escuelas y edificios públicos, el polvo y suelo que contienen plomo transportados al agua por las lluvias y los vientos, y el agua residual de las industrias que utilizan el plomo.

2.3. Determinación analítica de oro y plata

La determinación analítica de oro y plata es un proceso cuantitativo que utiliza la fuente de calor para poder obtener metales preciosos de una muestra de exploración y/o explotación de suelos.

2.3.1. Oro

Su símbolo químico es Au (del latín Aurum) y junto con la plata y el platino pertenece al grupo de los metales nobles (no confundir con los gases nobles), es decir, resistentes a la acción del agua y del oxígeno del aire, así como a la de gran número de compuestos químicos.

2.3.1.1. Características físicas y químicas del oro

Su número atómico es 79; su masa atómica es 179,2 y su peso específico 19,32 gramos por centímetro cúbico. Es en extremo maleable (se puede confeccionar láminas de pan de oro de un grosor de una diezmilésima de mm) y muy dúctil, por lo que a menudo es aleado con otros metales (cobre, níquel, plata) para incrementar su dureza; la aleación de 50 por ciento de plata y otro tanto de oro da lugar al denominado oro blanco. La ley (cantidad de oro) de las aleaciones se expresa en quilates; 24 quilates indican un 100 por ciento de oro; 18 quilates, un 75 por ciento, y así sucesivamente.

Es inalterable frente a los agentes atmosféricos y solo es atacable por muy pocos agentes químicos, como el cloro, el bromo, el agua regia (mezcla de tres partes de HCl y una de HNO₃, que en frío disuelve el oro y, en caliente, el platino), el mercurio y el cianuro de sodio en presencia de oxígeno.

Se halla en la naturaleza en una proporción bajísima, el 0,0000005 por ciento en peso. Es un metal de color amarillo característico, que es blando (por ello suele emplearse aleado con el cobre o con la plata), muy dúctil y maleable, pues puede reducirse a láminas de hasta una diezmilésima de milímetro de espesor (pan de oro).

El oro se presenta en la naturaleza bajo formas diversas: en filones de rocas auríferas, asociado a otros metales (por ejemplo el cobre) y en forma de polvo o de gránulos redondeados o achatados conocidos como pepitas; en depósitos de arena y lechos fluviales (placeres auríferos).

2.3.2. Plata

La plata es un metal maleable y dúctil, algo más duro que el oro y que presenta un brillo blanco metálico. Se encuentra en la naturaleza formando parte de distintos minerales o como plata libre.

Tiene una de las más altas conductividades eléctricas de todos los metales pero su mayor precio ha impedido que se utilice de forma masiva en aplicaciones eléctricas. La plata pura también presenta la mayor conductividad térmica, el color más blanco y el mayor índice de inflexión de todos los metales.

2.3.2.1. Características físicas y químicas de la plata

Elemento químico de número atómico 47 y símbolo Ag (de su denominación latina *argentum*). Es un metal precioso de color metálico claro que en condiciones normales es sólido. Es uno de los mejores conductores del calor y de la electricidad.

Se encuentra raramente en la naturaleza, lo que le hace ser un metal caro. Es muy dúctil y maleable por lo que es especialmente apreciado en joyería.

- Propiedades físicas
 - Estado: sólido
 - Estructura cristalina: cúbica centrada en las caras
 - Color: plateado
 - Densidad: 10 490 (kg/m³)
 - Conductividad eléctrica: 63×10^6 S/m
 - Conductividad térmica: 429 W/(m•K)

- Calor específico: 232 J/kg•K
- Punto de fusión: 1 234,93 K
- Entalpía de fusión: 11,3 kJ/mol
- Punto de ebullición: 2435 K
- Entalpía de vaporización: 250,58 kJ/mol
- Presión de vapor: 0,34 Pa a 1234 K

2.3.3. Ensayos al fuego (método de vía seca)

El principio fundamental es el de coleccionar el Au y Ag por plomo en estado líquido a temperatura entre 900 – 1 000 grados centígrados. Ensayos al fuego es la determinación cuantitativa en la que se separan un metal o no metales a partir de las impurezas por procesos de fusión y se pesa para determinar la cantidad presente en la muestra original.

Los metales recuperados en el ensayo al fuego son los metales que surgen de la fusión del material en un horno de ensayo, para el oro, por lo general a temperaturas de unos 2 000 grados Fahrenheit.

El método de ensayo de fuego tiene siglos de antigüedad, pero sigue siendo uno de los más confiables métodos para la realización de ensayos (para determinar el contenido de metal de un mineral) de los minerales que contienen preciosos (noble) oro, plata y platino.

El mineral de la mina, o un programa de muestreo de exploración están científicamente probados usando un método estadístico precisa ajuste de la precisión deseada, que se prepara por trituración, separación y pulverización. Este es un proceso conocido como preparación de la muestra.

Dado que la muestra original puede ser cien libras o más, un método científico de obtener una muestra representativa para el ensayo de 30 gramos por lo general se utiliza, y que incluye reducir el mineral a un tamaño de partícula predeterminado y luego dividiendo el mineral usando un método estadísticamente precisa, para obtener la muestra representativa de 30 gramos para el ensayo de incendio.

El proceso de ensayos al fuego consta de las siguientes etapas:

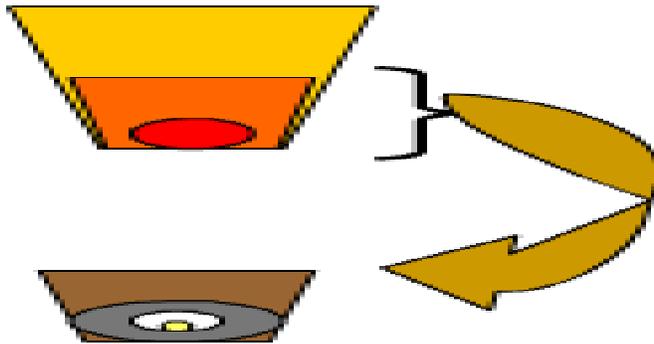
2.3.3.1. Etapa de fundición

Es una operación que permite lograr la fusión de los metales. Se realiza muy comúnmente en la preparación de las aleaciones preciosas, en las soldaduras y en las recuperaciones, las que se pueden realizar muy artesanalmente o con instrumentos y equipos especiales dependiendo del tipo de compresora y su volumen de producción.

Consiste en introducir los crisoles que contienen el mineral y el fundente a oxidación y/o reducción, para obtener un botón de plomo en donde se encuentra el oro y la plata aleados con el plomo.

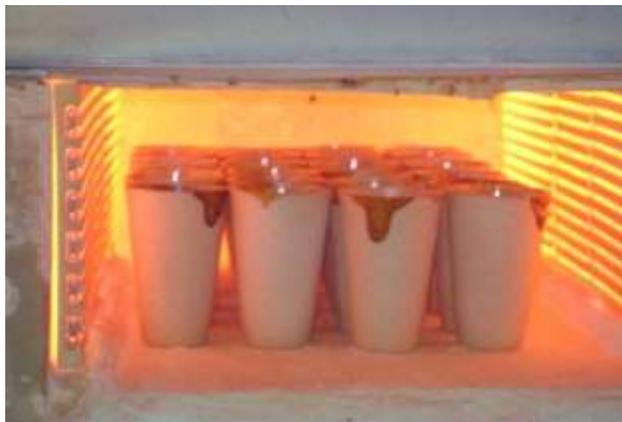
Esta fusión se realiza por una hora a 1 000 grados centígrados + 10 grados centígrados, en la mufla. Dependiendo de la matriz del mineral se utilizarán reductores y oxidantes que se adicionarán al crisol antes de entrar a fusión y se homogeneizará perfectamente con el mezclador.

Figura 1. **Diagrama de la etapa de fusión ala de copelación**



Fuente: <http://www.slideshare.net/jekada/determinacin-analtica-del-oro>, Consulta: 5 de septiembre de 2013.

Figura 2. **Esquema del horno con los crisoles en el proceso de fusión**



Fuente: laboratorio minero Guatemala.

2.3.3.2. Fundentes

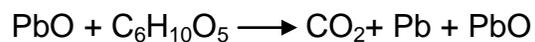
Sustancia que facilita la fundición; se mezcla con otra para facilitar la fusión de esta. Sustancia que se emplea para eliminar óxidos y otras sustancias no deseadas, o impedir su formación. Entre los fundentes utilizados en los ensayos al fuego tenemos los siguientes:

- Litargirio (PbO): actúa como flujo básico y como un oxidante y desulfurante. Se funde a 888 grados centígrados. Su característica es básica, tiene como función coleccionar los metales preciosos (Au, Ag), se utiliza también como neutralizador del azufre, se añade a las muestras ácidas para neutralizar la fusión. La desventaja que se tiene es que el exceso puede causar más plata en la escoria (vidrio), puede causar destrucción rápida en el crisol.
- Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$): el borato de sodio usado está en forma anhidra ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). El bórax se funde a 743 grados centígrados, lo cual disminuye el punto de fusión para toda la carga. Cuando se funde es muy viscoso, pero en calor se convierte en un ácido fluido fuerte el cual disuelve y capta prácticamente todos los óxidos metálicos (tanto ácidos como básicos). Las grandes cantidades de bórax pueden ser perjudiciales causando una escoria dura y poco homogénea. Además un exceso de bórax puede dificultar la separación de fases debido a la reducción del coeficiente de expansión de la escoria y su acción de impedir cristalización.

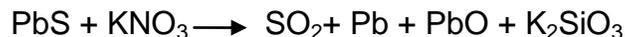
- Carbonato de sodio (Na_2CO_3): el carbonato de sodio (Na_2CO_3), es un fundente básico poderoso que funde a 852 grados centígrados. En presencia de sílice, el carbonato de sodio forma silicato de sodio con el desprendimiento de dióxido de carbono.

Estos silicatos reaccionan con una variedad de óxidos básicos para formar silicatos complejos. Además, debido a la facilidad natural para formar sulfatos alcalinos, también actúa como desulfurizante y un agente oxidante. El uso de Na_2CO_3 proporciona transparencia a la escoria pero en cantidades excesivas origina escorias pegajosas e higroscópicas que son difíciles de remover del Doré. Es una base fuerte y va a la grasa como tal a 950 grados centígrados, éste se transforma en óxido de sodio y gas, el bióxido de carbono se escapa a la atmósfera y causa ebullición. Si se usa en grandes cantidades, el carbonato de sodio despiden humos; cuando se utiliza una cantidad muy grande de carbonato de sodio, una parte se puede quedar en la grasa formando silicatos de plomo. La sílice o bórax forman una excelente grasa teniendo poca afinidad por el oro y la plata.

- Harina o azúcar ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$): tienen un poder reductor de aproximadamente 12 gramos (harina), 14 gramos (azúcar) de plomo metálico por cada gramo de reductor agregada, cuando reacciona con el litargirio.



- Nitrato de potasio (KNO_3): es un reactivo que tiene un poder oxidante de aproximadamente 4 gramos de plomo metálico que puede ser oxidado a litargirio por cada gramo de nitrato agregado.



- Dióxido de silicio (SiO_2): funde a 1 750 grados centígrados y es el fundente ácido más fuerte y disponible que se tiene. Se combina con óxidos metálicos para formar cadenas de silicato estables. Las escorias con alto contenido de sílice son extremadamente viscosas y retienen excesivamente metálicos en suspensión.

Cuando la sílice se mezcla con bórax, se forman cadenas boro-silicatos. El ratio en peso de bórax a sílice en presencia de cantidades considerables de zinc, generalmente no debe ser menor de 2:1. Estas escorias no solo tendrán una alta solubilidad para óxidos metálicos base, sino que ofrecen buena fluidez al fundido.

- Fluoruro de calcio: conocido como *Fluorspar* (CaF_2), tiene un punto de fusión de 1 380 grados centígrados. Cuando se funde es muy fluido y es capaz de mantener en suspensión partículas sin fundir, sin afectar la fluidez de la escoria. Reduce la viscosidad porque es un eficiente rompedor de cadenas silicatos. Aún en pocas cantidades, el fluoruro de calcio tiende a atacar el crisol y puede causar pérdida del bórax por volatilización del BF_3 .

2.3.3.3. Etapa de copelación

Esta operación se basa en las propiedades que tienen los metales preciosos de ser inoxidables a una alta temperatura. Consiste en separar oro y plata metálicos del plomo. En este método, el plomo empieza a oxidarse y al mismo tiempo se absorbe en la copela a medida que transcurre el tiempo mientras la temperatura se mantiene constante.

La oxidación y absorción del plomo ocurren hasta el punto en el cual el oro y la plata forman un botón libre de plomo, en este momento pasa del estado líquido al estado metálico, hay un estado especial en el que se produce un relámpago, el cual si la temperatura es muy alta y la cantidad de plata muy grande, habrá pérdidas por proyección, terminando este paso de la copelación.

La copelación es quizás el punto más importante de los ensayos al fuego y tiene por objetivo la oxidación del plomo y de las otras impurezas metálicas existentes, que mezcladas con mayor cantidad de PbO, si la temperatura es apropiada es absorbido por la copela (98,5%) y parte se volatiliza (1,5%). Queda como residuo un botoncito brillante, formado por metales no oxidables, como son el oro, la plata y el platino.

- Las pérdidas por copelación: se deben a pérdidas por volatilización, cuando se trabaja con temperaturas demasiado elevadas; al arrastre de partículas por las sustancias volátiles y a las pérdidas por absorción y retención en las escorias formadas, debido a las impurezas metálicas que contiene el botón de plomo.
- Doré: el Doré es una aleación de oro y plata. El objetivo del proceso de fundición o fusión de precipitados de oro y plata es obtener metal Doré en presencia de fundentes formadores de escoria a temperaturas que excedan el punto de fusión de todos los componentes de la carga típicamente entre 1 200 y 1 300 grados centígrados. El tiempo que se demora en fundir completamente la carga no solo depende de la localización de la escoria que se forma sino también de la composición química de la aleación oro-plata. El punto de fusión del oro es de 1 064 grados centígrados, mientras que la plata funde a 962 grados centígrados.

2.3.3.4. Etapa de separación

El proceso de separación se realiza luego de obtener el Doré (aleación de plata y oro) en la cual el objetivo principal es la digestión de la plata u otros metales en la aleación para poder obtener la cantidad de oro que se encuentra en la muestra.

Antes de realizar el proceso de separación de la aleación de oro y plata se debe de agrandar su área de transferencia la cual se realiza con un yunque y un martillo en la cual se aplasta o lámina el fin de este procedimiento es tener una mayor transferencia de contacto del ácido con la plata para que la digestión se realice más rápido.

El ataque o digestión que se realiza es con ácido nítrico (HNO₃) diluido (1:5) en un crisol de porcelana, la cual se calienta sin llegar a ebullición, hasta disolver la plata. La reacción que ocurre es la siguiente:



Cuando haya terminado el desprendimiento de burbujas se procede a lavar el botón de plomo con agua para eliminar la cantidad de nitrato de plata y otros compuestos que se formaron en la reacción de digestión por lo que se realiza un procedimiento de lavado con agua destilada, la cual se repiten 4 veces para asegurar que no quede residuos en el botón de oro.

2.3.3.5. Proceso de pesaje

El proceso de pesaje es la etapa final y la más importante ya que es la que demuestra que tan bueno fue realizado todo el proceso de ensayos al fuego, la cual se realiza en una microbalanza la cual tiene una precisión y exactitud muy alta para poder determinar la cantidad de masa de oro que tiene la muestra analizada.

La dificultad de esta etapa es que el botón que se obtiene en algunos análisis es muy pequeño y es muy difícil ser visible, por lo que se debe de utilizar una mayor cantidad de luz y una lupa para poder aumentar la visión del botón de plomo.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico organiza el proceso de la evaluación de plomo en el análisis cuantitativo de la determinación analítica de oro y plata. El diseño metodológico presenta los métodos realizados para alcanzar los objetivos o el procedimiento para ordenar la actividad.

3.1. Definición de operación de las variables

Para el estudio del plomo presente en el proceso de la determinación analítica de oro y plata se conocerán los factores que influyen directamente en las propiedades del producto final.

Tabla I. **Definición de las variables para la evaluación de plomo presente en la determinación cuantitativa de oro y plata**

No.	Variable	Independiente	Dependiente	Controlable	No Controlable	Respuesta
1	Temperatura del horno de fusión	X		X		
2	Temperatura del horno de copelación	X		X		
3	Masa de Pb		X	X		X
4	Tiempo	X		X		

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio determinado se basa en el estudio de varias partes, primero el campo en donde abarca el estudio y segundo en el área específica en donde el estudio se concentra:

- El campo: el estudio de la metalurgia
- El área: análisis cuantitativos de extracción de metales preciosos.

3.3. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos que se tenían disponibles, fueron fundamentales en la elaboración de la fase experimental en el laboratorio metalúrgico de la evaluación del plomo en cada etapa de la determinación analítica de oro y plata.

- Investigador: Marvin Eduardo Mérida Cano
- Asesor: Ing. Víctor Manuel Monzón
- Colaboradores: Richard A. Grondin, Roberto Pineda, Israel Pérez

3.4. Recursos materiales disponibles y equipo

Para la evaluación de plomo en cada etapa del proceso de la determinación de oro y plata se dispondrá de todo el material y equipo metalúrgico para la extracción que es utilizado por el laboratorio metalúrgico, la cual estará a la disposición del investigador para que se utilice de la mejor manera para poder realizar dicha evaluación.

3.4.1. Materia prima y reactivos

La materia prima y los reactivos químicos (fundentes) que se utilizaron para la evaluación de plomo en el proceso de la determinación analítica de oro y plata para los diferentes días de análisis.

- Estándares de calidad para oro con terminación gravimétrico
- Muestras blancas para control y aseguramiento de calidad
- Muestras de tierra de diferentes lotes
- Flujo para ensayos de fuego (flux)
- Carbonato de sodio (soda ash)
- Barato de sodio (bórax)
- Óxido de silicio (sílice)
- Fluoruro de calcio
- Plata sólida
- Ácido nítrico
- Cobre metálico
- Estándares de calibración para absorción atómica
- Agua destilada
- Ácido clorhídrico

3.4.2. Equipo de laboratorio a utilizar

El equipo del laboratorio que se utilizó para realizar el proceso de la determinación de oro y plata, como también para la evaluación del plomo presente en cada etapa del proceso se muestra a continuación:

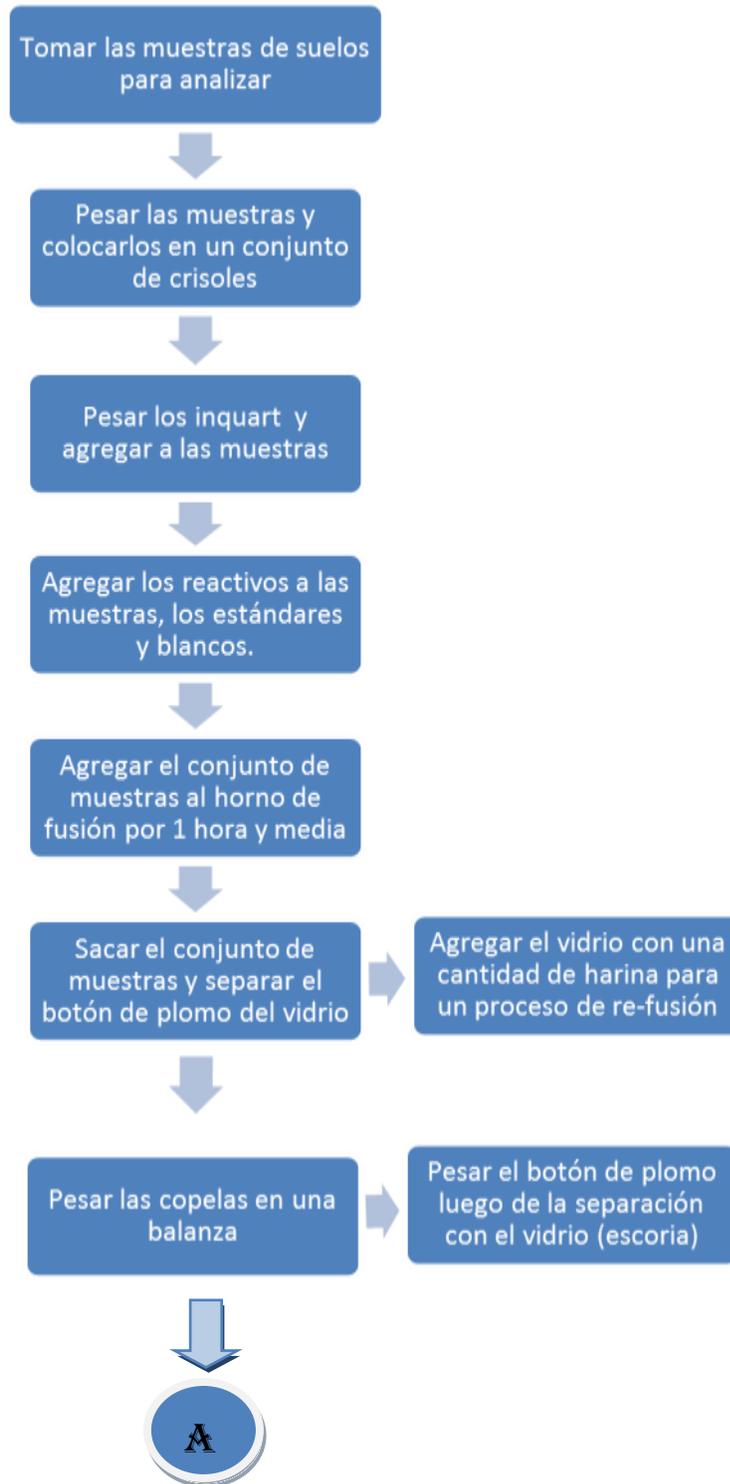
- Balanza Mettler
- Microbalanza Mettler Toledo XP6
- Bandejas para pesar la muestra
- Espátulas
- Hornos tipo muflas
- Crisoles de 40 gramos para la fusión
- Pinza para agregar los crisoles al horno
- Pinzas para cargar
- Pinzas para verter
- Moldes de hierro fundido
- Moldes de madera
- Martillo
- Yunque de metal y martillo (para escoria y plomo)
- Copelas de óxido de magnesio
- Tenedor de copela
- Tenazas de punta doblada
- Cepillo de cerdas duras (para cabezas)
- Crisoles de cerámica para separar de 15 mililitros y bandeja
- Pinzas pequeñas
- Soplete de propano
- Equipo de absorción atómica
- Tubos de centrífuga
- Tubos de ensayos aforados
- Micropipetas
- Plancha de calentamiento

3.5. Técnica cuantitativa

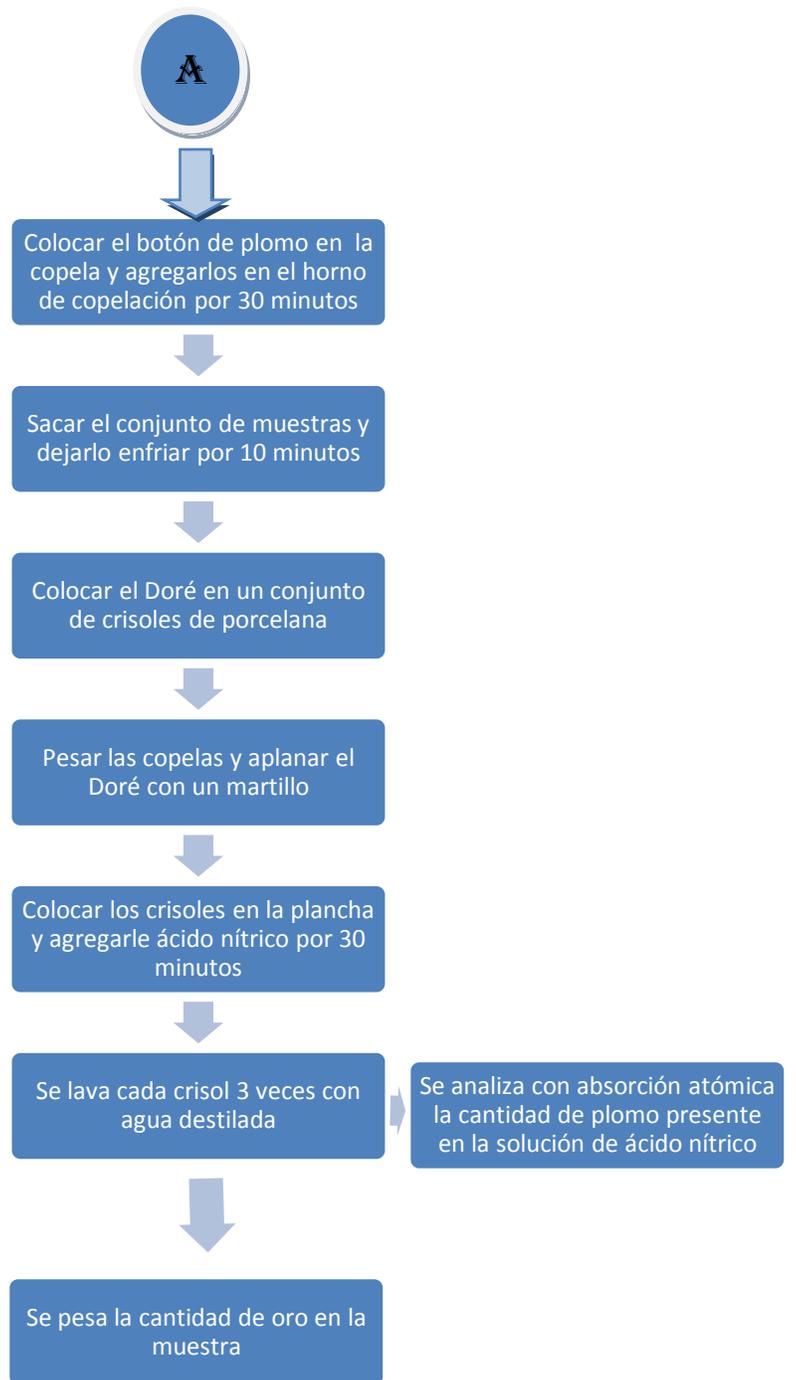
El proceso de la evaluación de Plomo presente en cada etapa de la determinación analítica de oro y plata es posible mediante la evaluación de la masa de reactivo presente en cada etapa del proceso como lo es en fusión, copelación, gravimetría. La técnica analítica que se emplea es la de fundición de los reactivos para obtener el metal precioso, la oxidación del plomo para separarlo de los metales preciosos y la digestión de la plata para obtener el oro metálico.

La metodología experimental de evaluación del proceso se realizó en el laboratorio metalúrgico de la empresa KCA (Kappes, Cassiday & Associates) en Reno, Nevada, U.S.

Figura 3. Diagrama del diseño experimental



Continuación de la figura 3.



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Todo laboratorio metalúrgico realizó un sin número de pruebas para determinar la cantidad de minerales en muestras de suelos u otras, por lo que en estos análisis se utilizó reactivos los cuales poseen propiedades tóxicas para la salud, por lo que se deben de realizar monitoreas constantes en cada procedimiento para poder tener un mayor control de los productos y subproductos de cada análisis.

Para la determinación analítica de oro y plata que se realizó con ensayos al fuego, se utilizó el plomo como reactivo colector de metales preciosos como el oro y la plata en especial, el cual este reactivo es tóxico para la salud y puede causar daños severos a la exposición prolongada a este químico.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

El ordenamiento de datos como el procesamiento de la información realizada se basó en formas estadísticas la cual se partió desde la obtención de reactivos, las muestras y los diferentes datos en cada área de evaluación.

3.7.1. Metodología experimental para la determinación de la cantidad de óxido de plomo en el reactivo de ensayos de fuego (flux)

Con el objetivo de poseer una cantidad base inicial en cada muestra, con el cual se pudo realizar el balance de masa de todo el proceso. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- La cantidad de flux (reactivo para ensayos al fuego) se pesó decada cucharon que se agregó a las muestras en gramos.
- Según el porcentaje de óxido de plomo que poseía el flux, se determinó la cantidad de gramos de óxido de plomo en cada muestra.

3.7.2. Metodología experimental para la determinación del botón de plomo en la etapa de fusión

El tamaño del botón de plomo, se determinó luego de la etapa de fusión en la cual el óxido de plomo se redujo a plomo metálico. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- Para cada muestra de suelos, se pesó 29,17 gramos, el estándar de calidad y la muestra blanca, se agregaron a los crisoles de fusión según el orden de la figura A.

Figura 4. Posición de muestras para pesar

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24

Fuente: laboratorio metalúrgico.

- A cada crisol, se agregó los reactivos como harina, bórax, carbonato de sodio, flujo (flux), según la muestra.
- Los inquant (plata metálica), se agregó a cada muestra luego de haberlos pesado.
- Un cable de cobre (aproximadamente 0,35 mg), se incluyó a un crisol para cada conjunto de crisoles, indicando cual era el número de conjunto de crisoles que corresponde según el orden del día y se indicó en la hoja de datos.
- El conjunto de crisoles fueron cargados al horno precalentado (2 000°F/1 100°C) con el orden respectivo según y se esperó por una hora aproximadamente, se utilizó el equipo de protección personal.
- Cada crisol al terminar se vació con el equipo especial y se colocaron en las bandejas cónicas siguiendo el orden.
- Las muestras fueron tapadas con una tapadera de metal y se esperó que se formara la escoria (vidrio).

Figura 5. **Vaciado de muestras y recipiente de escoria con plomo**



Fuente: laboratorio metalúrgico KCA.



Fuente: laboratorio metalúrgico KCA.

- El botón de plomo y la escoria, fueron separados en el lugar determinado utilizando pinzas y martillo, teniendo el cuidado que no quede escoria en el botón de plomo.

- Cada botón de plomo fue colocado en las bandejas de madera colocando en el orden determinado.
- Al finalizar se pesó el botón de plomo y se anotó el peso.

3.7.2.1. Equipo y materiales para el área de fusión

Los equipos y materiales que se utilizaron en el área de fusión para realizar la evaluación del reactivo tóxico (plomo) en el análisis cuantitativo para la determinación de oro y plata son los siguientes:

- Horno Cress C1632
- Balanza de mesa Mettler
- Crisoles de 40 gramos para fusión
- Fundente de plomo
- Reactivos para el análisis
- Inquarts de plata
- Espátula para mezclar
- Pinzas para cargar
- Pinzas para verter
- Moldes de hierro fundido
- Tapadera de hierro fundido
- Yunque de metal y martillo (para escoria y plomo)
- Moldes de madera para el botón de plomo

3.7.3. Metodología experimental para la determinación del Doré (aleación de oro y plata)

La aleación de oro y plata se obtuvo con el proceso de copelación luego del proceso de fusión, se realizó a una temperatura constante. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- Las copelas que se utilizaron para determinar el Doré fueron pesadas al inicio.
- Se limpiaron las copelas con aire comprimido.
- Los botones de plomo se colocaron limpios en las copelas correspondientes y luego se cargó el grupo en el horno de copelación.
- Después de 10-15 minutos se revisó para ver si las muestras están abiertas, o sea que el plomo se ha fundido totalmente y se oxida en la copela.
- Cuando los botones de plomo estaban abiertos, se abrió el horno ligeramente, unos 1,25 milímetros, para dejar entrar el aire. El proceso de copelación tomó aproximadamente 40-50 minutos.
- Al finalizar el proceso de copelación, se retiraron inmediatamente las copelas del horno cuando ya no quedó plomo visible y se permitió que se enfriaran completamente.
- Cuidadosamente se retiraron las gotitas de Doré de las copelas y se colocó en vasos de cerámica para su separación.

3.7.3.1. Equipo y materiales para el área de copelación

Los equipos y materiales que se utilizaron en el área de copelación para realizar la evaluación del reactivo tóxico (plomo) en el análisis cuantitativo para la determinación de oro y plata son los siguientes:

- Horno Cress C1632
- Copelas de óxido de magnesio
- Tenedor de copela
- Tenazas de punta doblada
- Vasos de cerámica para separar de 15 mililitros y bandeja
- Pinzas pequeñas

3.7.4. Metodología experimental para la determinación de la cantidad de oro y plata en el Doré (aleación de oro y plata)

La cantidad de oro y plata como parte final del proceso, se determinó en el área de gravimetría, con el objetivo de la separación de los dos metales. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- Las pinzas se utilizaron para poder colocar el Doré en el yunque, se realizó con cuidado la manipulación de las bolitas.
- La aleación de oro y plata (Doré), se aplanaron con el yunque y el martillo.
- La etapa final del proceso fue el pesaje del Doré en la microbalanza.

- El peso del Doré se registro para el análisis gravimétrico de plata.
- Los crisoles fueron colocados con las gotitas en una plancha caliente junto a la campana de gases.
- A cada crisol se le agregó 15 por ciento volumen/volumen de ácido nítrico, y se calentó lentamente en la plancha caliente.
- Una vez que la plata se disolvió completamente, se lavó la esponja negra de oro restante tres (3) veces con agua destilada. La esponja de oro se secó totalmente en la plancha caliente.
- La esponja negra de oro se coció usando un soplete de propano hasta que el vaso de separación se puso rojo oscuro para desarrollar el color oro natural de la gotita y darle fuerza. Se dejó enfriar.
- Las gotitas de oro se pesaron en la microbalanza y se registró su peso utilizando pinzas especiales y una lupa.
- El peso del oro se registro en la hoja para el análisis gravimétrico de oro.

3.7.4.1. Material y equipo en el área de gravimetría

Los equipos y materiales que se utilizaron en el área de gravimetría para realizar la evaluación del reactivo tóxico (plomo) en el análisis cuantitativo para la determinación de oro y plata son los siguientes:

- Plancha caliente
- MicrobalanzaMettler Toledo XP6

- Tenazas de punta doblada
- Cepillo de cerdas duras (para cabezas)
- Yunque de metal y martillo (para cabezas)
- Vasos de cerámica para separar de 15 mililitros. y bandeja
- Ácido nítrico de 15 por ciento volumen/volumen
- Agua desionizada y destilada (libre de cloruro)
- Pinzas pequeñas
- Soplete de propano

3.7.5. Metodología experimental para la determinación de la cantidad de plomo en la escoria (vidrio) luego del proceso de fusión

La cantidad de plomo que estaba contenido en el residuo de fusión (escoria), se obtuvo realizando una refusión con la escoria de cada muestra. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- Se colocó la escoria que se separó del botón de plomo en los crisoles y se le agrega una cantidad de harina para que reduzca la cantidad de plomo que quedo contenida en ella.
- El conjunto de crisoles se cargó al horno precalentado (2 000°F/1 100°C) con el orden respectivo según el orden correspondiente y se esperó por una hora aproximadamente, se utilizó el equipo de protección personal.
- Al finalizar el proceso de fusión se vació cada crisol con el equipo especial y colocarlos en las bandejas cónicas siguiendo con el orden respectivo.

- Las muestras fueron cubiertas con una tapadera de metal y se esperó que se formara la escoria (vidrio).
- El botón de plomo y la escoria, fueron separados en el lugar determinado utilizando pinzas y martillo, teniendo el cuidado que no quede escoria en el botón de plomo.
- En las bandejas de madera se colocaron los botones de plomo en el orden determinado.
- El paso final del análisis, se pesó el botón de plomo y se anotó el peso.

3.7.5.1. Material y equipo en el área de fusión

Los equipos y materiales que se utilizaron en el área de fusión para realizar la evaluación del reactivo tóxico (plomo) en el análisis cuantitativo para la determinación de oro y plata son los siguientes:

- Horno Cress C1632
- Balanza de mesa Mettler
- Crisoles de 40 gramos para fusión
- Harina de trigo como reactivo de fusión
- Pinzas para cargar
- Pinzas para verter
- Moldes de hierro fundido
- Tapadera de hierro fundido
- Yunque de metal y martillo (para escoria y plomo)
- Moldes de madera para el botón de plomo

3.7.6. Metodología experimental para la determinación de la cantidad de plomo en la copela luego del proceso de copelación.

Se determinó la cantidad de plomo en la copela para determinar cuanta pérdida de plomo se obtiene en este proceso. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- La copela fue pesada en una balanza analítica utilizando una pinza y el equipo especial de protección personal.
- El mismo procedimiento se hizo con todas las copelas.
- Se registró el peso de la copela en las tablas.

3.7.6.1. Material y equipo en el área de copelación

Los equipos y materiales que se utilizaron en el área de copelación para realizar la evaluación del reactivo tóxico (plomo) en el análisis cuantitativo para la determinación de oro y plata son los siguientes:

- Balanza de mesa Mettler
- Pinzas pequeñas

3.7.7. Metodología experimental para la determinación de la cantidad de plomo en el Doré (aleación de oro y plata)

La cantidad de plomo que existe en el Doré, se obtuvo realizando un método cuantitativo de absorción atómica en el agua de lavado de la separación de oro y plata en el área de gravimetría. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- La solución de agua y nitrato de plata que se utilizaron para digestionar y lavar el oro fue colocados en tubos de centrifuga de 40 mililitros.
- Los tubos de centrifuga fueron aforados con agua destilada hasta los 40 mililitros y luego se agitaron.
- Se realizaron los estándares de 2, 5 y 10 partes por millón (ppm) de Pb aforados con HCl al 25 por ciento en balones aforados.
- La lámpara de absorción atómica para Pb, fue colocada en el equipo Varian AA240 FS.
- El programa SpectrAA se abrió y luego el método de As 4-Ácidos.
- La lámpara y la señal fueron optimizados para obtener la mayor cantidad de absorbencia.
- Antes de encender el equipo se esperó 15 minutos, se encendió el equipo de absorción atómica y se esperó 5 minutos que se estabilizara.
- La máquina de absorción atómica fue calibrada con los estándares de alta pureza de 2, 5, 10 parte por millón (ppm).
- Se leyó el CAL-ZERO (agua destilada) y el valor del estándar más pequeño.
- Las muestras se comenzaron a leer y anotar el valor de la concentración de Pb en cada muestra

- Como un control de calidad en el procedimiento se leyó el estándar más pequeño (2ppm).

3.7.7.1. Material y equipo en el área de gravimetría

Los equipos y materiales que se utilizaron en el área de gravimetría para realizar la evaluación del reactivo tóxico (plomo) en el análisis cuantitativo para la determinación de oro y plata son los siguientes:

- Espectrómetro de absorción atómica
- Hoja de trabajo de laboratorio
- Balanza analítica a 0,0001 gramos
- Tubos numerados de centrifugado con tapa
- Plancha caliente
- Cualquier material estándar de referencia CANMET, NIST o USGS para arsénico (As)
- Frascos graduados de 100 mililitros clase 'A'
- Pipeta de volumen variable (capacidad 1 ml) calibrada a canal sencillo

3.7.8. Metodología experimental para el balance de masa en el proceso de la determinación de oro y plata

El balance general de la cantidad de plomo existente en cada una de las etapas para la determinación analítica de oro y plata, se calculó para determinar si había pérdidas de plomo en alguna etapa. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- Para cada una de las etapas se realizó la determinación de plomo.
- La masa de plomo se obtuvo en cada uno de las etapas.
- El balance de masa se realizó con la ecuación siguiente:

$$\text{Pb (inicial)} = \text{Pb (vidrio)} + \text{Pb (aleado)} + \text{Pb (Doré)}$$

- Fueron sustituidos los datos en la ecuación anterior, tomando en cuenta que la masa estuviera en la misma unidad de medida.
- Se determinó si hay pérdidas en el proceso.

3.7.9. Tablas de tabulación de datos

Los datos del plomo para cada área de ensayo tanto de fusión, copelación y gravimetría fueron tabulados en las siguientes tablas para los diferentes días de evaluación.

Tabla II. **Dato de la masa del botón de plomo, la copela vacía, copela con PbO y de la escoria**

No.	Identificación de la muestra	Masa del botón de plomo (g)	Masa de la copela vacío (g)	Masa del plomo en escoria (g)	Masa de la copela al final (g)

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Dato de la masa del inquart, de la muestra, Doré y botón de oro**

No.	Identificación de la muestra	Peso de la muestra en (g)	Tubo	Inquart (mg)	Doré (mg)	Oro (mg)

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Dato de la cantidad de plomo en la aleación de oro y plata en absorción atómica**

Fecha: _____

Enviado por _____

	Identificación de la muestra	Peso de la muestra	Volumen	Tubo	Elementos:			
#		Gramos	ml	#				
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Para la realización del proceso para determinar de una forma analítica metales preciosos como oro y plata por medio de ensayos al fuego, se utilizó como variables independiente la temperatura de los hornos, la masa del plomo en cada etapa como variable dependiente.

El análisis estadístico de los datos obtenidos de la masa de plomo en cada etapa se llevó a cabo por medio de un análisis de la variabilidad en los resultados de cada día por medio de varianza utilizando un diseño de bloques aleatorios con la distribución de Fisher, esto debido a que se tratan más de dos niveles.

Tabla V. Datos típicos para el diseño de bloques al azar

Tratamientos	Bloques		Promedio
	1	2	
1	Y1,1	Y1,2	Y1prom
2	Y2,1	Y2,2	Y2prom
3	Y3,1	Y3,2	Y3prom
4	Y4,1	Y4,2	Y4prom
5	Y5,1	Y5,2	Y5prom
6	Y6,1	Y6,2	Y6prom
7	Y7,1	Y7,2	Y7prom
8	Y8,1	Y8,2	Y8prom
9	Y9,1	Y9,2	Y9prom
Promedio	Y1prom	Y2prom	y

Fuente: Walpole, Ronald E. Probabilidad y estadística para ingenieros.4a ed. México:McGraw-Hill. p. 509.

Donde:

- $Y_{i,j}$ = total de las observaciones bajo el i,j -ésimo tratamiento
- y = promedio total de las observaciones bajo el i,j -ésimo tratamiento
- $Y_{a,b}$ = datos obtenidos para cada observación bajo cada tratamiento

Generalmente el procedimiento para un diseño de bloque aleatorio consiste en seleccionar b bloques y en ejecutar una repetición completa del experimento en cada bloque, con un solo factor con a niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal.

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, a \\ y_{ij} &= \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \\ j &= 1, 2, \dots, b \end{aligned}$$

Donde:

- y_{ij} = observación
- μ = media general
- τ_i = efecto del tratamiento i -ésimo
- β_j = efecto del bloque j -ésimo
- ε_{ij} = error aleatorio

Los efectos de bloque y tratamiento se definen como desviaciones respecto a la media general. Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

Las operaciones para el análisis de varianza se resumen en la siguiente tabla, así como las fórmulas para el cálculo de suma de cuadrados.

Tabla VI. **Análisis de varianza para el experimento de bloque aleatorio**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo
Tratamientos	a $\sum_{j=1} y_j^2 / b - y^2 / ab$	$a - 1$	$(SS_{\text{tratamientos}}) / (a - 1)$	$(MS_{\text{tratamientos}}) / MS_E$
Bloques	b $\sum_{j=1} y_j^2 / a - y^2 / ab$	$b - 1$	$(SS_{\text{bloques}}) / (b - 1)$	
Error	SS_E (por sustracción)	$(a - 1)(b - 1)$	$(SS_E) / [(a - 1)(b - 1)]$	
Total	$A \ b$ $\sum_{j=1} \sum_{i=1} y_{ij}^2 - y^2 / ab$	$ab - 1$		

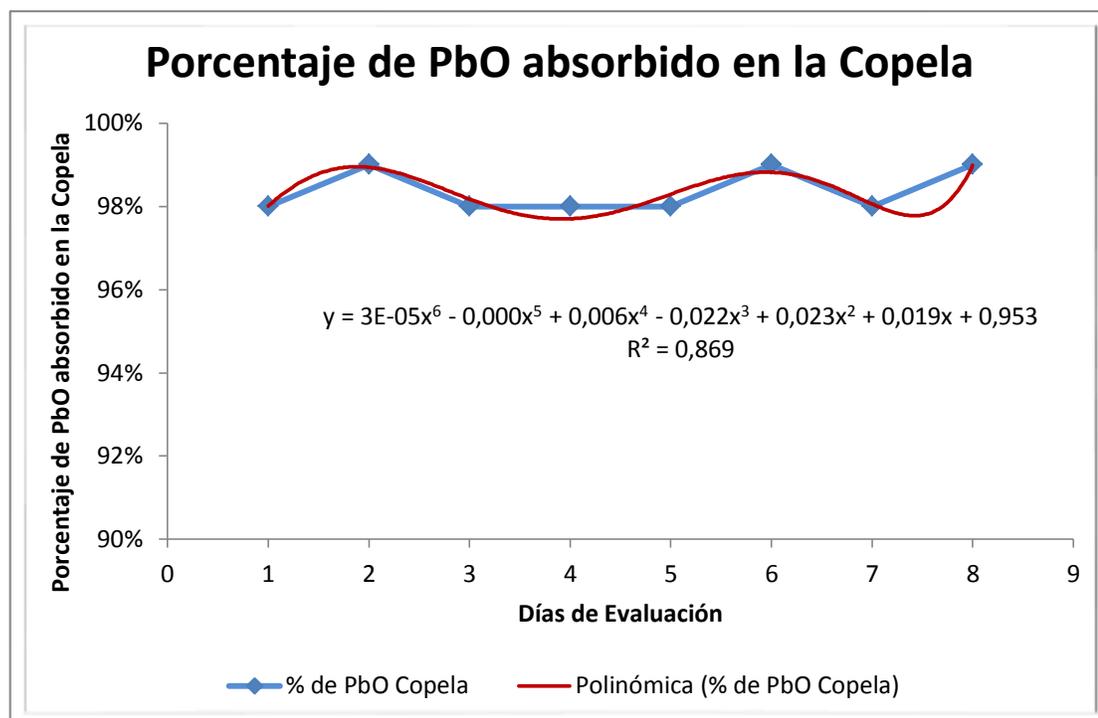
Fuente: Walpole, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 4a ed. México: McGraw-Hill. p. 510.

La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento se prueba mediante la razón de Fisher, que se define como: $F = \frac{MS_{\text{tratamientos}}}{MS_E}$ donde $MS_{\text{tratamientos}}$ es la media cuadrática de los tratamientos y MSE es la media cuadrática del error; y que para un nivel de confianza $\alpha = 0,05$ y con 2 grados de libertad para tratamientos y 5 para bloques.

4. RESULTADOS

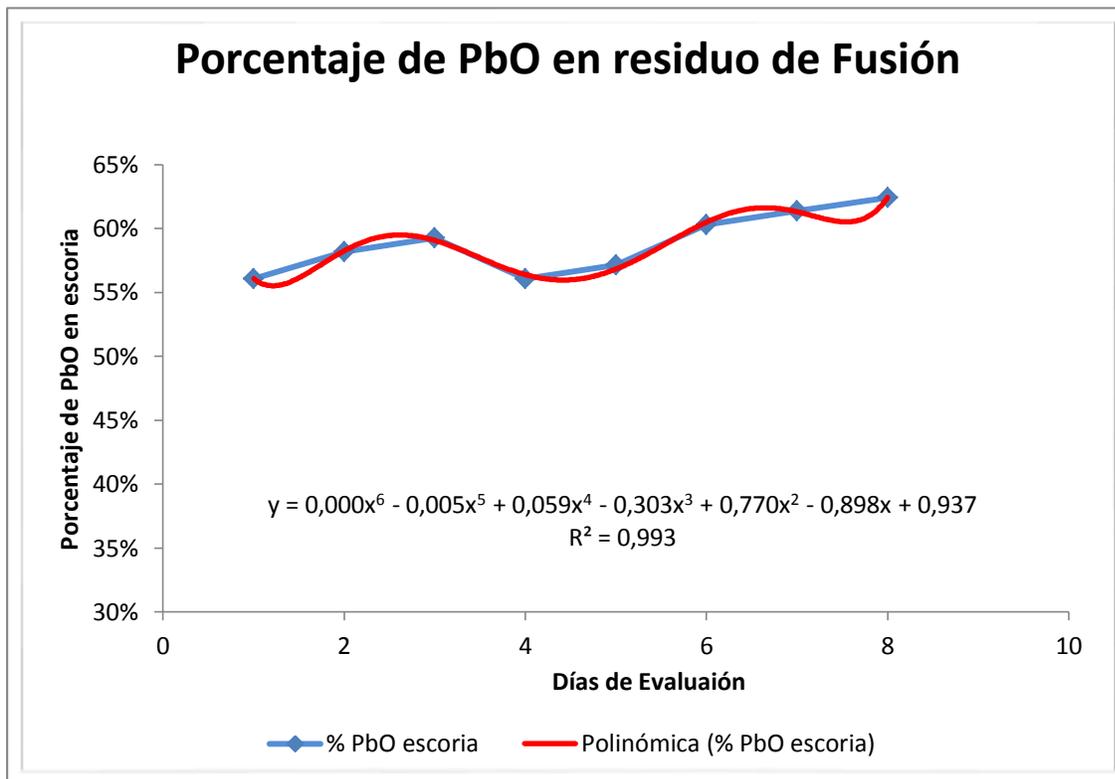
Los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos planteados se muestran a continuación tomando en cuenta el diseño metodológico y el orden de los objetivos de estudio.

Figura 6. **Correlación de la cantidad de plomo absorbida por la copela en función de los días de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo en la copela se obtuvo con la temperatura constante en cada día de análisis**



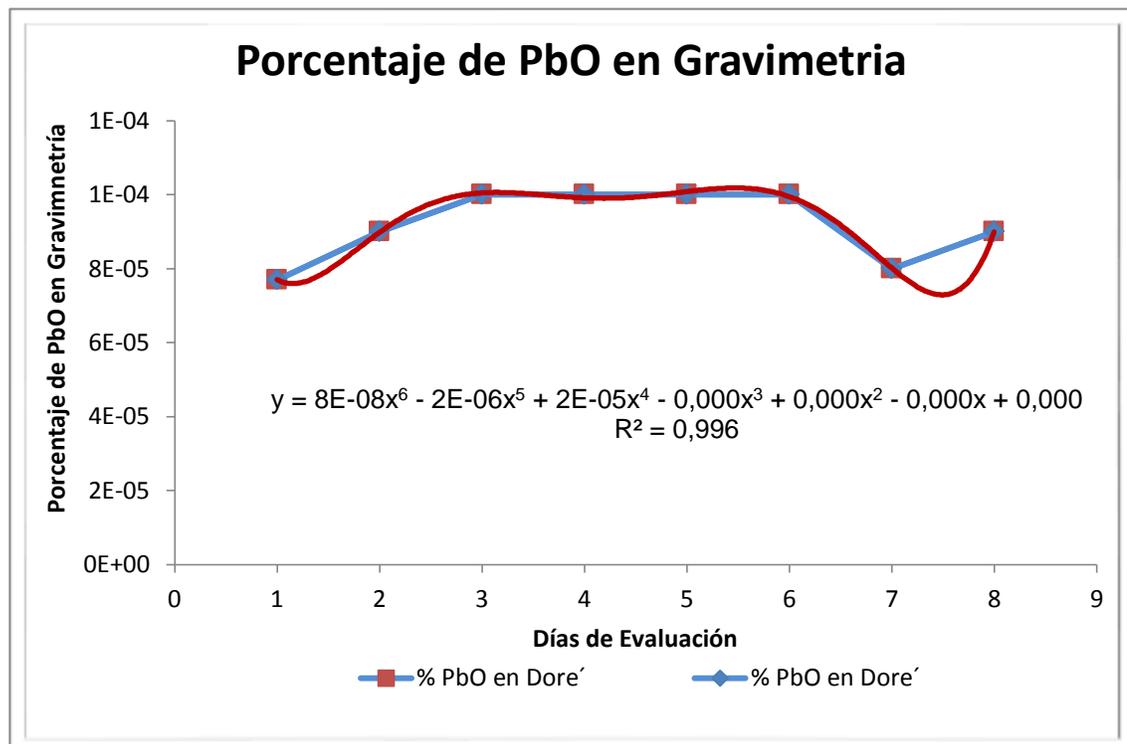
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Correlación de la cantidad de plomo que contiene el residuo (escoria) en el área de fusión en función a los días de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada día de análisis**



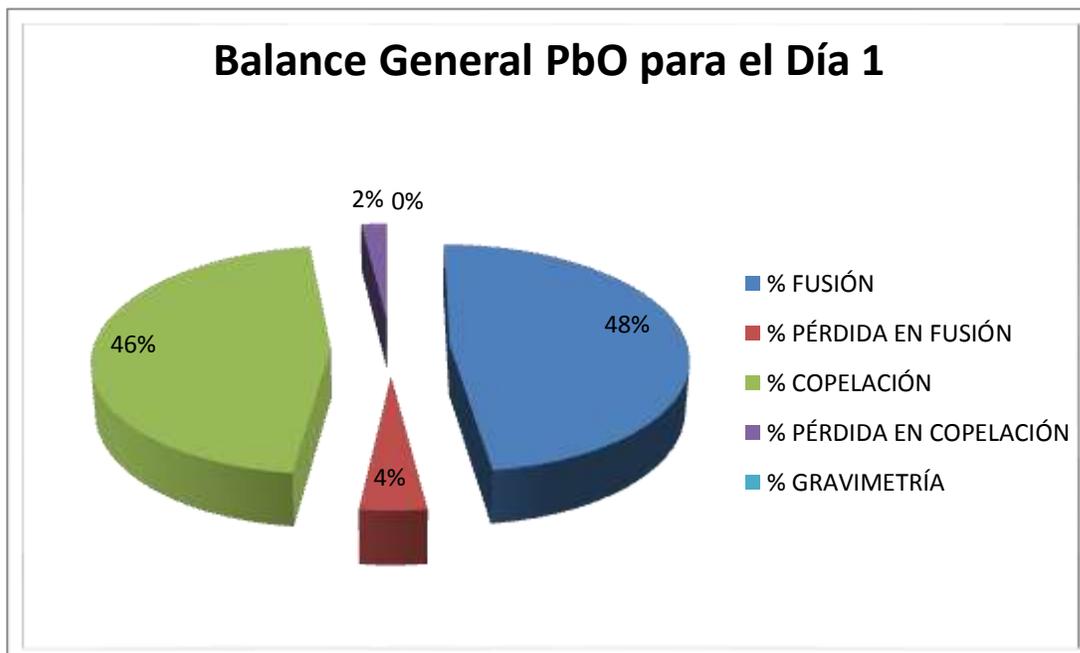
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Correlación de la cantidad de óxido de plomo que está contenida en el Doré (aleación de oro y plata) en el área de gravimetría en función de los días de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso**



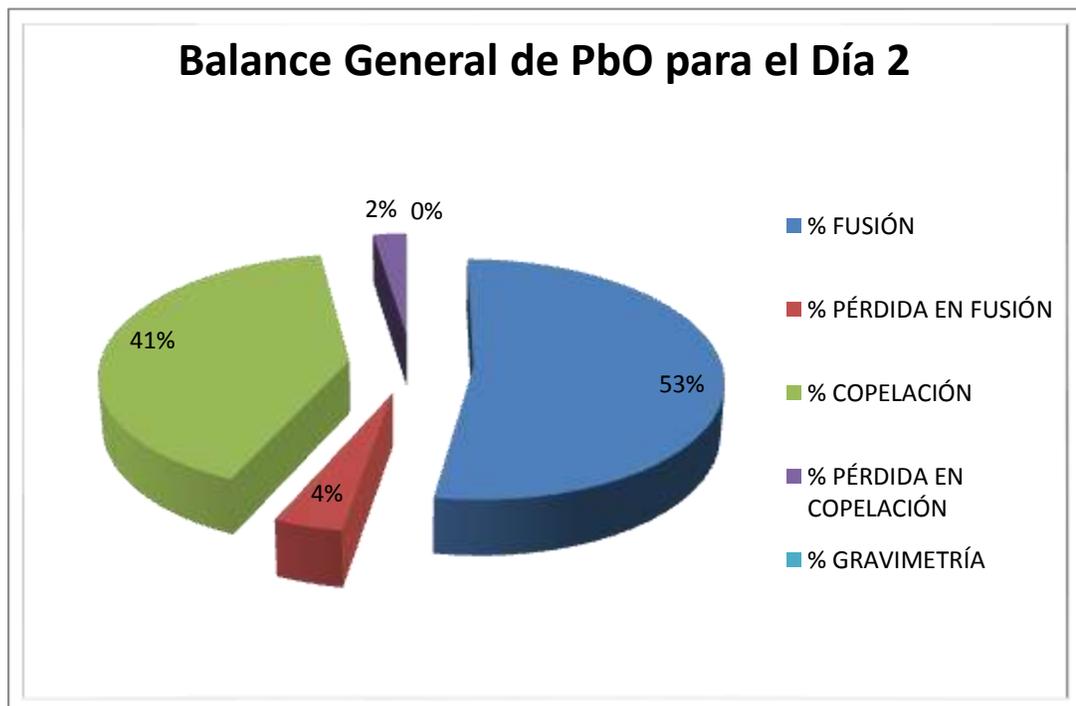
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 1 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso



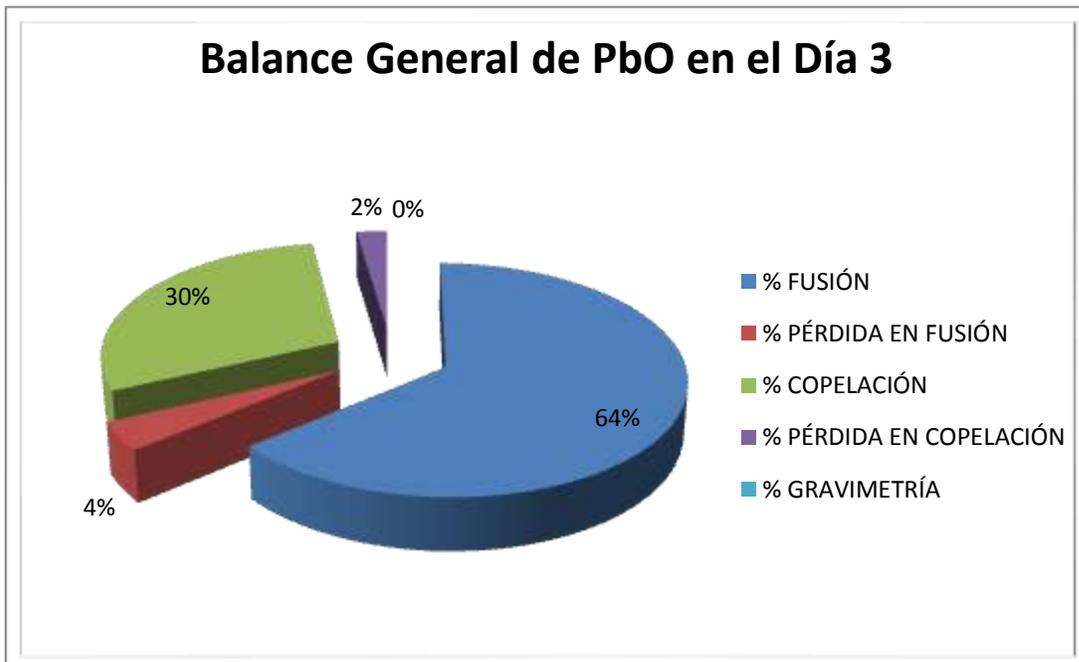
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 2 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso



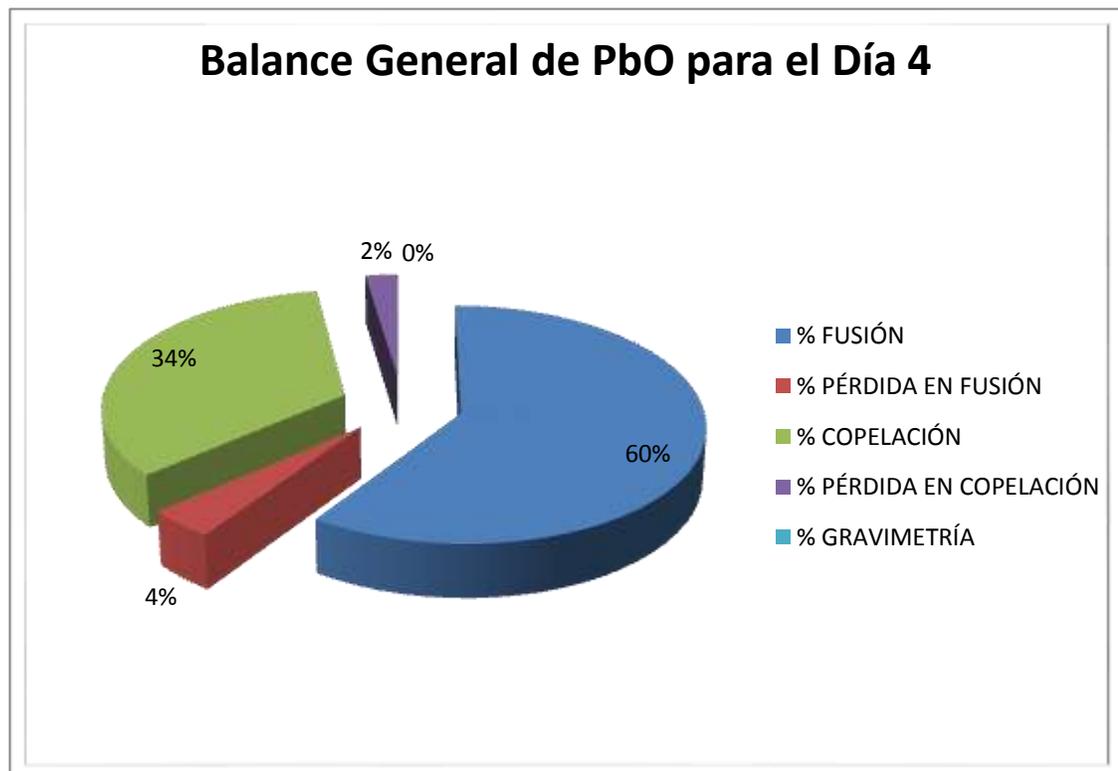
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 3 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso**



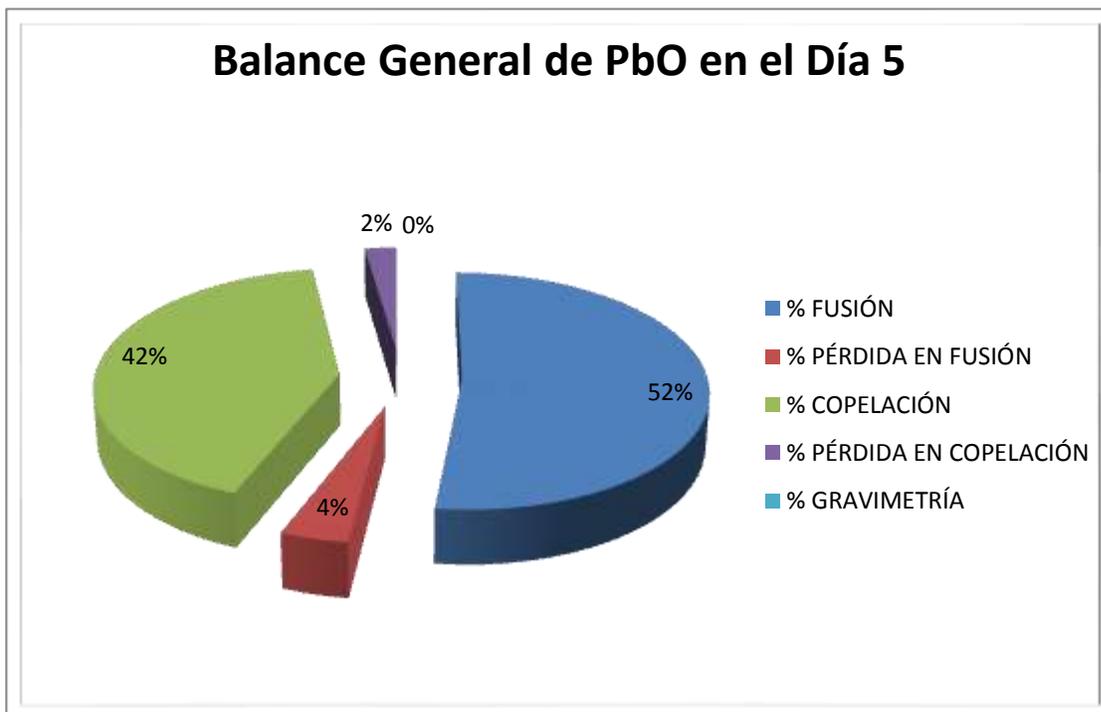
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 4 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso



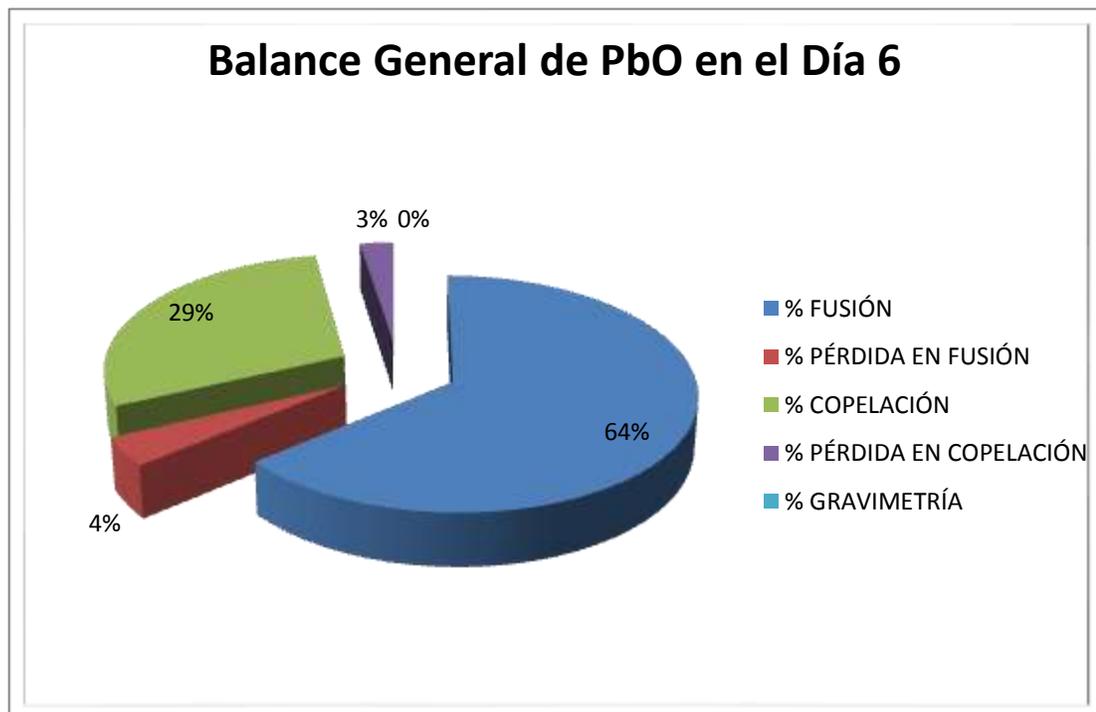
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 5 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso**



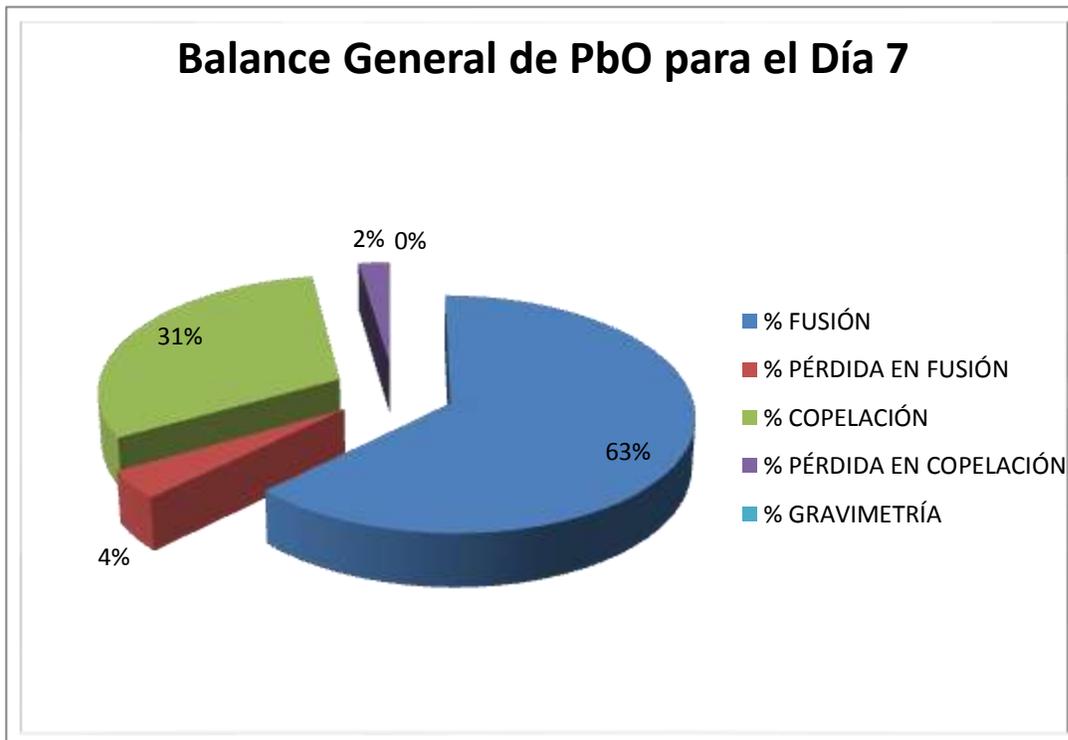
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 6 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso



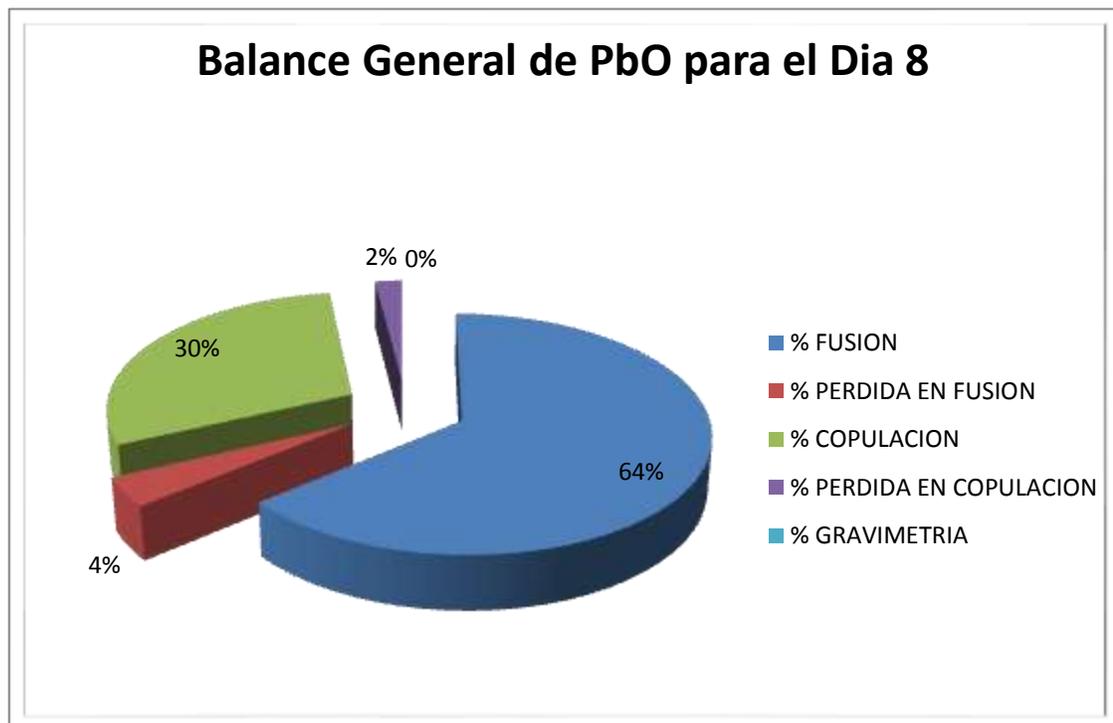
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 7 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Balance de masa total de óxido de plomo para todo el proceso de la determinación analítica de oro y plata para el día 8 de evaluación, para la obtención de la cantidad de plomo se obtuvo con la temperatura constante en cada etapa del proceso



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Análisis de varianza para determinar si existe diferencia significativa en la cantidad de plomo en el área de fusión para los días de evaluación**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	1 894,81	2	947,41	182,25	4,27E-47	3,036
Columnas	6 513,69	7	930,53	179,01	3,09E-86	2,052
Interacción	1 3264,38	14	947,45	182,26	3,89E-111	1,737
Dentro del grupo	1122.86	216	5,20			
Total	22 795,75	239				

Fuente: análisis estadístico.

Tabla VIII. **Análisis de varianza para determinar si existe diferencia significativa en la cantidad de plomo en el área de copelación para los días de evaluación**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados		Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
		de libertad					
Muestra	0,032	2		0,0163	3,864	0,0224	3,0376
Columnas	1,237	7		0,1767	42,323	3,0757-37	2,0521
Interacción	0,796	14		0,0568	13,625	6,203E-23	1,7378
Dentro del grupo	0,901	216		0,00417			
Total	2,966	239					

Fuente: análisis estadístico.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se tuvo como objetivo determinar la cantidad de plomo presente en cada etapa del proceso de la determinación analítica de oro y plata en un laboratorio metalúrgico. El plomo es un elemento químico considerado como metal pesado, posee una densidad alta y punto de fusión bajo. El plomo metálico y sus compuestos, tanto inorgánicos como orgánicos, constituyen hoy, probablemente, el factor químico de riesgo para la salud de los trabajadores más conocido desde la antigüedad.

Para poder realizar el estudio se procedió a obtener diferentes muestras de suelos de exploración y/o de explotación minera para poder realizar el análisis cuantitativo, las cuales se limitaron a muestras ácidas y/o ácidas sulfúricas. Para realizar el proceso de determinación de oro y plata, el plomo posee el papel más importante ya que actúa como colector de metales preciosos. Para la evaluación de plomo en cada etapa se marcaron puntos críticos en cada área para determinar la cantidad y así poder llegar a realizar el balance de masa total para demostrar que si existen pérdidas de plomo y el área del proceso en donde éstas ocurran.

La evaluación comenzó con la medición cuantitativa de óxido de plomo que contiene el flujo (flux) que es la mezcla de reactivos que se utilizan para el análisis, el flujo (flux) contiene 70 por ciento de óxido de plomo y se utiliza un aproximado de 135 gramos de flujo para cada muestra. Con el balance de masa total que se realizó se determinó si la cantidad de óxido de plomo que se agregó al inicio se recupera en las diferentes áreas de análisis.

Se realizaron evaluaciones por 8 días en todo el proceso analizando diferentes grupos por día y determinando la cantidad de plomo en cada área de análisis por diferentes métodos. Se inició pesando las muestras de exploración y/o explotación que contiene el metal precioso, colocándolas en bandejas de plástico las cuales se trasladaron a la primera área del proceso que es la de fusión.

Se identificó según el orden de correlación de análisis el número de conjunto de crisoles que se podían utilizar los cuales se ordenaron en su base de madera para poder agregarle a cada crisol la cantidad de flujo (flux), esto se realizó con el equipo de protección personal y en la campana de succión, seguido se le agregó la muestra a cada crisol en su orden respectivo, se le agregaron los fundentes básicos para poder neutralizar la muestras, la harina de trigo como agente reductor y la cantidad de plata metálica para poder formar el Doré.

Las muestras se mezclaron con los fundentes y el flujo (flux) y se cargaron al horno de fusión utilizando el equipo de protección para altas temperaturas teniendo en cuenta el orden de las muestras en el horno, este proceso se realizó a una temperatura de 1 100 grados centígrados durante un período de aproximadamente 1 hora, en la cual se fundieron las muestras dependiendo de su temperatura de fusión y se redujo el plomo de óxido de plomo a plomo metálico con la harina como agente reductor el cual actuó como colector del oro y la plata separándolos de la escoria o material sin valor.

Se descargaron las muestras en un recipiente cónico de metal para poder enfriarlas por 15 minutos y se realizó la separación de la escoria y el botón de plomo ya que el plomo por tener mayor gravedad específica y es insoluble en el material que contiene la escoria, esto permite que el botón de plomo se encontró hasta el fondo del recipiente cónico.

La separación del botón de plomo con la escoria se realizó luego de haberse enfriado, utilizando una pinza se quebró la escoria para retirar el botón de plomo, la escoria se recogió y se realizó una refusión agregándole harina para poder determinar la cantidad de plomo que se encuentra en este residuo como punto crítico de la evaluación.

Al obtener el botón de plomo se trasladó al área de copelación en la cual se pesó el botón de plomo como un punto de evaluación, seguido se agregó el botón a las copelas que son crisoles porosos hechos de ceniza de hueso u óxido de magnesio las cuales se pesaron al inicio luego de ser calentadas para poder eliminar la humedad, se cargó el grupo de copelas con el botón de plomo al horno de copelación que trabajó a una temperatura de 955 grados centígrados. Después de 5 – 10 minutos se revisó si las muestras ya estaban abiertas ósea que el plomo se había fundido totalmente, se abrió el horno aproximadamente 1,25 milímetros, para dejar entrar el aire para que el plomo metálico se oxidara a óxido de plomo que luego fue absorbido por la copela, este proceso duro aproximadamente de 40 a 50 minutos.

Se retiraron las copelas que contenían el Doré del horno y se dejaron enfriar por unos 15 minutos utilizando el equipo de protección personal, se retiraron cuidadosamente las gotitas de Doré de las copelas y se colocaron en un conjunto de crisoles de porcelana los cuales se trasladaron al área de gravimetría en donde se separó la cantidad de oro de la plata metálica, las copelas se pesaron para determinar la cantidad de plomo que absorbieron y así poder conocer las pérdidas en esa área.

Las gotitas de Doré se aplastaron con la ayuda de pinzas y martillo para que hubiera un mejor contacto de transferencia con ácido nítrico. Se trasladó el conjunto de crisoles al área de gravimetría y se colocaron en una plancha caliente dentro de la campana de gases, se le agregó ácido nítrico al 15 por ciento volumen/volumen a cada crisol de porcelana para poder separar la plata del oro, este proceso duro aproximadamente 30 minutos hasta que no se observara ninguna reacción en el crisol. Después del tiempo estipulado se sacó el conjunto de crisoles y se lavó con agua destilada el botón de oro que se obtuvo de la muestra, el agua de lavado se agregó en tubos de centrífuga los cuales se llevaron al área de absorción atómica con la que se determinó la cantidad de plomo que contenía el Doré.

Se realizó el mismo procedimiento para los demás días de evaluación, se determinó la cantidad de óxido de plomo en la escoria que es el residuo de fusión que está formado de sales tales como silicatos de plomo, silicatos de sodio, óxidos de metales y boratos, por lo que según la figura 7 de resultados el área de fusión es el que contiene mayor cantidad de plomo ya que la cantidad necesaria para llegar a un botón de plomo perfecto es mínima, por lo que el óxido de plomo que está contenido en la escoria posee porcentajes mayores al 50 por ciento del plomo total del análisis en los diferentes días.

La variación del porcentaje de óxido de plomo según la figura se da por que la reducción de plomo no es constante en cada muestra por lo que el botón de plomo se obtiene con diferentes pesos para cada muestra, pero las cantidades de óxido de plomo presente en esta etapa se mantienen por encima de 55 por ciento y por debajo de 65 por ciento de óxido de plomo en los días de evaluación.

La evaluación nos demostró que en el área de fusión es donde se tiene la mayor cantidad de plomo en la escoria que es el residuo en esta área, con este estudio se revisó los procedimientos de desecho de la escoria y la limpieza en la etapa de separación en donde se quiebra la escoria para retirar el botón de plomo con el objetivo de crear responsabilidad en los analistas para utilizar el equipo de seguridad personal y realizar los procedimientos de la mejor manera.

El área de copelación es la etapa en donde se realiza la oxidación de plomo metálico a óxido de plomo por lo que se debía de evaluar la eficiencia de la copela para absorber este reactivo tóxico, por lo que se realizó como parte de la evaluación el análisis de la cantidad que la copela absorbe durante la oxidación en el horno que trabaja a temperaturas de 955 grados centígrados, según la figura 6 de resultados, la eficiencia promedio de absorción de óxido de plomo por la copela es del 98 por ciento por muestra, por lo que la copela contenía la mayor cantidad de reactivo oxidado, las pérdidas se deben a el flujo continuo de aire en el horno para inducir a la oxidación que luego se conducen al ambiente por medio de las campanas extractoras de gases.

Según el comportamiento de la figura 6, la diferencia del porcentaje de absorción de óxido de plomo por la copela que existe es similar por lo que el rango está por arriba del 98 por ciento de absorción de plomo en todos los días de evaluación, estos resultados nos obligan a tomar mayor precaución en la

manipulación de la copela cuando se desechan, utilizando siempre el equipo de protección personal para que los analistas no tengan contacto directo con el óxido de plomo absorbido a la copela.

La etapa final del análisis cuantitativo de la determinación de oro y plata por medio de ensayos al fuego es el área de gravimetría en donde se tiene como objetivo la separación de la aleación de oro y plata, por lo que se debía de analizar si existía alguna cantidad de óxido de plomo adherido al oro y la plata, por lo que se analizó el agua de lavado que se utiliza para limpiar el botón de oro luego de la digestión de la plata con ácido nítrico, este análisis se realizó por medio de la técnica de absorción atómica por flama ya que la cantidad de plomo en el agua de lavado era muy bajo.

El Doré que es la aleación de oro y plata es el resultado de la oxidación del botón de plomo en el área de copelación, por lo que según la figura 8 de resultados el porcentaje de plomo que existe en la aleación respecto al plomo total está por debajo del 1 por ciento ya que el valor promedio de plomo es de 0,0001 por ciento y es un valor muy bajo en comparación de las otras áreas de evaluación, según la correlación de la figura 8 los valores en los diferentes días de análisis de la cantidad de plomo en el agua de lavado es menor al 5 por ciento por lo que no tiene ningún efecto en la cantidad de plomo total de todo el análisis cuantitativo.

Obteniendo los resultados de las evaluaciones se realizó el balance de masa total para la cantidad total de óxido de plomo, como el plomo se encuentra en diferentes compuestos (óxido de plomo y plomo metálico), todo el balance se realizó conforme el óxido de plomo, el balance lo constituyó las tres áreas de análisis como lo fueron el área de fusión, copelación y gravimetría. El balance de materia se basa en la conservación de la materia, que establece

que la masa de un sistema establece constante, por lo que al realizar el balance de óxido de plomo, todo el reactivo inicial lo debíamos de haber obtenido como parte de los residuos en las diferentes áreas de análisis.

Con el balance general se determinó si existían pérdidas de plomo en el análisis cuantitativo, por lo que al evaluar el plomo en área de fusión se constató que existían pérdidas de plomo no mayores al 4 por ciento del reactivo total, esto se debe ya que en la etapa de fusión suceden varias reacciones de neutralización, oxidación y reducción por lo cual liberan gases por lo que existe un arrastre de óxido de plomo hacia el ambiente adheridos a estos gases. Este efecto se presenta a temperaturas menores de 900 grados centígrados en la cual suceden las reacciones mencionadas anteriormente¹.

El otro punto en donde se estableció que existía pérdidas de óxido de plomo, es en el área de copelación donde se realiza la oxidación de plomo metálico a óxido de plomo, ya que la copela absorbe un 98 por ciento del plomo oxidado por lo que el resto es arrestado hacia el ambiente, la cantidad de pérdidas en esta etapa no sobrepasan el 3 por ciento de reactivo total, por lo que en esta área se tenían pérdidas menores a diferencia del área de fusión.

Según la figura 9 que corresponde al balance general de masa del día 1 de evaluación nos muestra que la cantidad mayor de plomo se encuentra en el área de fusión con un 48 por ciento del plomo total como parte de los componentes que forman la escoria, luego el área de copelación posee una cantidad similar pero menor que es del 46 por ciento esto dependerá del tamaño de botón de plomo que se obtiene en cada muestra, según la cantidad de harina que se le agregue.

¹Edward E. Bugbee. *Textbook of FIRE ASSAYING*.3a. ed. 1940. Reno, Nevada, Metallurgical Laboratory, P. 11.

El resto de la cantidad de plomo lo conformaron las pérdidas en el área de fusión y el área de copelación, según el balance de masa se tienen pérdidas menores al 10 por ciento en todo el análisis por lo que se rechaza la hipótesis ya que las pérdidas totales en todo el análisis cuantitativo son de 6 por ciento aproximadamente y eso es bueno ya que no se pierde mucha cantidad de plomo al ambiente.

En los siguientes días de evaluación las figuras nos muestran que hay variación en la cantidad de óxido de plomo en el área de fusión pero siempre manteniendo la relación de mayor reactivo tóxico (plomo) en el área de fusión, según la figura 11 para el día 3 de evaluación se obtuvo un 64 por ciento de plomo en la escoria, esto se debió por que el botón de plomo que se formó fue muy pequeño, las pérdidas en las dos áreas son aproximadamente similares en los demás días, y la cantidad de plomo que se encontró en el Doré es menor a 1 por ciento en todos los días de evaluación por lo que es el área con menos cantidad de plomo.

Las figuras 14, 15 y 16 muestran una tendencia similar con respecto a los porcentajes en cada área, ya que la cantidad de plomo metálico que se redujo en la etapa de fusión fue similar, el tamaño del botón de plomo dependerá de la cantidad de harina que se le agregó a la muestra, si la muestra contiene sulfuros ya que este reactivo actúa como un agente reductor con el óxido de plomo y la existencia de muestras que contienen hierro que reducen al óxido de plomo para obtener plomo metálico.

La masa promedio perfecta de un botón de plomo está entre los 30 y 40 gramos, este peso afectará la utilización de los diferentes tamaños de copelas que se tienen ya que si se agrega un botón muy grande a una copela, el plomo cuando se funde en el área de copelación puede rebalsar la copela produciendo contaminación en las otras muestras y en el piso del horno.

Con la evaluación realizada y teniendo los resultados de los balance de masa general para cada día, se puede determinar las áreas en donde se manipula la mayor cantidad de plomo, también se pudo identificar en que etapas ocurre las pérdidas del reactivo tóxico, esto ayudará a explicarle a los analistas los puntos en donde ellos tienen mayor contacto con los residuos que poseen plomo como lo es la escoria, la copela y los gases que escapan de los hornos tanto de fusión como de copelación. Se tomarán mayores controles para la eliminación tanto de residuos como de materiales que tengan contacto con el óxido de plomo para poder garantizar un ambiente saludable para los analistas.

Se realizó un análisis estadístico el cual nos indicará si existe una diferencia significativa en las cantidades de plomo en cada área del análisis para cada día de evaluación. El análisis estadístico de los datos obtenidos en cada etapa para los días de evaluación se llevó a cabo por medio de un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un diseño de bloques aleatorios con la distribución de Fisher, esto debido a que se tratan más de dos niveles.

Según la tabla VII, muestra los resultados del análisis de varianza para los datos obtenidos en el área de fusión, según las muestras o los conjuntos de cada día, el valor de F es de 182,24, el valor de F crítico para un valor de confianza de 0,05 es de 3,03 esto indica que la variación entre grupos es muy grande, por lo que la variación entre los datos de plomo en el área de fusión es significativa, los errores no se pueden adjudicar a errores aleatorios, esta

diferencia también se observa cuando se comparan los días y la interacción dentro de los conjuntos ya que el valor de la F es demasiado grande con respecto al F crítico.

La diferencia significativa del método se debe que la masa del botón de plomo fue diferente en todos los análisis ya que la cantidad de harina que reduce al plomo no se agregó en la misma cantidad para cada muestra, por lo que la cantidad de plomo que está contenida la escoria era diferente en cada día.

La tabla VIII muestra los resultados del análisis de varianza para los datos que se obtuvieron en el área de copelación son similares a los del área de fusión. La interacción que se tiene por conjuntos y por días según su F son demasiado grandes que las F críticas por lo que hay una diferencia significativa entre los valores que se obtuvieron de la masa de óxido de plomo para cada día, esto no se puede adjudicar a errores aleatorios ya que la probabilidad esta por abajo del nivel de confianza y la diferencia entre el valor de F con el valor de F crítico es demasiado grande. Existe un diferencia significativa entre los valores en esta área cuando se cambia el día, ya que la masa del botón de plomo no es constante para cada día de análisis.

CONCLUSIONES

1. El proceso cuantitativo para la determinación de oro y plata por medio de ensayos al fuego posee pérdidas menores del 10 por ciento total de plomo.
2. El porcentaje de recuperación de óxido de plomo en el área de copelación por medio de la copela absorbente, fue del 98 por ciento de reactivo que se oxidó.
3. El Doré (aleación de oro y plata) contiene cantidades menores al 1 por ciento de plomo total, utilizado en el análisis cuantitativo de metales preciosos.
4. Los residuos del área de fusión son los que contienen la mayor cantidad de plomo, seguido de los residuos del área de copelación, según el balance de masa general realizado en todo el análisis.
5. La pérdida de plomo que se tiene en el procedimiento analítico de la determinación de oro y plata se da en el área de fusión con el 4 por ciento de plomo total.
6. El porcentaje de pérdida en el área de copelación cuando el plomo metálico se oxida es de un 3 por ciento aproximadamente.

7. Existe diferencia significativa en los resultados obtenidos de concentración de plomo de cada área para los diferentes días de evaluación, ya que la cantidad de plomo metálico no es constante para cada análisis.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio evaluando la cantidad de plomo comparando los tipos de muestras como ácidas, básicas y sulfúricas.
2. Estandarizar la cantidad de harina que se le agrega a cada muestra para obtener la misma cantidad de plomo metálico.
3. Investigar un método para poder recuperar el plomo que se encuentra en la escoria y en la copela.
4. Diseñar una metodología para recuperar la cantidad de óxido de plomo que se va al ambiente en las áreas de fusión y copelación.
5. Realizar un estudio en donde se tenga variación en la temperatura para comprobar si disminuyen las pérdidas de plomo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARNAIZ, Pérez, Mónica. *Valorización de rapa como bioadsorbente para la eliminación de plomo de efluentes acuosos*, [en línea], Ingeniería Química, Universidad Politécnica de Catalunya, España 2006.
web:<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3694/1/55706-1.pdf>.p. 93,[Consulta: 29 de julio del 2013]
2. EDWARD E. Bugbee. *Textbook of FIRE ASSAYING*,3a. ed. 1940. Reno Nevada,Publisher MetallurgicalLaboratory, p. 315.
3. FELDER M. Richard. *Principios elementales de los procesos químicos*, 3a. ed. México: LimusaWiley, 2004, p. 686.
4. GARCIA SARAN, Marco Vinicio. *Determinación cuantitativa de cobre, arsénico, cadmio y plomo en rábano rojo, que se cosecha en planes de San Pedro Ojo de Agua, San Pedro Sacatepéquez*, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. p. 61.
5. NORDBERG, Gunnar&Sunderman, William.*Propiedades químicas y tóxicas de los metales*, Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. [en línea].
web:<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>. p. 75. [Consulta: 29 de julio de 2013]

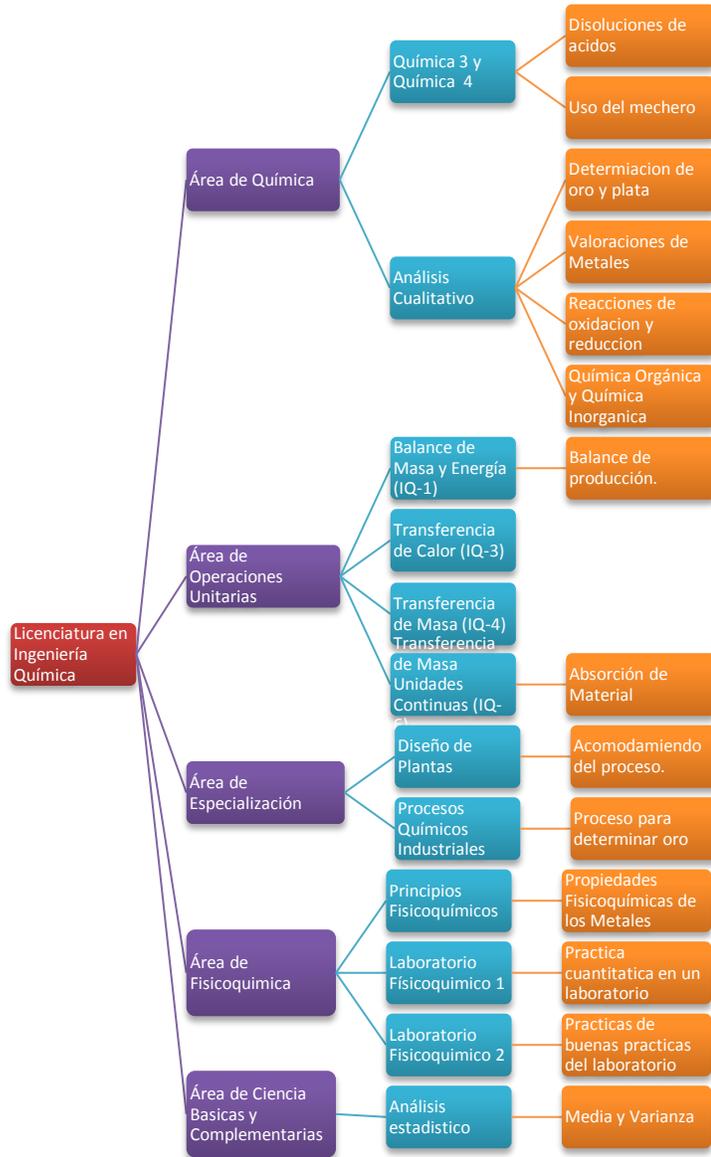
6. UBILLOS Limo, Julio. *Estudio sobre el medio ambiente de Talara*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2003. p. 18.

7. VÁSQUEZ García, Jorge. *Procesamiento de minerales auríferos. [en línea]*, Ministerio de Energía y Minas, República de Colombia, cartilla No.1.
web:http://www.simco.gov.co/simco/documentos/Seg_Minera/proced_min_aur_car_010001.pdf. p. 30. [Consulta: 27 de agosto de 2013]

8. WEBSTER, ALLEN. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. 3a. ed. México: McGraw-Hill. p. 512

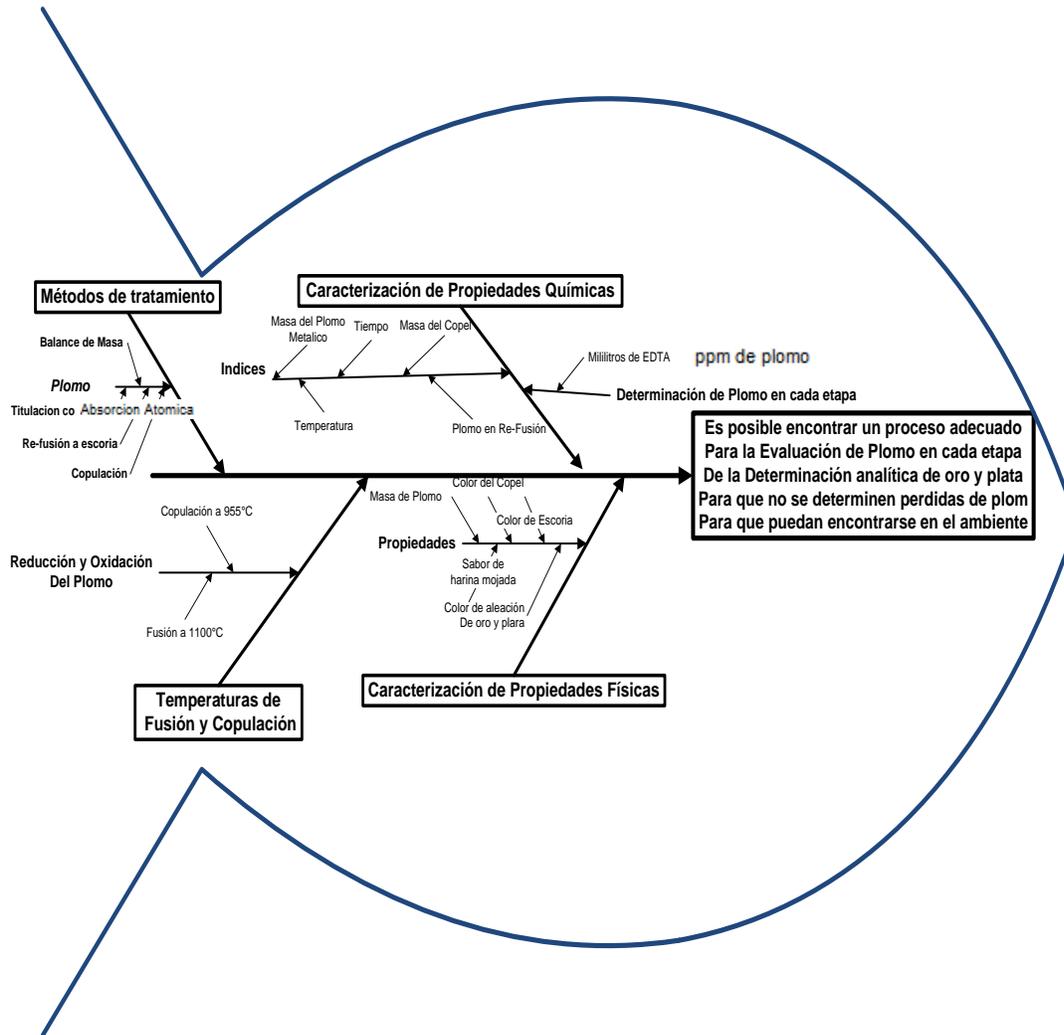
APÉNDICES

1. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

2. Diagrama Ishikawa



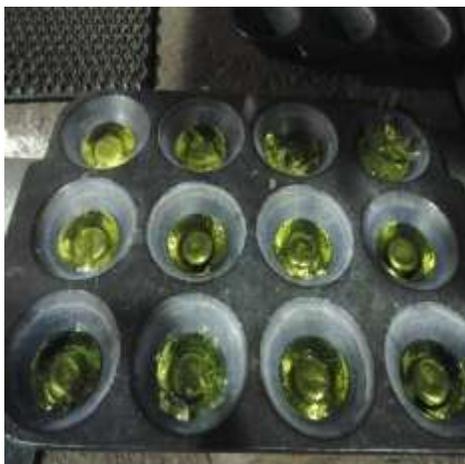
Fuente: elaboración propia.

3. **Determinación de la cantidad inicial de PbO en cada muestra**



Fuente: fotografías tomadas en el laboratorio de KCA

4. **Botón de plomo con escoria después del proceso de fusión**



Fuente: fotografías tomadas en el laboratorio de KCA.

5. **Copela con botón de plomo y copela con óxido de plomo**



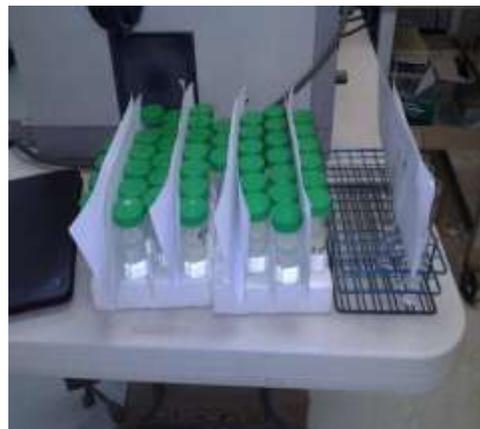
Fuente: fotografías tomadas en el laboratorio de KCA.

6. Plomo en el lavado del Doré en área de Gravimetría



Fuente: fotografías tomadas en el laboratorio de KCA.

7. Determinación de Plomo por absorción atómica en el Doré



Fuente: fotografías tomadas en el laboratorio de KCA.

8. Datos calculados para el día 1 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	58,44	59,75%	31,80	91,73	33,63	98,17%	35,59%	1,14	5,2E-05
	2	48,50	48,87%	42,70	102,37	43,67	94,94%	46,21%	1,17	5,3E-05
	3	42,58	42,41%	48,20	109,31	50,41	97,09%	53,34%	2,20	1,0E-04
	4	57,66	58,85%	34,20	96,09	35,19	95,52%	37,24%	2,54	1,2E-04
	5	18,23	15,87%	70,80	174,99	74,19	97,28%	78,51%	3,35	1,5E-04
	6	43,44	43,35%	47,40	105,48	48,38	94,75%	51,20%	3,63	1,7E-04
	7	58,09	59,31%	33,80	93,73	35,53	97,58%	37,60%	1,91	8,7E-05
	8	34,18	33,25%	56,00	155,15	58,65	97,22%	62,06%	2,63	1,2E-04
	9	33,64	32,66%	56,50	152,77	59,27	97,38%	62,72%	5,21	2,4E-04
CONJUNTO 2	1	63,35	69,11%	27,10	89,29	28,99	99,31%	30,68%	1,45	6,6E-07
	2	62,30	67,97%	28,10	89,37	30,07	99,34%	31,82%	2,03	9,3E-07
	3	63,98	69,79%	26,50	86,37	28,47	99,73%	30,13%	2,35	1,1E-06
	4	66,59	72,64%	24,00	83,46	25,26	97,71%	26,73%	1,25	5,7E-07
	5	64,18	70,02%	26,30	85,06	27,66	97,63%	29,27%	3,45	1,6E-06
	6	46,73	50,98%	43,00	102,89	45,09	97,34%	47,71%	2,57	1,2E-06
	7	51,02	55,66%	38,90	95,72	40,82	97,41%	43,20%	2,43	1,1E-06
	8	59,80	65,23%	30,50	93,77	32,07	97,61%	33,94%	1,33	6,1E-07
	9	61,57	67,17%	28,80	92,35	30,15	97,18%	31,90%	1,22	5,6E-07
CONJUNTO 3	1	47,84	30,80%	85,80	244,44	90,54	97,96%	63,87%	3,49	1,1E-06
	2	37,71	23,43%	95,50	257,48	100,48	97,67%	70,89%	4,91	1,5E-06
	3	44,71	28,52%	88,80	247,28	93,48	97,72%	65,95%	2,82	8,6E-07
	4	97,90	67,20%	37,90	102,5	39,80	97,49%	28,08%	1,02	3,1E-07
	5	31,02	18,56%	101,90	262,36	106,66	97,17%	75,25%	1,79	5,4E-07
	6	29,87	17,73%	103,00	265,08	108,38	97,68%	76,46%	0,80	2,4E-07
	7	42,83	27,15%	90,60	255,82	95,22	97,57%	67,17%	3,11	9,5E-07
	8	92,67	63,40%	42,90	106,39	44,99	97,35%	31,74%	0,82	2,5E-07
	9	97,16	70,67%	38,60	99,83	40,53	97,47%	28,59%	4,92	1,5E-06

Fuente: elaboración propia.

9. Datos calculados para el día 2 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	53,81	52,94%	38,2	100,2	40,69	98,88%	43,06%	2,15	9,8E-05
	2	59,51	58,97%	32,9	94,6	34,99	98,73%	37,03%	2,29	1,0E-04
	3	61,41	60,98%	31,4	94,4	33,09	97,83%	35,02%	2,43	1,1E-04
	4	62,73	62,38%	29,5	93,3	31,77	99,97%	33,62%	2,51	1,1E-04
	5	61,56	61,14%	30,9	92,0	32,94	98,96%	34,86%	2,35	1,0E-04
	6	61,55	61,13%	31,1	91,3	32,95	98,35%	34,87%	2,48	1,1E-04
	7	55,56	54,79%	36,3	99,5	38,94	99,58%	41,21%	2,25	1,0E-04
	8	54,00	53,14%	38,2	99,4	40,50	98,42%	42,86%	2,33	1,0E-04
	9	61,73	59,87%	29,5	93,3	31,77	98,96%	34,86%	2,35	1,0E-04
CONJUNTO 2	1	50,93	49,89%	40,45	136,53	42,60	97,77%	45,08%	1,38	6,9E-05
	2	52,89	51,97%	38,63	137,13	40,93	98,36%	43,31%	3,02	1,3E-04
	3	51,89	50,90%	39,56	145,53	42,29	99,24%	44,75%	3,47	1,5E-04
	4	48,73	47,56%	42,49	141,18	45,26	98,88%	47,89%	3,29	1,5E-04
	5	54,56	53,73%	37,08	141,98	39,85	99,77%	42,17%	2,82	1,2E-04
	6	51,76	50,77%	39,68	144,92	42,00	98,26%	44,44%	3,11	1,4E-04
	7	49,92	48,83%	41,38	146,61	44,03	98,78%	46,59%	2,45	1,1E-04
	8	53,05	52,14%	38,48	135,65	41,36	99,78%	43,77%	2,97	1,3E-04
	9	49,54	48,42%	41,74	149,15	44,23	98,37%	46,80%	4,34	1,8E-04
CONJUNTO 3	1	69,29	71,53%	23,40	83,30	25,10	99,58%	18,75%	1,34	6,1E-05
	2	66,82	68,83%	25,70	85,10	27,30	98,61%	20,79%	2,32	1,6E-04
	3	63,80	65,54%	28,50	89,50	30,30	98,69%	23,04%	3,02	1,3E-04
	4	67,57	69,65%	25,00	82,40	26,60	98,77%	20,19%	1,34	6,1E-05
	5	64,88	66,71%	27,50	89,00	29,60	99,92%	21,96%	1,34	6,1E-05
	6	63,48	65,19%	28,80	88,70	29,90	96,38%	23,81%	2,45	1,2E-04
	7	58,41	59,67%	33,50	94,30	34,50	95,60%	27,91%	3,23	1,7E-04
	8	53,13	53,91%	38,40	98,40	39,50	95,49%	32,02%	1,56	7,1E-05
	9	54,43	55,32%	37,20	98,60	38,80	96,82%	30,63%	2,45	1,12E-4

Fuente: elaboración propia.

10. Datos calculados para el día 3 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	58,74	60,02%	33,20	91,90	34,70	97,03%	27,28%	2,45	1,12E-04
	2	60,68	62,13%	31,40	92,50	33,30	98,45%	25,44%	1,43	6,52E-05
	3	63,15	64,83%	29,10	87,20	31,20	99,53%	23,33%	3,12	1,42E-04
	4	60,57	62,02%	31,50	89,30	32,90	96,96%	25,90%	2,32	1,06E-04
	5	58,63	59,90%	33,30	93,80	35,00	97,57%	27,22%	2,45	1,12E-04
	6	61,32	62,84%	30,80	86,70	32,00	96,45%	25,45%	1,67	7,61E-05
	7	61,43	62,95%	30,70	88,50	32,40	97,97%	24,99%	2,43	1,11E-04
	8	64,23	66,01%	28,10	84,20	29,70	98,12%	22,84%	3,12	1,42E-04
	9	61,00	62,49%	31,10	88,70	32,40	96,71%	25,63%	3,45	1,57E-04
CONJUNTO 2	1	56,56	61,70%	33,60	96,90	36,10	99,74%	26,88%	2,54	1,16E-04
	2	58,23	63,52%	32,00	94,80	34,20	99,21%	25,73%	2,67	1,22E-04
	3	57,91	63,18%	32,30	92,80	34,79	99,99%	25,78%	3,24	1,48E-04
	4	56,97	62,15%	33,20	94,30	35,43	99,07%	26,74%	1,54	7,02E-05
	5	58,54	63,86%	31,70	94,10	34,00	99,57%	25,40%	3,24	1,48E-04
	6	61,57	67,17%	28,80	91,20	31,00	99,92%	23,00%	4,54	2,07E-04
	7	58,02	63,29%	32,20	94,90	34,50	99,46%	25,83%	2,43	1,11E-04
	8	58,44	63,75%	31,80	91,80	33,50	97,79%	25,93%	1,76	8,03E-05
	9	56,56	61,70%	33,60	96,20	35,40	97,80%	27,40%	3,67	1,67E-04
CONJUNTO 3	1	57,60	62,84%	32,60	95,10	35,08	99,89%	26,04%	2,34	1,07E-04
	2	58,12	63,41%	32,10	96,70	34,50	99,77%	25,67%	3,24	1,48E-04
	3	58,75	64,09%	31,50	94,80	33,90	99,90%	25,16%	1,24	5,65E-05
	4	61,36	66,94%	29,00	92,00	31,10	99,55%	23,24%	2,54	1,16E-04
	5	59,48	64,89%	30,80	92,20	33,10	99,76%	24,63%	3,45	1,57E-04
	6	61,47	67,06%	28,90	90,50	30,80	98,93%	23,31%	1,32	6,02E-05
	7	61,15	66,71%	29,20	92,50	31,00	98,55%	23,64%	1,67	7,61E-05
	8	59,59	65,00%	30,70	93,20	32,60	98,58%	24,85%	2,76	1,26E-04
	9	58,44	63,75%	31,80	92,20	33,50	97,79%	25,93%	2,99	1,36E-04

Fuente: elaboración propia.

11. **Datos calculados para el día 4 de evaluación**

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	49,35	53,8	40,50	101,50	43,50	99,71%	32,41%	2,34	1,0E-04
	2	18,42	20,9	70,10	175,20	74,30	98,39%	56,83%	2,45	1,12E-0
	3	14,24	15,53	74,10	182,50	79,00	98,97%	59,74%	1,23	5,6E-05
	4	11,42	12,45	76,80	181,70	81,00	97,91%	62,56%	1,45	6,6E-05
	5	93,50	47,60	98,50	262,20	106,10	99,99%	78,60%	1,54	3,2E-05
	6	25,94	28,30	62,90	161,70	66,60	98,29%	51,05%	2,56	1,7E-04
	7	42,55	46,42	47,00	107,60	50,20	99,15%	37,82%	2,33	1,6E-04
	8	48,61	53,04	41,20	103,30	44,20	99,59%	33,01%	3,45	1,7E-04
	9	48,61	53,04	41,20	103,30	44,30	99,82%	32,94%	3,43	1,5E-04
CONJUNTO 2	1	46,94	51,21	42,80	106,30	45,00	97,60%	34,97%	2,32	1,6E-04
	2	49,76	54,29	40,10	102,80	43,10	99,78%	32,07%	3,22	1,7E-04
	3	51,75	56,46	38,20	99,80	41,00	99,64%	30,59%	1,22	5,5E-05
	4	47,57	51,90	42,20	105,00	44,50	97,89%	34,38%	3,87	1,7E-04
	5	50,70	55,32	39,20	102,80	42,00	99,46%	31,45%	2,67	1,2E-04
	6	51,65	56,34	38,30	103,10	41,00	99,38%	30,75%	1,76	8,1E-05
	7	71,08	77,54	19,70	81,40	21,20	99,90%	15,74%	3,56	1,6E-04
	8	44,85	48,93	44,80	104,90	46,80	96,98%	36,83%	2,54	1,1E-04
	9	49,24	53,72	40,60	105,90	43,20	98,78%	32,79%	1,66	7,7E-05
CONJUNTO 3	1	51,54	56,23	38,40	95,60	41,20	99,60%	30,76%	1,11	5,6E-05
	2	45,90	50,07	43,80	102,30	45,30	96,01%	36,34%	1,34	6,1E-05
	3	52,69	57,48	37,30	97,60	39,60	98,56%	30,19%	2,98	1,6E-04
	4	50,81	55,43	39,10	99,50	41,80	99,24%	31,44%	1,56	7,1E-05
	5	54,47	59,42	35,60	94,70	37,60	98,05%	28,96%	2,78	1,7E-04
	6	54,47	59,42	35,60	93,90	38,30	99,87%	28,44%	2,65	1,1E-04
	7	44,75	48,82	44,90	103,60	47,30	97,79%	36,62%	1,23	5,1E-05
	8	62,62	68,31	27,80	84,70	29,90	99,84%	22,22%	2,33	1,0E-04
	9	55,82	60,90	34,30	92,30	36,20	97,97%	27,92%	3,44	1,5E-04

Fuente: elaboración propia.

12. Datos calculados para el día 5 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	45,92	50,05%	45,10	108,90	48,20	99,21%	36,27%	2,44	1,11E-04
	2	30,30	33,02%	59,60	158,10	63,10	98,28%	48,37%	3,23	1,47E-04
	3	28,04	30,56%	61,70	161,60	65,10	97,95%	50,24%	3,54	1.61E-04
	4	42,69	46,53%	48,10	107,60	49,90	96,31%	39,80%	1,21	5,52E-05
	5	42,04	45,82%	48,70	107,10	50,50	96,26%	40,31%	1,78	8,12E-05
	6	42,47	46,29%	48,30	107,80	50,30	96,68%	39,82%	2,45	1,12E-04
	7	41,07	44,76%	49,60	111,80	52,30	97,88%	40,41%	2,77	1,26E-04
	8	46,24	50,40%	44,80	106,00	47,50	98,43%	36,31%	3,25	1,48E-04
	9	47,75	52,04%	43,40	103,30	46,20	98,82%	35,04%	1,99	9,07E-05
CONJUNTO 2	1	40,10	43,71%	50,50	112,30	53,50	98,65%	98,35%	2,33	1,06E-04
	2	43,55	47,46%	47,30	107,60	49,30	98,76%	96,76%	3,44	1,57E-04
	3	44,73	48,76%	46,20	103,00	49,10	97,98%	98,66%	2,56	1,17E-04
	4	44,73	48,76%	46,20	106,60	49,10	98,55%	98,66%	1,75	7,98E-05
	5	43,01	46,88%	47,80	108,50	50,80	97,45%	98,66%	4,65	2,12E-04
	6	46,78	50,99%	44,30	104,10	47,50	98,56%	99,54%	2,88	1,31E-04
	7	47,21	51,46%	43,90	103,10	47,10	98,67%	99,60%	2,45	1,12E-04
	8	42,69	46,53%	48,10	109,80	50,60	98,23%	97,66%	1,99	9,07E-05
	9	44,41	48,40%	46,50	109,60	49,00	97,34%	97,82%	3,44	1,57E-04
CONJUNTO 3	1	54,86	59,79%	36,80	99,90	39,10	98,63%	29,77%	2,34	1,07E-04
	2	55,94	60,97%	35,80	96,90	38,10	98,80%	28,91%	1,21	5,52E-05
	3	53,67	58,50%	37,90	99,70	40,30	98,71%	30,63%	1,56	7,11E-05
	4	55,18	60,14%	36,50	96,70	38,20	97,16%	29,95%	2,76	1,26E-04
	5	60,46	65,90%	31,60	91,20	34,00	99,88%	25,24%	3,76	1,71E-04
	6	58,31	63,55%	33,60	92,80	35,60	98,36%	27,25%	2,45	1,12E-04
	7	56,80	61,91%	35,00	96,10	37,40	99,20%	28,15%	2,55	1,16E-04
	8	55,07	60,03%	36,60	97,60	38,60	97,90%	29,82%	3,65	1,66E-04
	9	51,20	55,80%	40,20	101,30	42,50	98,14%	32,67%	1,37	6,25E-05

Fuente: elaboración propia.

13. Datos calculados para el día 6 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	52,60	57,33%	38,90	100,40	41,00	97,84%	31,71%	2,34	1,07E-04
	2	50,76	55,33%	40,60	101,50	42,90	98,09%	33,02%	2,66	1,21E-04
	3	51,63	56,27%	39,80	102,70	42,00	97,96%	32,40%	1,53	6,98E-05
	4	55,29	60,26%	36,40	96,70	38,50	98,19%	29,57%	1,87	8,53E-05
	5	56,58	61,67%	35,20	94,80	37,40	98,63%	28,47%	2,45	1,12E-04
	6	51,95	56,62%	39,50	98,90	41,70	98,00%	32,15%	3,87	1,76E-04
	7	49,47	53,92%	41,80	102,80	44,10	97,94%	34,04%	2,45	1,12E-04
	8	52,81	57,56%	38,70	99,20	41,00	98,35%	31,39%	3,22	1,47E-04
	9	55,50	60,50%	36,20	92,20	38,20	97,96%	29,47%	1,98	9,03E-05
CONJUNTO 2	1	53,24	58,03%	38,30	95,79	41,09	99,59%	30,69%	2,54	1,16E-04
	2	55,61	60,61%	36,10	94,90	38,50	99,00%	29,09%	3,76	1,71E-04
	3	61,00	66,49%	31,10	89,00	33,00	98,50%	25,19%	1,36	6,20E-05
	4	61,11	66,60%	31,00	90,10	33,00	98,82%	25,03%	2,83	1,29E-04
	5	53,35	58,15%	38,20	98,90	40,80	99,15%	30,74%	1,95	8,89E-05
	6	57,01	62,14%	34,80	92,30	37,10	98,97%	28,06%	2,67	1,22E-04
	7	56,69	61,79%	35,10	95,00	37,50	99,18%	28,24%	2,22	1,01E-04
	8	56,37	61,44%	35,40	93,40	37,80	99,13%	28,49%	1,65	7,52E-05
	9	56,37	61,44%	35,40	94,80	37,80	99,13%	28,49%	3,24	1,48E-04
CONJUNTO 3	1	55,18	60,14%	36,50	95,20	38,80	98,68%	29,51%	2,45	1,12E-04
	2	58,09	63,31%	33,80	90,00	36,00	98,87%	27,27%	1,54	7,02E-05
	3	60,68	66,13%	31,40	90,80	33,40	98,74%	25,37%	1,34	6,11E-05
	4	57,77	62,96%	34,10	92,30	36,20	98,55%	27,60%	1,65	7,52E-05
	5	54,64	59,56%	37,00	94,70	39,30	98,60%	29,94%	2,92	1,33E-04
	6	59,92	65,31%	32,10	90,90	34,40	99,48%	25,75%	3,54	1,61E-04
	7	57,98	63,20%	33,90	91,20	36,00	98,58%	27,43%	3,22	1,47E-04
	8	55,72	60,73%	36,00	93,10	38,10	98,25%	29,23%	2,87	1,31E-04
	9	54,32	59,21%	37,30	96,00	39,70	98,80%	30,12%	1,54	7,02E-05

Fuente: elaboración propia.

14. Datos calculados para el día 7 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	50,50	55,09%	39,40	102,20	41,70	98,25%	31,99%	2.33	1.06E-04
	2	63,35	69,11%	27,10	87,50	28,70	98,31%	21,99%	2.67	1.22E-04
	3	62,72	68,42%	27,70	88,90	29,60	99,20%	22,28%	3.87	1.76E-04
	4	65,44	71,39%	25,10	87,40	26,50	98,01%	20,43%	1.89	8.62E-05
	5	61,26	66,83%	29,10	93,00	31,00	98,89%	23,48%	1.56	7.11E-05
	6	63,03	68,77%	27,40	87,00	29,10	98,59%	22,17%	2.45	1.12E-04
	7	59,48	64,89%	30,80	90,00	33,00	99,46%	24,71%	2.76	1.26E-04
	8	60,00	65,46%	30,30	88,60	32,30	98,96%	24,43%	1.55	7.07E-05
	9	58,65	63,98%	31,60	89,80	32,80	96,36%	26,13%	3.11	1.42E-04
CONJUNTO 2	1	64,01	69,77%	28,30	91,00	29,80	97,75%	23,09%	2.34	1.07E-04
	2	63,26	68,95%	29,00	88,50	31,00	99,23%	23,32%	2.76	1.26E-04
	3	61,43	66,95%	30,70	93,50	32,80	99,18%	24,70%	1.89	8.62E-05
	4	62,83	68,48%	29,40	89,00	31,30	98,83%	23,73%	2.65	1.21E-04
	5	60,14	65,55%	31,90	92,50	34,10	99,23%	25,65%	2.45	1.12E-04
	6	62,08	67,66%	30,10	92,60	32,30	99,62%	24,11%	1.87	8.53E-05
	7	63,37	69,07%	28,90	89,10	30,80	98,93%	23,31%	1.34	6.11E-05
	8	65,74	71,65%	26,70	87,40	28,60	99,44%	21,42%	3.21	1.46E-04
	9	62,83	68,48%	29,40	88,90	31,40	99,15%	23,66%	3.97	1.81E-04
CONJUNTO 3	1	60,00	65,46%	30,30	87,20	31,60	96,81%	24,95%	2.34	1.07E-04
	2	61,47	67,06%	28,90	90,10	29,80	95,72%	24,05%	2.33	1.06E-04
	3	58,44	63,75%	31,80	90,00	32,60	95,17%	26,60%	1.54	7.02E-05
	4	60,00	65,46%	30,30	89,30	31,60	96,81%	24,95%	1.65	7.52E-05
	5	61,15	66,71%	29,20	89,40	30,00	95,37%	24,38%	3.12	1.42E-04
	6	58,23	63,52%	32,00	89,10	33,30	96,60%	26,40%	2.54	1.16E-04
	7	56,56	61,70%	33,60	92,00	34,40	95,04%	28,14%	1.77	8.07E-05
	8	63,80	69,54%	28,50	88,50	30,40	99,02%	22,96%	3.22	1.47E-04
	9	62,08	67,66%	30,10	91,80	32,20	99,31%	24,18%	2.45	1.12E-04

Fuente: elaboración propia.

15. Datos calculados para el día 8 de evaluación

	No.	PbO Escoria (g)	% PbO fusión	Botón de Pb (g)	Copela con PbO (g)	PbO Absorbido a copela (g)	% PbO Absorbido a Copela	% PbO en Copelación	Pb Doré (ppm)	% PbO Doré
CONJUNTO 1	1	66,38	72,36	26,10	88,90	27,90	99,23%	20,99%	2,34	1,0E-04
	2	66,28	72,24	26,20	87,00	28,00	99,21%	21,07%	2,45	1,1E-04
	3	65,85	71,77	26,60	85,35	28,65	99,99%	21,23%	2,12	9,6E-05
	4	66,82	72,83	25,70	86,00	27,40	98,97%	20,72%	2,56	1,1E-04
	5	66,17	72,12	26,30	86,70	28,10	99,19%	21,16%	1,45	6,6E-05
	6	66,92	72,94	25,60	87,70	27,20	98,63%	20,71%	2,34	1,0E-04
	7	66,06	72,00	26,40	86,50	28,00	98,46%	21,39%	3,76	1,7E-04
	8	67,25	73,29	25,30	85,20	26,70	97,97%	20,60%	1,76	8,0E-05
	9	65,95	71,89	26,50	87,40	28,30	99,14%	21,33%	2,29	1,0E-04
CONJUNTO 2	1	60,89	66,37	31,20	90,50	33,10	98,48%	25,27%	3,44	1,5E-04
	2	57,77	62,96	34,10	91,70	36,30	98,82%	27,53%	2,44	1,1E-04
	3	58,41	63,67	33,50	91,90	35,50	98,37%	27,17%	3,65	1,6E-04
	4	63,91	69,66	28,40	90,80	30,20	98,72%	22,95%	1,45	6,6E-05
	5	58,84	64,14	33,10	92,30	35,00	98,16%	26,90%	1,65	7,5E-05
	6	66,06	72,00	26,40	86,40	28,10	98,81%	21,32%	1,34	6,1E-05
	7	57,77	62,96	34,10	95,20	36,20	98,55%	27,60%	2,78	1,2E-04
	8	56,37	61,44	35,40	97,00	37,90	99,39%	28,42%	3,55	1,6E-04
	9	61,00	66,49	31,10	89,80	33,10	98,80%	25,11%	2,54	1,1E-04
CONJUNTO 3	1	56,37	61,44	35,40	96,20	37,70	98,86%	28,57%	2,12	9,6E-05
	2	61,64	67,19	30,50	88,50	32,50	98,92%	24,60%	3,45	1,5E-04
	3	63,69	69,42	28,60	88,10	30,40	98,67%	23,12%	2,54	1,1E-04
	4	64,12	69,89	28,20	86,00	30,20	99,42%	22,63%	2,43	1,1E-04
	5	54,43	59,32	37,20	95,60	39,70	99,07%	29,96%	1,56	7,1E-05
	6	56,58	61,67	35,20	93,30	37,50	98,90%	28,40%	3,65	1,6E-04
	7	61,97	67,54	30,20	90,40	32,00	98,36%	24,49%	1,47	6,7E-05
	8	55,61	60,61	36,10	94,40	38,50	99,00%	29,09%	2,45	1,1E-04
	9	51,95	56,62	39,50	97,00	42,30	99,41%	31,70%	1,67	7,6E-05

Fuente: elaboración propia.

