

**ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DE UN NUEVO AGENTE LIXIVIANTE COMO
POSIBLE SUSTITUTO DEL CIANURO DE SODIO UTILIZADO EN EL
PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES AUROARGENTÍFEROS.**

LAURA PAOLA RODRÍGUEZ ESLAVA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DE UN NUEVO AGENTE LIXIVIANTE COMO
POSIBLE SUSTITUTO DEL CIANURO DE SODIO UTILIZADO EN EL
PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES AUROARGENTÍFEROS.**

LAURA PAOLA RODRÍGUEZ ESLAVA

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico.

Director

**JHON FREDDY PALACIOS
Ingeniero Metalúrgico, MSc.**

Codirector

**DIONISIO ANTONIO LAVERDE CATAÑO
Ingeniero Metalúrgico, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Es de gran felicidad y satisfacción hoy finalizar una etapa más de mi vida, cumplir un sueño y ver el fruto de un gran esfuerzo, y por ello quiero dedicarle primero que todo este triunfo a Dios por ser mi guía durante todo este trayecto de mi carrera profesional y por darme la fortaleza necesaria cada vez que desistía de mis sueños.

A mi madre **Aura Marina Eslava Camacho** quien con su inmenso amor luchó cada segundo por darme su apoyo incondicional durante esta etapa, por haberme proporcionado la mejor educación, por permitirme cumplir mis sueños, por entenderme siempre que lo necesitaba, por ser mi amiga, mi consejera, mi guía, fuente de inspiración y levantarme después de cada tropiezo, por cada vela encendida y cada oración en la que intercedió por mí.

A mi padre **Héctor Hernán Rodríguez López** por creer en mí, por su apoyo, por brindarme cada día ese cariño de padre, por su esfuerzo para darme lo mejor, por su gran ejemplo de vida y por animarme a seguir adelante, gracias por sentirse siempre tan orgulloso de mí.

A mi amado novio **Fabián Darío Buitrago Mesa** por demostrarme que su afecto y amor son el detonante de mi felicidad, por estar siempre a mi lado, por su confianza, paciencia y por ser mi compañero fiel durante este proceso, por esas traspasadas que pasaba tratando de explicarme una y otra vez lo que no entendía, por sus lindas palabras de ánimo, esto es un sueño compartido y es uno de los tantos logros que alcanzaremos de la mano de Dios.

A mi hermanito **Brayan Rodríguez Eslava** que con sus frases de aliento me daba ánimos para poder continuar en mi formación académica, por confiar en mis conocimientos, porque sé que algún día seré su ejemplo a seguir y espero que pueda aprender grandes cosas de mí, por tantas alegrías y tristezas que compartimos.

En general a mi enorme familia que siempre estuvieron pendientes de mí, gracias a todos y cada uno de los que la conforman por su apoyo, comprensión y amor, este logro también es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme hacer parte de esta familia y por cultivar en mí valores y virtudes con los que voy a salir a enfrentar este mundo, a la escuela de Ingeniería Química gracias por brindarme los conocimientos adquiridos y por enseñarme la importancia de la educación, recalcando siempre la calidad y excelencia.

Al técnico de laboratorio Ambrosio Carrillo por la paciencia y generosidad que me brindó durante el desarrollo del proyecto, gracias por sus aportes, su inmensa bondad y apoyo, porque lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos, gracias señor Ambrosio Dios lo bendiga cada día y le multiplique por mil cada esfuerzo y dedicación que le brinda a cada estudiante.

Al Doctor Dionisio Laverde por darme su confianza y permitirme desarrollar mi tesis con el grupo de investigación GIMBA, gracias por su apoyo en este importante proceso de mi vida.

Al Ingeniero Jhon Freddy Palacios, mi tutor de práctica, gracias por su tiempo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación, he logrado terminar mis estudios con éxito.

A Yury López por la paciencia que me tuvo, por dedicarme un poco de su tiempo cada vez que lo necesitaba y así poder concluir mis análisis, gracias por brindarme los medios necesarios para la realización de este proyecto.

A Isabel Bustamante por su colaboración en la parte experimental durante el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. CONCEPTOS TEÓRICOS	17
1.1 GENERALIDADES DE LOS AGENTES LIXIVIANTES	17
1.1.1 Cianuro	17
1.1.1.1 Uso del cianuro en la producción de Oro	17
1.1.1.2 Proceso de Cianuración	18
1.1.2 Sandioss	19
1.1.2.1 Rango de aplicación en la producción de Oro	20
1.2 BENEFICIO Y TRATAMIENTO PARA EL MINERAL	21
1.2.1 Molienda	21
1.2.2 Caracterización metalúrgica	21
1.2.2.1 Análisis granulométrico	21
1.2.2.2 Distribución de Oro	21
1.2.3 Caracterización Geoquímica	21
1.2.3.1 Ensayo al Fuego	22
1.2.3.1.1 Fundamentos del Ensayo	22
1.2.3.1.2 Etapas del ensayo	22
1.2.4 Absorción atómica	24
1.2.5 Lixiviación	24
1.2.5.1 Variables del proceso	24

1.3	REQUERIMIENTOS AMBIENTALES	26
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
2.1	MUESTRA	28
2.1.1	Secado.....	29
2.1.1.1	Humedad.....	29
2.1.1.2	Determinación de ley del mineral.....	29
2.1.2	Análisis Granulométrico..	30
2.1.2.1	Ley calculada por tamices.....	30
2.1.3	Molienda..	30
2.1.3.1	Determinación Cualitativa de Sales Solubles.....	30
2.1.4	Lixiviación..	31
2.1.5	Lavados.	32
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	34
3.1	PRUEBA DE HUMEDAD	34
3.2	LEY DEL MINERAL	34
3.3	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	35
3.3.1	Ley calculada por tamices.....	36
3.4	PROCESO DE LIXIVIACIÓN	38
3.4.1	Consumo del agente lixiviante.	38
3.4.2	Determinación de Oro y Plata en el proceso de Lixiviación.	42
3.4.3	Ensayo al fuego pos-lixiviación.	48
3.5	CUMPLIMIENTO AMBIENTAL PARA VERTIMIENTOS A RÍOS Y/O QUEBRADAS.....	49
3.6	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS GENERAL.....	51
4.	CONCLUSIONES.....	53

5. RECOMENDACIONES	55
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	57
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS.....	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados obtenidos para el Sandioss mediante Ensayo de Fluorescencia de Rayos X.	19
Tabla 2. Resultados obtenidos para el mineral mediante Ensayo de Fluorescencia de Rayos X.	28
Tabla 3. Prueba de humedad del material.....	34
Tabla 4. Ley del Mineral.	35
Tabla 5. Análisis granulométrico.....	35
Tabla 6. Ley calculada por tamices de Oro y Plata.	37
Tabla 7. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #100 a 1500 r.p.m. [Kg/Tn mineral].	38
Tabla 8. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #100 a 2000 r.p.m. [Kg/Tn mineral].	39
Tabla 9. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m. [kg/Tn mineral].	40
Tabla 10. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #200 a 2000 r.p.m. [Kg/Tn mineral].	40
Tabla 11. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #100 a 1500 r.p.m.....	42
Tabla 12. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #100 a 2000 r.p.m.....	43
Tabla 13. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m.....	44
Tabla 14. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #200 a 2000 r.p.m.....	44
Tabla 15. Ensayo al fuego en para la Malla Tyler #100 después de realizado el proceso de lixiviación.....	48

Tabla 16. Ensayo al fuego para la Malla Tyler #200 después de realizado el proceso de lixiviación.....	48
Tabla 17. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #100 a 1500 r.p.m.	49
Tabla 18. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #100 a 2000 r.p.m.	50
Tabla 19. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m.	50
Tabla 20. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #200 a 2000 r.p.m.	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema desarrollo experimental del proceso de lixiviación.	27
Figura 2. Condiciones variables durante el proceso de lixiviación.	32
Figura 3. Filtro prensa del Laboratorio de Ingeniería Metalúrgica UIS.	33
Figura 4. Curva de distribución granulométrica de la muestra.	36
Figura 5. Distribución de Oro y Plata en representación gráfica del mineral.	37
Figura 6. Consumo de Agente Lixivante para Pasante Malla Tyler #100 y Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m. y 2000 r.p.m.	41
Figura 7. Porcentaje de Disolución de Au y Ag a partir de NaCN y Sandioss.	45
Figura 8. Porcentaje de Oro disuelto en los pasantes Malla Tyler #100 y #200 con sus respectivas velocidades de agitación.	46
Figura 9. Porcentaje de Plata disuelto en los pasantes Malla Tyler #100 y #200 con sus respectivas velocidades de agitación.	47

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. PROCESO DE ENSAYO AL FUEGO.....	67
Anexo B. PROCESO MOLIENDA.....	71
Anexo C. TITULACIÓN PARA CIANURO DE SODIO Y SANDIOSS.....	75

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DE UN NUEVO AGENTE LIXIVIANTE COMO POSIBLE SUSTITUTO DEL CIANURO DE SODIO UTILIZADO EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES AUROARGENTÍFEROS*

AUTOR: LAURA PAOLA RODRÍGUEZ ESLAVA**

PALABRAS CLAVE: MINERÍA, LIXIVIACIÓN, ORO, PLATA, EFECTIVIDAD.

DESCRIPCIÓN:

En Colombia la extracción de metales preciosos como Oro y Plata ha ido desarrollando una dinámica creciente, por lo tanto, cada vez es más importante la investigación de los diversos métodos extractivos, buscando optimizar la recuperación de los recursos disminuyendo los costos, generando así que día a día se presenten nuevos reactivos para la extracción de metales. En este trabajo, se estudia la posible sustitución del Cianuro de Sodio en la extracción de Au y Ag por otro tipo de agente lixivante (Sandioss, de procedencia China), analizando la eficiencia y consumo del reactivo por medio de comparativos en el proceso de lixiviación tradicional alterando algunas de las variables (velocidad de agitación y granulometría), lo que permite determinar las condiciones que presenten mayores porcentajes de disolución de Oro y Plata en la extracción de minerales auroargentíferos, adicionalmente, se consideran las afectaciones ambientales respecto a las concentraciones de algunos metales pesados como Fe, Ni, Cu, Mn, As, Cd, Cr y Zn que permite la norma Colombiana presente en el decreto 3930 de 2010 establecida para los vertimientos a ríos y/o quebradas. Debido a estos análisis, se logró determinar que la eficiencia del Cianuro de Sodio es similar a la del Sandioss presentando porcentajes de disolución en promedio de un 82%, mientras que para la Plata, los porcentajes varían en un promedio de 58% con NaCN y en un 32% con Sandioss.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: MSc. Jhon Freddy Palacios. Codirector: PhD. Dionisio Laverde Cataño.

ABSTRACT

TITLE: STUDY THE EFFECTIVENESS OF A NEW LEACHING AGENT AS A POSSIBLE SUBSTITUTE FOR SODIUM CYANIDE USED IN THE LEACHING PROCESS OF AURIFEROUS MINERALS*

AUTHOR: LAURA PAOLA RODRÍGUEZ ESLAVA**

KEYWORDS: MINING, LEACHING, GOLD, SILVER, EFFECTIVITY.

DESCRIPTION:

In Colombia the extraction of precious metals as Gold and Silver has been developing a growing dynamic, therefore, increasingly researching the various extraction methods is most important, seeking to optimize the recovery of resources decreasing costs, generating so day new reagents for the extraction of metals are presented. In this paper, the possible replacement of Sodium Cyanide in the extraction of Au and Ag is studied by other leaching agent (Sandioss, origin China), analyzing the efficiency and reagent consumption by comparison in the traditional leaching process by altering some of the variables (speed of agitation and particle size), allowing to determine the conditions that have higher percentages of dissolution of Gold and Silver in the extraction of minerals auriferous, additionally, are considered environmental effects of the environmental concentrations of some heavy metals such as Fe, Ni, Cu, Mn, As, Cd, Cr, and Zn allowing the Colombian standard present in the decree 3930 of 2010 established for discharges into rivers and / or streams. Due to these analyzes, it was determined that the efficiency of Sodium Cyanide is similar to the Sandioss showing dissolution percentages on average 82%, while for Silver, the percentages vary by an average of 58% with NaCN and 32% with Sandioss.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Engineering. Physicochemical. School of Chemical Engineering. Principal: MSc. Jhon Freddy Palacios. Co: Ph.D. Dionisio Laverde Cataño.

INTRODUCCIÓN

La extracción de Oro y Plata alrededor del mundo está muy bien organizada, tal es el caso de Colombia que ha desarrollado una dinámica creciente, siendo un país rico en dichos recursos y permitiendo que diversas multinacionales se dediquen a la extracción de estos minerales en base a la demanda y oferta que genera esta práctica. Para la extracción de estos minerales existen diversos métodos, el más común es la extracción con Cianuro de Sodio, ya que permite un alto rendimiento y una buena calidad en el producto deseado [1], [2].

En este trabajo el enfoque se centra en la comparación de dos agentes lixiviantes (Cianuro de Sodio-Sandioss), como el Cianuro de Sodio el cual es utilizado en el proceso de lixiviación en la recuperación de Oro y Plata en la minería, permitiendo separar los componentes solubles del material sólido inerte [3]. Por otro lado, el agente lixiviante Sandioss, puede realizar un trabajo similar al Cianuro presentando efectos reducidos de contaminación ambiental [4].

Centrándose en lo importante que es una producción económica y amigable con el ambiente, a continuación se presenta la metodología (caracterizaciones, condiciones, ensayos, entre otros) para la comparación del porcentaje o grado de efectividad del nuevo agente lixivante “Sandioss” respecto al Cianuro de Sodio en el proceso de lixiviación de minerales auroargentíferos, buscando métodos financieramente fiables y eficientes.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

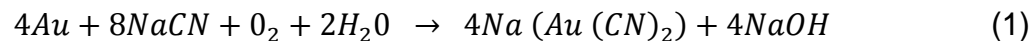
1.1 GENERALIDADES DE LOS AGENTES LIXIVIANTES

1.1.1 Cianuro. El Cianuro es una sustancia química, caracterizada por la presencia de una unidad química formada por el enlace carbono-nitrógeno (CN^-), básicamente, el cianuro se presenta como Cianuro de Hidrógeno (HCN^-), que es un gas, o en forma de cristales como el Cianuro de Sodio (NaCN) o el Cianuro de Potasio (KCN^-), además, el Cianuro de Sodio es empleado intensamente en operaciones auríferas para la disolución o lixiviación de Oro y Plata [5].

1.1.1.1 Uso del cianuro en la producción de Oro. El Cianuro se utiliza en minería para extraer Oro y Plata del mineral, en particular en minerales de baja ley y que no pueden tratarse fácilmente mediante algunos procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad, así mismo, se utiliza en concentraciones bajas como un reactivo de flotación para ayudar a recuperar metales base como; Plomo, Cobre y Zinc [1].

El proceso de disolución de metales se denomina lixiviación. El NaCN se disuelve en agua, en condiciones ligeramente oxidantes que disuelven el Oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene Oro se denomina “solución cargada”, mientras que la solución residual (es decir, carente de Oro) puede recircularse para extraer más Oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos [1].

1.1.1.2 Proceso de Cianuración. La cianuración consiste en la disolución de los metales preciosos (Oro y Plata) en soluciones de cianuro alcalino, para luego precipitarlos a su estado metálico mediante la cementación o la electrodeposición. Este proceso ha sido estudiado desde años atrás por diferentes científicos, y cada uno de ellos ha contribuido al mejor entendimiento de la cinética y termodinámica de la cianuración de los minerales auroargentíferos. Elsner fue el primero en establecer la necesidad de la presencia de oxígeno para la disolución del Oro en soluciones cianuradas [6].



De otro lado, se conoce que la eficiencia de extracción de Oro durante el proceso de cianuración está determinada por el control de los siguientes parámetros [6].

- Concentración de Cianuro.
- pH.
- Concentración de Oxígeno en la solución.

Existen otros parámetros que se deben tener en cuenta durante el proceso como la velocidad de agitación, la granulometría del mineral y la presencia de cianicidas y consumidores de oxígeno. Si la mena contiene elementos consumidores de oxígeno, se recomienda hacer una pre- aireación antes de la adición de Cianuro [6].

1.1.2 Sandioss. Sandioss, de procedencia China, es un producto ecológico que protege el medio ambiente cuidando la calidad de vida del ser humano y se emplea en la extracción de Oro. Este producto, no cambia el proceso y los equipos que se manejan en la cianuración original y se puede utilizar directamente para el beneficio y extracción del mineral de Oro, es una materia prima química ordinaria que no quema, ecológica y segura que permite una operación fácil, un almacenamiento seguro y un transporte cómodo, no es explosivo, no es tóxico y no pertenece a las sustancias corrosivas según lo encontrado en la ficha técnica del producto que ofrece la empresa Shanghai Sandioss New Materials Co., Ltd [4].

En la Tabla 1 se observa en ensayo de Fluorescencia de Rayos X que se le realizó a este agente lixivante con la colaboración del grupo de investigación GIMBA sede Guatiguará de la U.I.S.

Tabla 1. Resultados obtenidos para el Sandioss mediante Ensayo de Fluorescencia de Rayos X.

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Na	11	38,38%	Na ₂ O	51,74%
K	19	19,56%	K ₂ O	23,56%
Fe	26	5,56%	Fe ₂ O ₃	7,96%
Ca	20	1,17%	CaO	1,64%
Cl	17	0,25%	Cl	0,25%
Mn	25	0,17%	SiO ₂	0,22%
Br	35	0,13%	MnO	0,21%
Si	14	0,10%	P ₂ O ₅	0,14%
P	15	0,06%	Br	0,13%
S	16	0,05%	SO ₃	0,12%
Cr	24	0,04%	Cr ₂ O ₃	0,05%
Ni	28	0,03%	NiO	0,03%
Mo	42	0,02%	MoO ₃	0,02%
Zn	30	0,01%	ZnO	0,02%
Cu	29	75 mg/Kg	CuO	94 mg/Kg
As	33	33 mg/Kg	As ₂ O ₃	44 mg/Kg
---			**L.O.I	13,90%

El siguiente elemento fue detectado, sin embargo no pudo ser cuantificado: Al.

Notas:

- Las muestras fueron homogenizadas en un mortero de ágata previo a su respectiva medición.
- Las concentraciones reportadas (semicuantitativo) en la muestra dentificada como Mineral fueron obtenidas asumiendo una matriz completamente oxidada (sugerido por el cliente). *Balance(O) = Balance de las concentraciones a un total de 100%.
- **L.O.I= Loss On Ignition (la muestra identificada como Agente lixivante fue calcinada inicialmente a 200°C durante una hora y posteriormente llevada a 950°C durante dos horas para la determinación de las pedidas por ignición).
- Tanto los elementos como los óxidos están ordenados de mayor a menor concentración.

1.1.2.1 Rango de aplicación en la producción de Oro. Sandioss como reactivo para la extracción de Oro se puede utilizar en los procesos extractivos como la lixiviación en pilas, in situ, por percolación y por agitación en minerales de Oro y óxido de Plata, mineral crudo, minerales que contengan sulfuros, escorias de cianuración y desechos electrónicos [4].

1.2 BENEFICIO Y TRATAMIENTO PARA EL MINERAL

1.2.1 Molienda. Su objetivo es reducir el mineral hasta un tamaño conveniente, en el caso de la lixiviación, para lograr la liberación de las partículas de Oro y de esta manera maximizar la velocidad de reacción y eficiencia de la cianuración, los mecanismos de fractura son principalmente por impacto y abrasión [7].

1.2.2 Caracterización metalúrgica.

1.2.2.1 Análisis granulométrico. Es importante para la determinación de la calidad de molienda, permite establecer el grado de liberación de los minerales útiles de la ganga, en varios tamaños de partícula. Son métodos exactos, seguros y se pueden hacer a cualquier tipo de escala [8].

1.2.2.2 Distribución de Oro. Este ensayo permite determinar las cantidades de Oro que están distribuidas en las diferentes granulometrías para un mineral el cual es tamizado en mallas Tyler buscando conocer en qué tamaño de partícula se encuentra la mayor concentración de Oro y Plata en el mineral, lo que indica el grado necesario de molienda para el proceso [8].

1.2.3 Caracterización Geoquímica. Esta caracterización permite la cuantificación de los minerales útiles y nocivos, lo que permite evaluar la viabilidad de su tratamiento y el grado de dificultad de su extracción [8].

1.2.3.1 Ensayo al Fuego. El ensayo al fuego es el método tradicional que consiste en que el Oro y la Plata de una muestra de mineral son colectados mediante el uso de fundentes y litargirio (PbO), obteniéndose un régulo. Éste es oxidado mediante un proceso de copelación obteniéndose el doré, el cual que es atacado por digestión ácida para su posterior lectura por absorción atómica [9].

1.2.3.1.1 Fundamentos del Ensayo.

- El alto grado de solubilidad de Oro y Plata, en el plomo metálico fundido y su casi completa insolubilidad en escorias de adecuadas composiciones, hacen fácil su atrapamiento [8].
- La marcada diferencia de gravedad específica entre los dos líquidos, plomo y escoria, permiten la separación del régulo de la escoria [8].
- El plomo puede ser prácticamente removido de los metales preciosos, mediante una cuidadosa fusión oxidante, llamada copelación [8].
- La solubilidad completa de Plata y la insolubilidad del Oro en ácido nítrico, permite la determinación del contenido de Oro [8].

1.2.3.1.2 Etapas del ensayo.

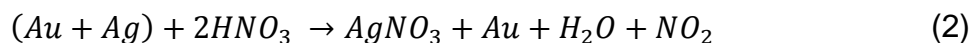
➤ **Tostación.** La tostación, como paso preliminar para la lixiviación, cumple el objetivo de realizar el proceso de transformación de sulfuros a óxidos en los minerales o concentrados de los metales básicos. Esta se hace con el propósito de cambiar los compuestos metálicos insolubles en otros que sean solubles en el agente químico lixivante, así como para volatilizar ciertas impurezas solubles que

podieran contaminar a la solución cargada. También es útil para volver porosos a los compuestos metálicos y hacerlos de esta forma más fácilmente atacables por el disolvente de lixiviación [10].

➤ **Fusión y Lingoteado.** El éxito de esta etapa depende de la formación de una escoria adecuada y ésta a su vez es función de la composición de la carga. Esta carga está elaborada para una mena libre de sulfuros, el resultado de esta etapa es una masa metálica de Plomo-Oro-Plata, conocida como régulo [8].

➤ **Copelación.** Es una fusión en donde el Plomo y otros elementos se oxidan y volatilizan a temperaturas adecuadas, con el fin de obtener un doré de Oro y de Plata [8].

➤ **Ataque químico.** El ataque o digestión que se realiza luego de obtener el doré es con ácido nítrico (HNO_3) diluido en un crisol de porcelana el cual se calienta sin llegar a ebullición hasta disolver la Plata u otros metales en la aleación sin atacar el Oro. Finalmente se recupera el Oro y se calculan los tenores de Oro y Plata. La reacción que ocurre es la siguiente [11].



1.2.4 Absorción atómica. Es una técnica valiosa para la determinación de pequeñas cantidades de Oro u otros metales y minerales. Se realiza por medio de un fenómeno que estudia la espectrofotometría de absorción atómica (EAA) que se puede dividir en dos procesos; i) La producción de átomos libres de la muestra y ii) La absorción de la radiación de una fuente externa por estos átomos [12].

1.2.5 Lixiviación. Se define como una etapa en la que se produce una disolución selectiva de los metales que se encuentran presentes en las especies mineralógicas por medio del uso de una solución acuosa y un agente oxidante, las variables más significativas para el proceso de lixiviación son; tamaño de partícula, velocidad de agitación, temperatura, concentración de reactivos, principalmente. Los procesos de lixiviación involucran diferentes tipos de reacciones de disolución como la óxido-reducción [8].

1.2.5.1 Variables del proceso

➤ **Tamaño de partícula.** En el proceso de lixiviación las partículas tienen que estar libres completamente, por lo cual entre más fina sea la reducción de tamaño (Malla Tyler #100 - #200), mayor será la extracción [8].

➤ **Velocidad de agitación.** El efecto de aumentar la velocidad de agitación, se ve reflejado en un incremento de la velocidad de reacción hasta llegar a un valor límite, debido esto a la reducción del espesor en la capa límite de difusión [8].

➤ **Temperatura.** La disolución del Oro y la Plata tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura de la pulpa, sin embargo, cuando se aumenta la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y también la solubilidad de los metales preciosos generando un extracosto de energía, normalmente se opera a la temperatura ambiente y solo se calienta las soluciones cuando se trata de despojar el Oro del carbón activado, cuando se cianuran concentrados con leyes muy altas o en lixiviaciones que están controladas por la reacción química [13].

➤ **Concentración de reactivos.** Es uno de los factores de mayor cuidado durante el proceso de lixiviación, debido a que los precios de los reactivos son una parte importante de los costos de operación, una optimización de la concentración del reactivo se hace necesaria para minimizar el consumo mientras se obtiene la máxima extracción. En un modelo cinético simple, donde la velocidad de reacción es controlada por difusión y que involucre un solo reactivo, la velocidad de reacción será directamente proporcional a la concentración del reactivo [14].

➤ **Densidad de pulpas.** Depende de factores como; método de preparación del alimento, tamaño requerido de partículas, tipo de mineral, etc. En la mayoría de minerales donde el porcentaje disuelto es poco comparado con el porcentaje de alimento, los porcentajes de pulpa durante la lixiviación no son críticos, aunque si influyen el tiempo promedio de residencia en la agitación [8].

1.3 REQUERIMIENTOS AMBIENTALES

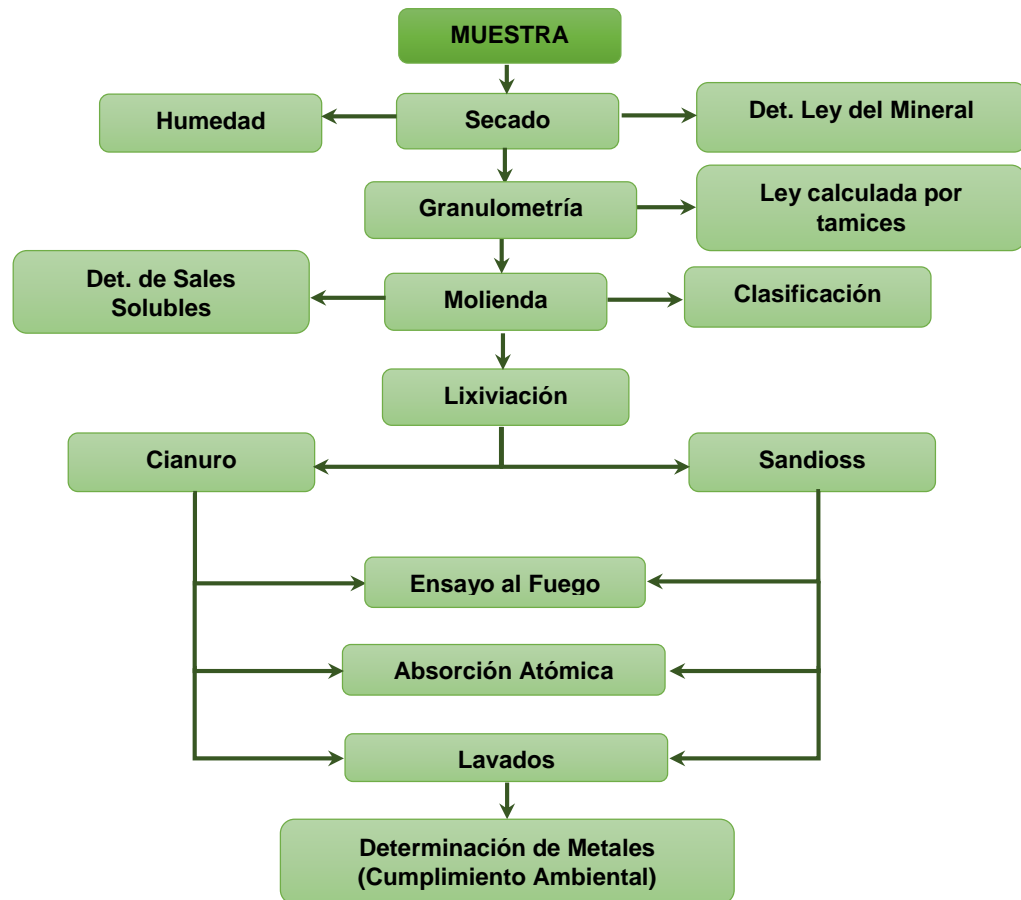
Para determinar la afectación ambiental de los vertimientos del proceso de lixiviación, se deben tener en cuenta los metales pesados, en los que se verifica la toxicidad del elemento y localización dentro de la tabla periódica, en este estudio del cumplimiento de la norma Colombiana presente en el decreto 1594 de 1984 con actualización en el decreto 3930 de 2010 se analizaron los siguientes elementos; Hierro, Níquel, Cobre, Manganeso, Arsénico, Cadmio, Cromo y Zinc [12],[14].

De igual forma los vertimientos se deben realizar a temperaturas menores a 40°C y con un pH entre 5 y 9 [16], [17].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 1 se presenta la secuencia de las etapas realizadas para el desarrollo y ejecución de los objetivos planteados en el marco del proyecto.

Figura 1. Esquema desarrollo experimental del proceso de lixiviación.



2.1 MUESTRA

Se utilizaron 20 Kg provenientes de la minera La Elsy ubicada en el municipio de Vetas - Santander, esta muestra procedía de las colas del lavado que utiliza la minera para la extracción de Oro y Plata. A esta muestra se le realizó Fluorescencia de Rayos X, los resultados de este ensayo observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos para el mineral mediante Ensayo de Fluorescencia de Rayos X.

Elemento	Número atómico (Z)	Concentración
Si	14	18,71%
Fe	26	12,97%
S	16	10,09%
Al	13	4,75%
K	19	1,79%
Ca	20	1,13%
Mg	12	0,93%
Na	11	0,37%
Ti	22	0,35%
Mn	25	0,18%
P	15	0,09%
As	33	0,07%
Zn	30	0,05%
Cu	29	0,04%
Zr	40	0,04%
Cr	24	0,03%
Pb	82	0,03%
Ba	56	0,02%
Sr	38	0,01%
V	23	0,01%
Ni	28	0,01%
Cl	17	92 mg/Kg
Ag	47	83 mg/Kg
Rb	37	54 mg/Kg
*Balance (O)		---

Los siguientes elementos fueron detectados, sin embargo no pudieron ser semicuantificados: Co, W y Sb.

2.1.1 Secado. Se secaron 10 kg de la muestra otorgada en una estufa de bandejas a una temperatura aproximadamente de 110 °C durante un día para eliminar el exceso de agua y luego se procedió a hacer el análisis de humedad.

2.1.1.1 Humedad. La determinación de la humedad (ω) en la muestra se realizó de acuerdo a la norma ASTM-D3173, en donde se secó la muestra durante un tiempo aproximado de 1 hora y se calculó la humedad por medio de la ecuación N° 3 [18] [19].

$$\omega = \frac{W_h - W_s}{W_h - W_c} \times 100 \quad (3)$$

Donde,

W_h : Peso del crisol más la muestra húmeda [g].

W_s : Peso del crisol más la muestra seca [g].

W_c : Peso del crisol [g].

2.1.1.2 Determinación de ley del mineral. Se desarrolló de acuerdo con la norma ASTM-E400 que trata el procedimiento del ensayo al fuego, utilizando tres muestras de 30 g de material, las muestras fueron tostadas a una temperatura entre 500 – 700 °C, posteriormente, fundidas en una mezcla de fundentes, oxidantes y reductores. Seguidamente, el producto metálico fue refundido en una copela a una temperatura de 900 °C de donde se obtuvo un doré de Au y Ag combinados, luego el doré fue atacado con ácido nítrico a diferentes concentraciones (1:7, 1:3, 1:1, concentrado) para determinar la cantidad de Au. Los reactivos, equipos, materiales y procedimiento se detallan en el Anexo A [20].

2.1.2 Análisis Granulométrico. La granulometría se realizó con base en la norma ASTM-C136 tomando una muestra de 500 g a partir de cono y cuarteo para posteriormente ser pasado por un Rotap con 6 tamices serie Tyler (#12, 20, 40, 60, 100, 200) durante 15 minutos aproximadamente y así consecutivamente calcular el peso retenido en cada tamiz para la elaboración de los cálculos de distribución granulométrica [21].

2.1.2.1 Ley calculada por tamices. La distribución de Oro y Plata se elaboró teniendo en cuenta la norma ASTM-E400 tomando 30 g de muestra con el fin de determinar la cantidad de Au y Ag que se encuentran distribuidos en la granulometría del material.

2.1.3 Molienda. Teniendo en cuenta los resultados anteriores y con el fin de liberar las partículas de Oro y Plata, el mineral se sometió a molienda la cual se desarrolló en un molino de bolas donde se utilizaron cuerpos moledores (26 cuerpos en total) de diferentes diámetros (entre 37,71 mm y 18,6 mm), en un período de tiempo de 4 horas aproximadamente (el procedimiento, equipo y materiales se observa en el Anexo B.1).

2.1.3.1 Determinación Cualitativa de Sales Solubles. Se realizó con el fin de encontrar compuestos (sales de hierro, cobre y zinc) que dificulten el proceso de extracción, eliminándolas mediante un lavado del mineral con agua antes de que sea sometido a la cianuración, se tomaron 4 muestras de 500 g del pasante malla Tyler #100 y 4 muestras de 500 g del pasante malla Tyler #200 siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo B.2.

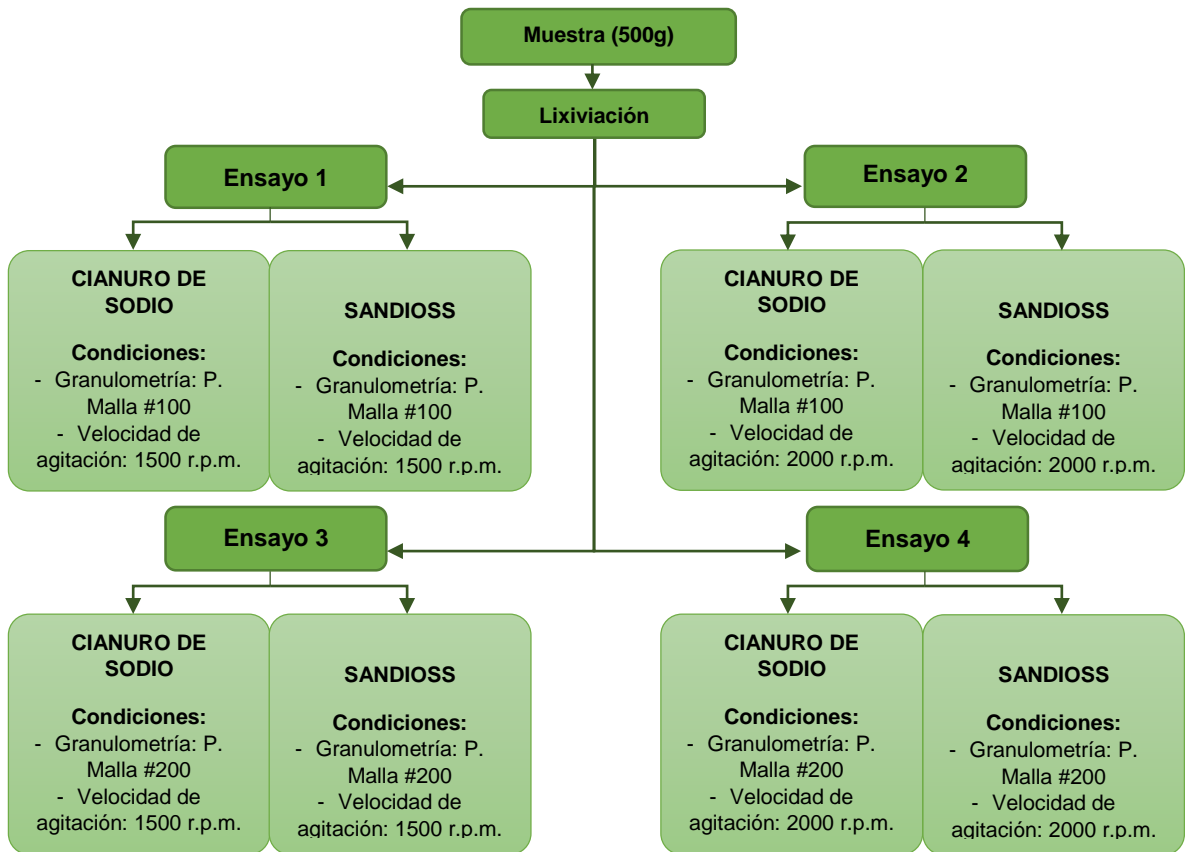
2.1.4 Lixiviación. El proceso de lixiviación que se desarrolló durante esta investigación está compuesto por cuatro ensayos, los parámetros operacionales estables utilizados se escogieron teniendo en cuenta la bibliografía consultada [22] [23].

- Muestra: 500 g
- Concentración de Cianuro de Sodio o Sandioss: 3 g/L
- pH: 11 (ajustado con Cal)
- Densidad de Pulpa: 35% Sólidos
- Tiempo de lixiviación: 72 Horas

Por otro lado, las condiciones variables durante las cuatro etapas del proceso se pueden evidenciar en la Figura 2, en cada fase de este proceso se va calculando el consumo de Cianuro de Sodio y Sandioss mediante titulación (Ver Anexo C.) tomando alícuotas líquidas de 10 ml en tiempos de lixiviación de 1-2-4-8-24-32-28-56-72 horas, en las cuales se realizó un análisis de pH manteniéndolo constante en un rango entre 10 y 11, siendo el caso contrario se ajustó el pH con Cal (CaO) en cada toma de la muestra necesaria.

Cuando se culminó el tiempo de lixiviación se llevaron las muestras líquidas recolectadas al Laboratorio del grupo de investigación "GIMBA" sede Guatiguará en donde se solicitaron pruebas de Espectroscopía de Absorción Atómica, para así determinar la concentración de los metales preciosos disueltos.

Figura 2. Condiciones variables durante el proceso de lixiviación.



2.1.5 Lavados. El proceso de los lavados se realizó utilizando el filtro prensa ubicado en la Planta de Aceros de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la U.I.S, en el cual se introducía cada muestra y se saturaba con agua potable (500 ml) dentro del filtro, como se puede observar en la Figura 3, el filtro tiene una llave que se abre para que pueda ceder el agua contenida dentro de él, también cuenta con un manómetro que se manejó a una presión entre 15 y 20 psi por cada entrada de agua que se introducía al material.

Figura 3. Filtro prensa del Laboratorio de Ingeniería Metalúrgica UIS.



A cada muestra se le realizaron tres lavados en los que cada vez se recolectaba una alícuota líquida para después analizarlas mediante Espectroscopía de Absorción Atómica y poder determinar la concentración que tenía cada metal (Au, Ag, Fe, Ni, Cu, Mn, As, Cd, Cr y Zn); los elementos escogidos para el desarrollo de Absorción Atómica se elaboraron de acuerdo con la norma ambiental que maneja el municipio de Bucaramanga en el vertimiento de metales a ríos y/o quebradas (decreto 3930 de 2010).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 PRUEBA DE HUMEDAD

En la Tabla 3 se observan los resultados de las pruebas realizadas por duplicado para la determinación de la humedad de la muestra de acuerdo con el uso de la ecuación N° 3.

Tabla 3. Prueba de humedad del material.

Muestra	Crisol [g]	Crisol + Muestra Húmeda [g]	Crisol + Muestra Seca [g]	Humedad [%]
1	17,3894	27,7388	26,5376	11,61%
2	19,4430	30,4289	29,1847	11,33%
Promedio:				11,47%

Con los resultados de la Tabla 3 se observa que el mineral posee una humedad de 11.47%.

3.2 LEY DEL MINERAL

En la Tabla 4 se observan los resultados de tres ensayos realizados para determinar la cantidad de Au y de Ag en g/Tn del material.

Tabla 4. Ley del Mineral.

Ensayo	Au [g]	Ag [g]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]
1	0,00033	0,00234	11,00	78,00
2	0,00036	0,00264	12,00	88,00
3	0,00040	0,00266	13,33	88,67
		Promedio:	12,11	84,89

Respecto a los resultados de la Tabla anterior, se visualiza que la cantidad de Oro en la muestra otorgada del material de colas de la empresa La Elsy corresponde a 12.11 g/Tn mientras que la cantidad de Plata es de 84.89 g/Tn.

3.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

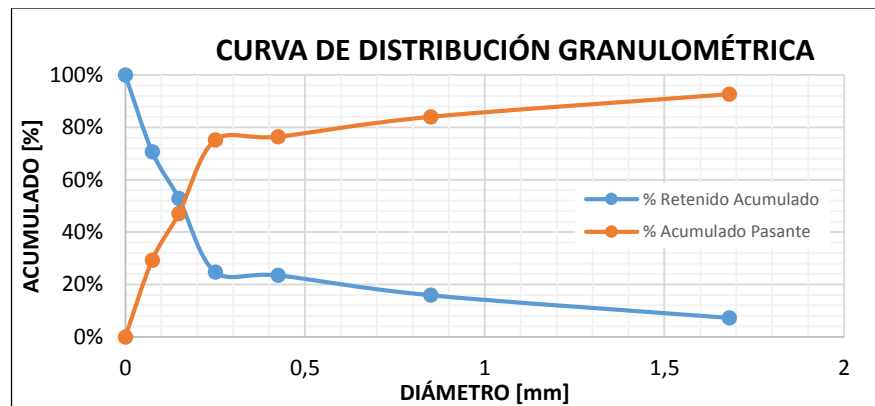
Los resultados del análisis granulométrico presente en la Tabla 5 muestran el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje acumulado pasante que presentó el mineral.

Tabla 5. Análisis granulométrico.

# Malla	Diámetro [mm]	Peso [g]	Retenido [%]	% Retenido Acumulado	% Acumulado Pasante
12	1,68	36,3	7%	7%	93%
20	0,85	43,1	9%	16%	84%
40	0,425	37,9	8%	24%	76%
60	0,25	6,4	1%	25%	75%
100	0,149	140,2	28%	53%	47%
200	0,075	88,5	18%	71%	29%
Base	0	146,3	29%	100%	0%
Total:		498,7	100%		

Según la Tabla anterior, la mayor cantidad de material retenido se encuentra entre los tamices #100 a #200 representando el 75% del total de mineral analizado, a continuación se observa gráficamente el comportamiento de la granulometría.

Figura 4. Curva de distribución granulométrica de la muestra.



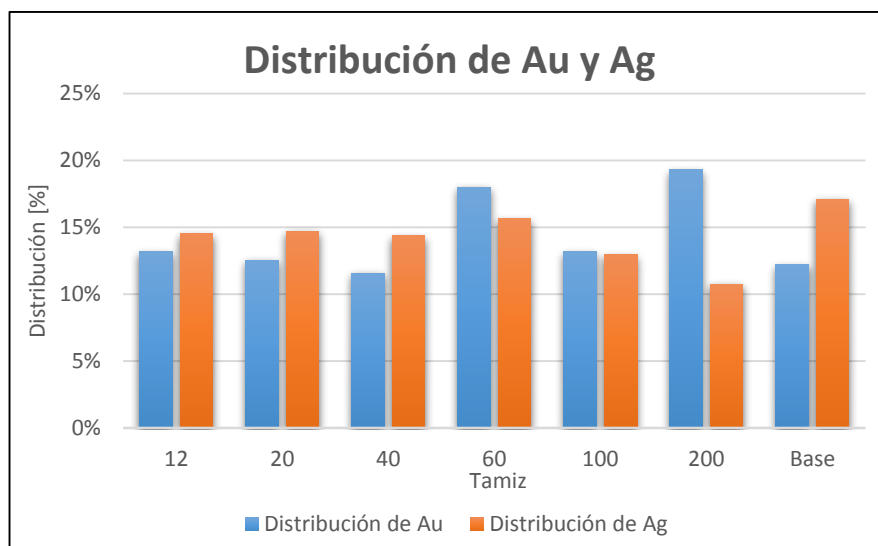
A partir la curva que se muestra en la Figura 4 se obtiene el parámetro D_{50} que representa el diámetro de la abertura del tamiz por el cual pasa el 50% del material, en este caso $D_{50} = 0.16$ mm.

3.3.1 Ley calculada por tamices. Los resultados que se muestran en la Tabla 6 representan la ley calculada por tamices de Oro (14.38 g/Tn) y Plata (100.85 g/Tn) que presenta el material de la minera La Elsy ubicada en el municipio de Vetas – Santander.

Tabla 6. Ley calculada por tamices de Oro y Plata.

# Malla Tyler	Peso de Mineral [g]	Au [g/Tn]	Distribución de Au [%]	Ley del Mineral [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Distribución de Ag [%]	Ley del Mineral [g/Tn]
12	36,3	13,67	13%	496	103,33	15%	3751
20	43,1	13,00	13%	560	104,67	15%	4511
40	37,9	12,00	12%	455	102,00	14%	3866
60	6,4	18,67	18%	119	111,29	16%	712
100	140,2	13,67	13%	1916	92,00	13%	12898
200	88,5	20,00	19%	1770	76,33	11%	6756
Base	146,3	12,67	12%	1853	121,67	17%	17800
Total:	498,7		100%			100%	
Ley Calculada	---	---	---	14,38	---	---	100,85

Figura 5. Distribución de Oro y Plata en representación gráfica del mineral.



En la Figura 5 se muestra el mayor porcentaje (19%) de distribución de Oro en el pasante de la malla Tyler #100, mientras que la Plata se encuentra en mayor proporción (17%) en el pasante de la malla Tyler #200 respecto a las diferentes granulometrías utilizadas durante el ensayo.

3.4 PROCESO DE LIXIVIACIÓN

3.4.1 Consumo del agente lixiviante. Se realizaron pruebas a diferentes velocidades de agitación (1500 r.p.m. y 2000 r.p.m.) durante el periodo de lixiviación con diferentes granulometrías (pasantes malla Tyler #100 y #200), donde se evalúa el consumo de cada agente lixiviante (NaCN y Sandioss) utilizado en el proceso de extracción mediante titulación durante el tiempo de la lixiviación.

La Tabla 7 representa los consumos de los agentes lixiviantes Cianuro de Sodio (4.2 kg/Tn) y Sandioss (17.4 kg/Tn) que se obtuvieron durante el primer ensayo utilizando el pasante malla Tyler #100 con una velocidad de agitación de 1500 r.p.m.

Tabla 7. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #100 a 1500 r.p.m. [Kg/Tn mineral].

Tiempo [H]	Cianuro [kg/Tn]	Acumulado Cianuro [kg/Tn]	pH	Cal [g]	Sandioss [kg/Tn]	Acumulado Sandioss [kg/Tn]	pH	Cal [g]
0	0,0	0,0	11	0,0	0,0	0,0	11	0,0
1	0,0	0,0	11	0,0	3,6	3,6	11	0,0
2	0,0	0,0	11	0,0	1,2	4,8	11	0,0
4	0,0	0,0	11	0,0	0,0	4,8	11	0,0
8	0,8	0,8	11	0,0	1,8	6,6	10	0,5
24	0,0	0,8	11	0,0	2,4	9,0	9	1,0
32	1,8	2,6	11	0,0	1,8	10,8	11	0,0
48	0,0	2,6	11	0,0	3,0	13,8	10	0,5
56	0,0	2,6	11	0,0	2,4	16,2	11	0,0
72	1,6	4,2	11	0,0	1,2	17,4	10	0,5
Total:	4,2	13,6		0,0	17,4	87,0		2,5

La Tabla 8 representa los consumos de los agentes lixiviantes Cianuro de Sodio (12.2 kg/Tn) y Sandiooss (8.4 kg/Tn) que se obtuvieron durante el segundo ensayo utilizando el pasante malla Tyler #100 con una velocidad de agitación de 2000 r.p.m.

Tabla 8. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #100 a 2000 r.p.m. [Kg/Tn mineral].

Tiempo [H]	Cianuro [kg/Tn]	Acumulado Cianuro [kg/Tn]	pH	Cal [g]	Sandiooss [kg/Tn]	Acumulado Sandiooss [kg/Tn]	pH	Cal [g]
0	0,0	0,0	11	0,0	0,0	0,0	11	0,0
1	0,0	0,0	11	0,0	1,8	1,8	11	0,0
2	0,0	0,0	11	0,0	1,5	3,3	11	0,0
4	0,0	0,0	11	0,0	0,6	3,9	11	0,0
8	0,0	0,0	11	0,0	0,9	4,8	11	0,0
24	0,6	0,6	11	0,0	1,2	6,0	7	1,5
32	3,2	3,8	10	0,5	1,2	7,2	8	1,0
48	0,0	3,8	11	0,0	0,0	7,2	9	1,0
56	3,6	7,4	10	0,5	0,3	7,5	7	1,5
72	4,8	12,2	11	0,0	0,9	8,4	7	1,5
Total:	12,2	27,8		1,0	8,4	50,1		6,5

Los consumos de los agentes lixiviantes Cianuro de Sodio (7.7 kg/Tn) y Sandiooss (12.0 kg/Tn) presentes en la Tabla 9 se consiguieron durante el tercer ensayo utilizando el pasante malla Tyler #200 con una velocidad de agitación de 1500 r.p.m., a estas condiciones se obtuvo el menor consumo de los dos reactivos con un promedio de 9.9 kg/Tn.

Tabla 9. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m. [kg/Tn mineral].

Tiempo [H]	Cianuro [kg/Tn]	Acumulado Cianuro [kg/Tn]	pH	Cal [g]	Sandioss [kg/Tn]	Acumulado Sandioss [kg/Tn]	pH	Cal [g]
0	0,0	0,0	11	0,0	0,0	0,0	11	0,0
1	1,7	1,7	11	0,0	1,8	1,8	11	0,0
2	0,0	1,7	11	0,0	1,2	3,0	11	0,0
4	0,0	1,7	11	0,0	2,4	5,4	11	0,0
8	0,5	2,2	11	0,0	0,0	5,4	11	0,0
24	0,2	2,4	11	0,0	1,2	6,6	9	1,0
32	1,8	4,2	11	0,0	0,0	6,6	10,5	0,5
48	0,6	4,8	11	0,0	2,4	9,0	9	0,5
56	1,2	6,0	11	0,0	2,4	11,4	11	0,0
72	1,7	7,7	11	0,0	0,6	12,0	11	0,0
Total:	7,7	32,4		0,0	12,0	61,2		2,0

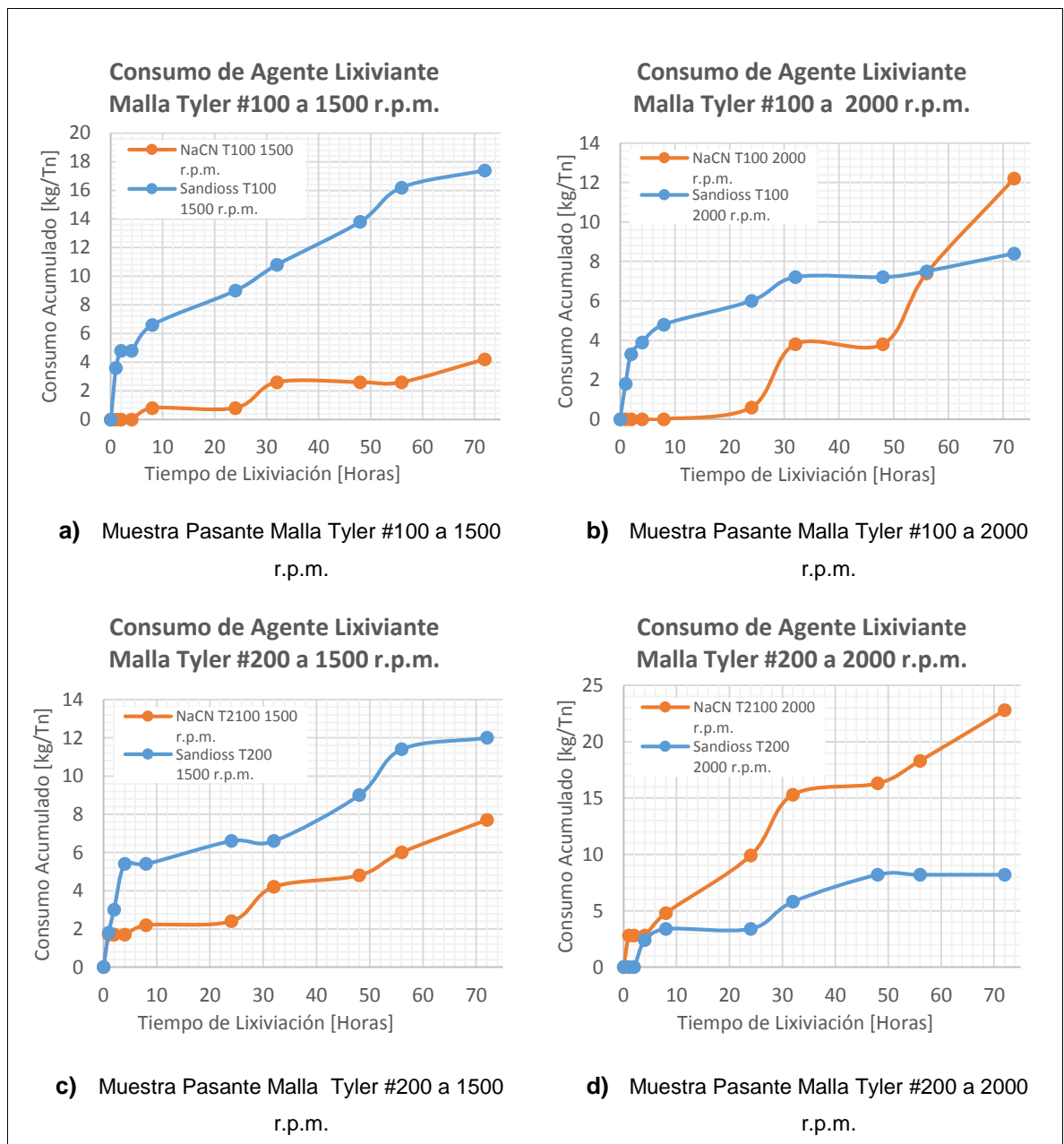
En la Tabla 10 se observan los consumos de los agentes lixiviantes Cianuro de Sodio (22.8 kg/Tn) y Sandioss (8.2 kg/Tn) que se obtuvieron durante el cuarto ensayo utilizando el pasante malla Tyler #200 con una velocidad de agitación de 2000 r.p.m.

Tabla 10. Consumo Agente Lixivante Malla Tyler #200 a 2000 r.p.m. [Kg/Tn mineral].

Tiempo [H]	Cianuro [kg/Tn]	Acumulado Cianuro [kg/Tn]	pH	Cal [g]	Sandioss [kg/Tn]	Acumulado Sandioss [kg/Tn]	pH	Cal [g]
0	0,0	0,0	11	0,0	0,0	0,0	11	0,0
1	2,8	2,8	11	0,0	0,0	0,0	11	0,0
2	0,0	2,8	11	0,0	0,0	0,0	11	0,0
4	0,0	2,8	11	0,0	2,4	2,4	11	0,0
8	2,0	4,8	11	0,0	1,0	3,4	11	0,0
24	5,1	9,9	11	0,0	0,0	3,4	9	1,0
32	5,4	15,3	11	0,0	2,4	5,8	10,5	0,5
48	1,0	16,3	10,5	0,5	2,4	8,2	7	1,5
56	2,0	18,3	10,5	0,5	0,0	8,2	7	1,5
72	4,5	22,8	11	0,0	0,0	8,2	7	1,5
Total:	22,8	95,8		1,0	8,2	39,6		6,0

La Figura 6 representa los consumos del agente lixiviante durante los cuatro ensayos realizados en un tiempo de lixiviación de 72 horas variando las condiciones de granulometría y velocidad de agitación.

Figura 6. Consumo de Agente Lixiviante para Pasante Malla Tyler #100 y Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m. y 2000 r.p.m.



En los cuatro ensayos practicados, el mayor consumo de Cianuro se presentó a 2000 r.p.m. durante un tiempo de lixiviación de 72 horas en la muestra pasante malla Tyler #200 (22.8 kg/Tn), mientras que para el Sandioss se obtuvo en el pasante de la malla Tyler #100 a 1500 r.p.m (17.4 kg/Tn).

3.4.2 Determinación de Oro y Plata en el proceso de Lixiviación. Mediante Espectroscopía de absorción atómica se determinó para las diferentes condiciones (Ver Figura 2) las cantidades de Oro y Plata obtenidas del proceso de extracción durante un tiempo de lixiviación de 72 horas.

De acuerdo a los resultados presentes en la Tabla 11 se puede inferir que el porcentaje de disolución de Oro corresponde a un promedio 82.92% tanto para el Cianuro como para el Sandioss, mientras que para el caso de la Plata el porcentaje con Cianuro de Sodio es 41.05% y para Sandioss es 20.31% presentes en el pasante malla Tyler #100 a una velocidad de agitación de 1500 r.p.m.

Tabla 11. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #100 a 1500 r.p.m.

t [H]	Cianuro		Sandioss		Cianuro		Sandioss	
	% de Au	% de Au Acum.	% de Au	% de Au Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.
1	3.8	3.8	2.4	2.4	2.2	2.2	4.9	4.9
2	7.7	11.5	4.0	6.5	7.6	9.8	3.9	8.8
4	7.7	19.2	7.3	13.7	8.4	18.3	11.3	20.1
8	12.2	31.3	10.4	24.2	11.3	29.5	14.6	34.7
24	16.0	47.4	14.6	38.8	14.3	43.8	12.9	47.6
32	14.1	61.5	18.1	56.9	13.5	57.3	14.9	62.4
48	12.2	73.7	14.6	71.5	14.3	71.7	11.9	74.3
56	12.8	86.5	14.6	86.1	14.1	85.7	14.6	89.0
72	13.5	100.0	13.9	100.0	14.3	100.0	11.0	100.0
Tot:	100.0		100.0		100.0		100.0	
%D*	81.67		84.17		41.05		20.31	

*%D: Porcentaje de Disolución.

Los resultados presentes en la Tabla 12 corresponden a la determinación de Oro y Plata presentes en el pasante malla Tyler #100 a 2000 r.p.m., durante el tiempo de lixiviación de 72 horas el porcentaje de disolución de Oro corresponde en promedio al 84.17% tanto para el NaCN como para Sandioss, mientras que para el caso de la Plata el porcentaje con Cianuro de Sodio es 44.76% y para Sandioss es 20.31%

Tabla 12. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #100 a 2000 r.p.m.

t [H]	Cianuro		Sandioss		Cianuro		Sandioss	
	% de Au	% de Au Acum.	% de Au	% de Au Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.
1	5.7	5.7	2.0	2.0	0.8	0.8	1.8	1.8
2	7.3	12.9	3.1	5.1	10.3	11.1	10.7	12.5
4	11.6	24.6	6.0	11.1	13.4	24.5	4.8	17.3
8	13.5	38.1	12.1	23.3	17.2	41.7	9.2	26.5
24	13.1	51.2	16.6	39.8	11.0	52.7	17.4	43.9
32	12.6	63.7	13.3	53.1	11.4	64.0	13.0	56.9
48	15.0	78.7	15.5	68.5	13.2	77.3	13.8	70.7
56	10.6	89.4	15.5	84.0	11.7	89.0	15.9	86.6
72	10.6	100.0	16.0	100.0	11.0	100.0	13.4	100.0
Tot:	100.0		100.0		100.0		100.0	
%D*	85.00		83.33		44.76		20.31	

*%D: Porcentaje de Disolución.

En la Tabla 13 se observan los resultados que muestran una mayor disolución del metal, estos datos pertenecen al pasante de la malla Tyler #200, utilizando Cianuro y Sandioss con un porcentaje de disolución Oro de 88.16% y 86.84%, mientras que para la Plata un 73.70% y 52.88% respectivamente.

Tabla 13. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m.

t [H]	Cianuro		Sandioss		Cianuro		Sandioss	
	% de Au	% de Au Acum.	% de Au	% de Au Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.
1	8,8	8,8	2,7	2,7	5,1	5,1	5,0	5,0
2	10,6	19,4	4,7	7,3	8,3	13,5	8,4	13,3
4	11,1	30,5	7,7	15,1	8,5	21,9	10,4	23,7
8	11,5	42,0	12,6	27,6	10,2	32,1	4,8	28,5
24	12,3	54,3	15,0	42,6	14,0	46,1	9,5	38,0
32	12,1	66,4	15,7	58,3	14,1	60,2	15,9	54,0
48	12,3	78,8	14,8	73,1	14,1	74,3	18,6	72,6
56	11,3	90,0	14,0	87,1	13,0	87,3	14,4	87,0
72	10,0	100,0	12,9	100,0	12,7	100,0	13,0	100,0
Tot:	100,0		100,0		100,0		100,0	
% D*	88,16		86,84		73,70		52,88	

*%D: Porcentaje de Disolución.

De acuerdo a los resultados presentes en la Tabla 14 se puede inferir que el porcentaje de disolución de Oro corresponde a un promedio 74.34% tanto para el Cianuro como para el Sandioss, mientras que para el caso de la Plata el porcentaje con Cianuro de Sodio es 73.84% y para Sandioss es 36.30% presentes en el pasante malla Tyler #200 a una velocidad de agitación de 2000 r.p.m.

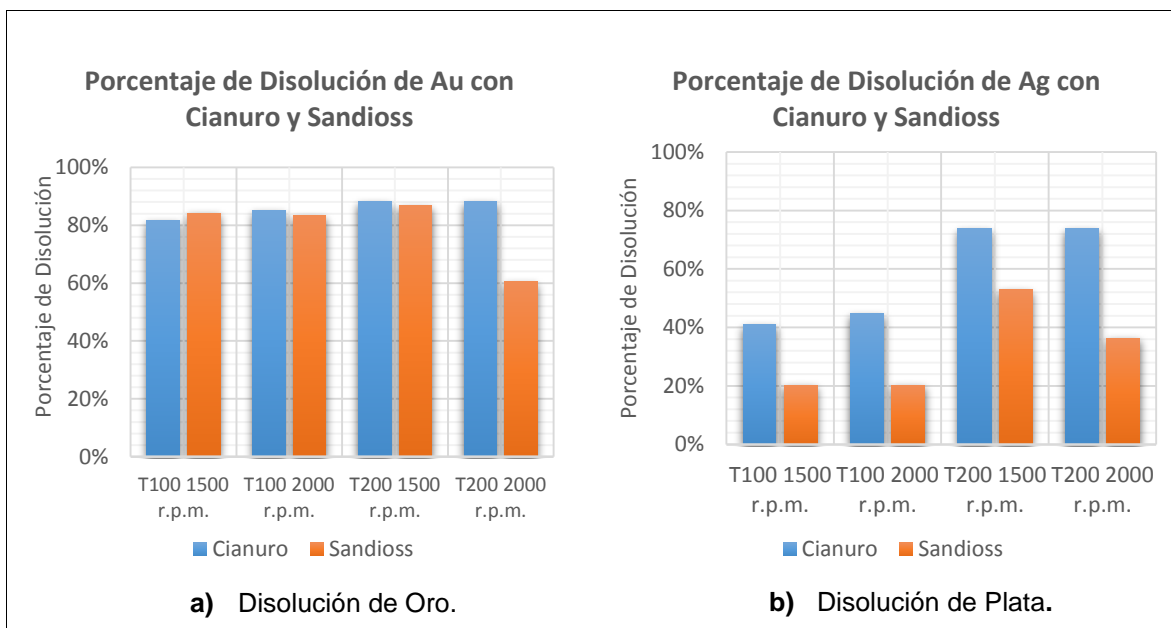
Tabla 14. Determinación de Au y Ag, Malla Tyler #200 a 2000 r.p.m.

t [H]	Cianuro		Sandioss		Cianuro		Sandioss	
	% de Au	% de Au Acum.	% de Au	% de Au Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.	% de Ag	% de Ag Acum.
1	8.5	8.5	4.0	4.0	6.4	6.4	5.7	5.7
2	10.5	19.0	4.5	8.5	6.8	13.2	7.6	13.3
4	12.3	31.3	4.9	13.4	9.2	22.3	1.7	15.0
8	13.6	44.9	9.3	22.6	11.7	34.0	16.2	31.2
24	4.7	49.6	12.4	35.1	4.0	38.0	22.2	53.4
32	11.4	61.0	13.3	48.3	12.1	50.1	9.1	62.5
48	13.0	74.0	16.8	65.1	14.8	64.9	20.1	82.6
56	12.9	86.9	17.3	82.4	17.8	82.7	12.6	95.2
72	13.1	100.0	17.6	100.0	17.3	100.0	4.8	100.0
Tot:	100.0		100.0		100.0		100.0	
%D*	88.16		60.53		73.84		36.30	

*%D: Porcentaje de Disolución.

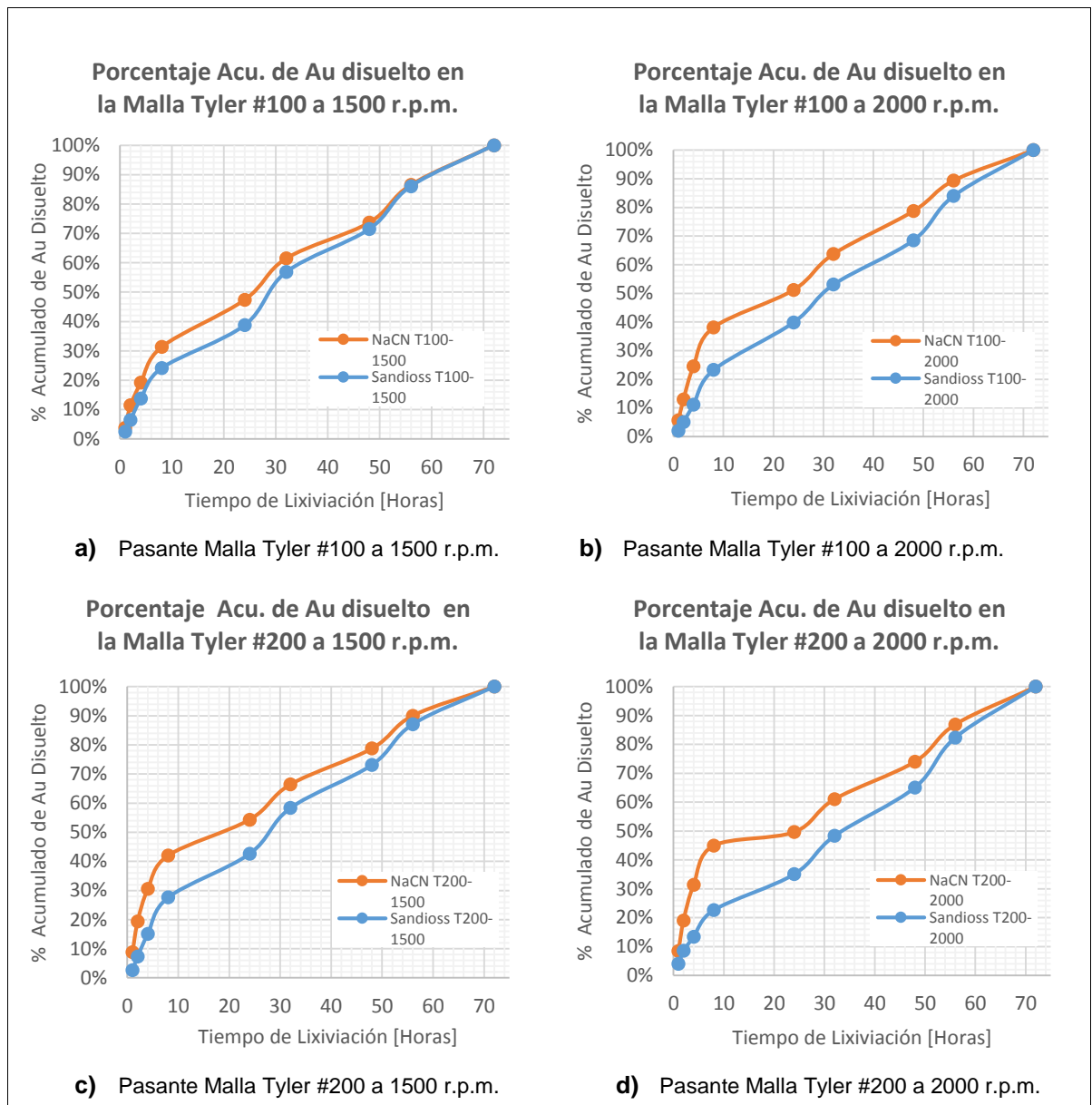
En la Figura 7 se observa que a nivel general con las mismas condiciones de velocidad de agitación y granulometría durante un tiempo de 72 horas los porcentajes de disolución de Oro en promedio son del 82% tanto para el Cianuro como para el Sandioss. En el caso de los porcentajes de disolución de la Plata, se visualiza que con el Cianuro se obtiene un promedio de 58% mientras que con el Sandioss un promedio de 32%.

Figura 7. Porcentaje de Disolución de Au y Ag a partir de NaCN y Sandioss.



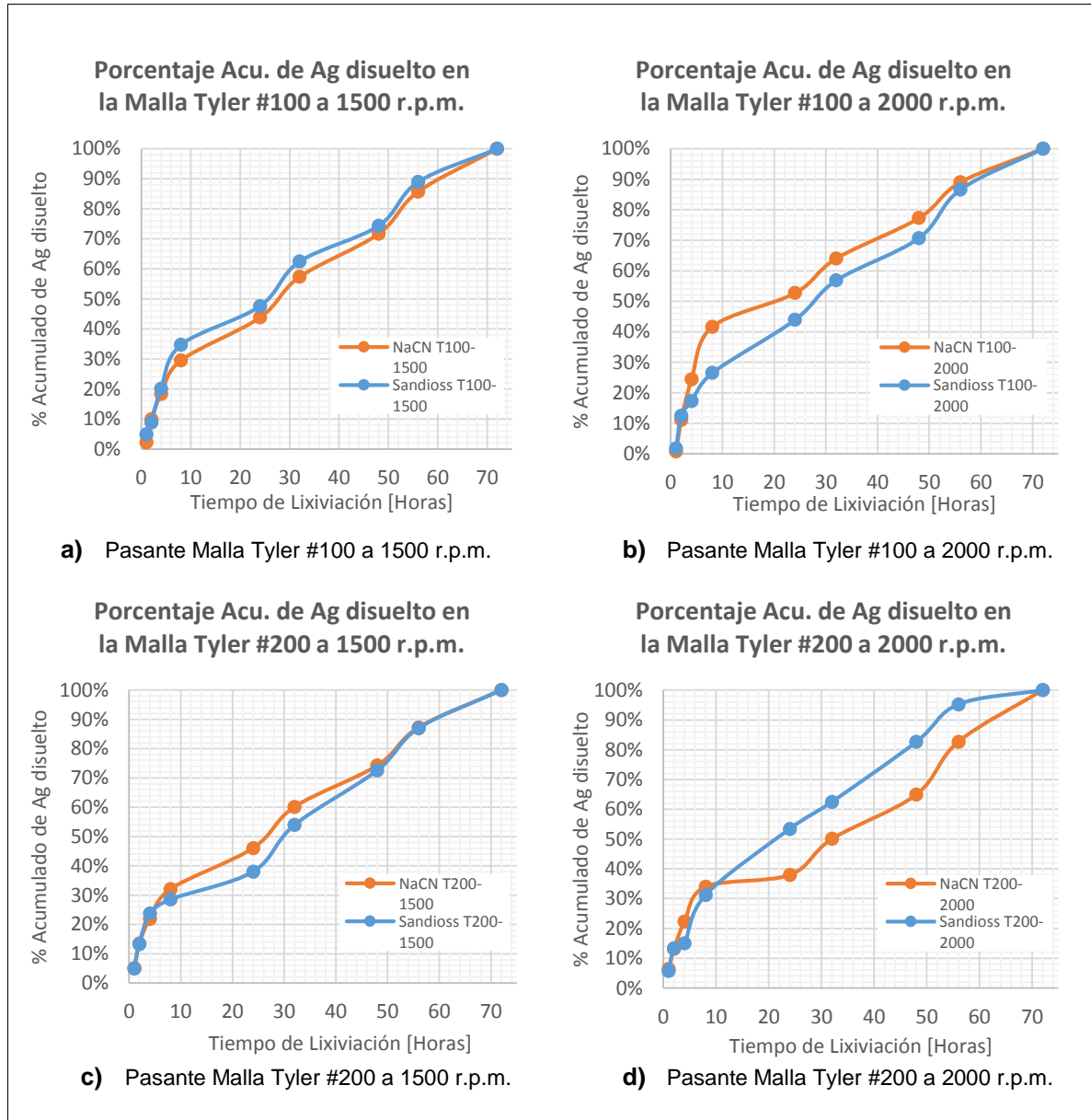
Los porcentajes de Oro disueltos mostrados en las diferentes gráficas de la Figura 8 con las condiciones anteriormente establecidas (Ver Figura 2) indican disoluciones similares presentando mayor efectividad el NaCN con respecto al tiempo de lixiviación en la mayoría de los casos.

Figura 8. Porcentaje de Oro disuelto en los pasantes Malla Tyler #100 y #200 con sus respectivas velocidades de agitación.



Para la Plata, los porcentajes de disolución son similares en los casos a), b) y c) de la Figura 9 mientras que en la gráfica d) existen diferencias respecto al tiempo, con valores de porcentaje de disolución cercanos hasta el 18% en un tiempo de lixiviación de 48 horas aproximadamente.

Figura 9. Porcentaje de Plata disuelto en los pasantes Malla Tyler #100 y #200 con sus respectivas velocidades de agitación.



3.4.3 Ensayo al fuego pos-lixivación. En la Tabla 15 se observan las cantidades de Oro y Plata obtenidas de las colas del proceso de lixiviación mediante ensayo al fuego por duplicado con las condiciones planteadas en la Figura 2.

Tabla 15. Ensayo al fuego en para la Malla Tyler #100 después de realizado el proceso de lixivación.

Muestra	Cianuro a 1500 r.p.m.		Sandioss a 1500 r.p.m.		Cianuro a 2000 r.p.m.		Sandioss a 2000 r.p.m.	
	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]
1	3,00	46,00	3,00	60,33	3,00	42,67	3,33	60,33
2	4,33	44,00	3,33	61,33	3,00	41,67	3,33	61,33
Prom:	3,67	45,00	3,17	60,83	3,00	42,17	3,33	60,83

En la Tabla 16 se muestran las condiciones en las que se obtuvieron menores cantidades de Oro y Plata correspondiendo al pasante de la malla Tyler #200 con velocidades de agitación a 1500 r.p.m. y 2000 r.p.m. utilizando Cianuro de Sodio.

Tabla 16. Ensayo al fuego para la Malla Tyler #200 después de realizado el proceso de lixivación.

Muestra	Cianuro a 1500 r.p.m.		Sandioss a 1500 r.p.m.		Cianuro a 2000 r.p.m.		Sandioss a 2000 r.p.m.	
	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]	Au [g/Tn]	Ag [g/Tn]
1	1,67	31,67	2,00	60,67	1,67	35,33	4,33	77,33
2	1,33	32,33	1,33	54,00	1,33	28,33	5,67	77,67
Prom:	1,50	32,00	1,67	57,33	1,50	31,83	5,00	77,50

3.5 CUMPLIMIENTO AMBIENTAL PARA VERTIMIENTOS A RÍOS Y/O QUEBRADAS

De acuerdo al decreto 3930 de 2010 presente en las normas Colombianas, se representan las concentración de los metales presentes (a temperatura ambiente) en los lavados que se le realizaron al mineral, en ninguno de los casos, las condiciones aplicadas para este trabajo cumplen a totalidad los criterios ambientales luego de aplicar 3 lavados, pero cumplen con la normatividad de pH (5 a 9).

En la Tabla 17 se observan las concentraciones leídas mediante Espectroscopía de a Absorción Atómica presentes en los lavados del pasante malla Tyler #100 a una velocidad de agitación de 1500 r.p.m.

Tabla 17. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #100 a 1500 r.p.m.

Lixiviante	Lavado	Au	Ag	Fe	Ni	Cu	Mn	As	Cd	Cr	Zn	pH
Cianuro	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	1,03	4,30	19,55	0,19	17,88	0,38	1,47	0,00	0,17	1,58	9
	2	0,08	0,00	6,50	0,00	0,89	0,40	2,13	0,00	0,16	0,09	7
	3	0,07	0,00	2,58	0,00	0,44	0,36	2,46	0,00	0,09	0,04	6
Sandioss	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	1,00	2,07	45,80	0,22	12,93	0,34	3,12	0,00	0,14	0,04	7
	2	0,08	0,00	5,17	0,00	0,72	0,39	2,16	0,00	0,19	0,04	6
	3	0,06	0,00	3,18	0,00	0,17	0,37	0,58	0,00	0,13	0,03	5,5
Norma 3930 de 2010		---	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	5 - 9

Las condiciones que se observan en la Tabla 18 representan las concentraciones de los metales pesados obtenidos de los lavados de las colas durante el proceso de lixiviación presentes en el pasante malla Tyler #100 a una velocidad de agitación de 2000 r.p.m.

Tabla 18. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #100 a 2000 r.p.m.

Lixiviante	Lavado	Au	Ag	Fe	Ni	Cu	Mn	As	Cd	Cr	Zn	pH
Cianuro	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	1,76	8,40	72,68	0,49	37,78	0,39	5,83	0,00	0,18	3,81	9
	2	0,14	0,22	6,78	0,00	0,11	0,38	2,10	0,00	0,05	0,09	7
	3	0,07	0,00	2,42	0,00	0,50	0,37	0,71	0,00	0,07	0,05	6
Sandioss	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	2,63	2,25	109,78	0,83	14,18	0,34	4,51	0,00	0,25	0,03	7
	2	0,09	0,00	3,97	0,00	1,20	0,35	1,32	0,00	0,11	0,04	6
	3	0,05	0,00	0,09	0,00	0,05	0,32	0,90	0,00	0,09	0,03	5,5
Norma 3930 de 2010		---	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	5 - 9

La Tabla 19 considera las condiciones de la muestra pasante malla Tyler #200 a 1500 r.p.m. durante el proceso de los lavados de las colas debido a cada agente lixivante.

Tabla 19. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #200 a 1500 r.p.m.

Lixiviante	Lavado	Au	Ag	Fe	Ni	Cu	Mn	As	Cd	Cr	Zn	pH
Cianuro	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	0,47	4,08	12,85	0,46	26,33	0,35	0,00	0,00	0,90	3,66	9
	2	0,08	0,00	3,18	0,00	1,20	0,37	2,11	0,00	0,10	0,09	7
	3	0,08	0,00	1,73	0,00	0,61	0,37	0,41	0,00	0,05	0,04	6
Sandioss	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	1,36	3,20	65,63	0,75	21,35	0,26	3,57	0,00	0,29	0,04	7
	2	0,08	0,00	3,14	0,00	0,76	0,31	2,48	0,00	0,25	0,03	6
	3	0,06	0,00	2,25	0,00	0,20	0,32	2,11	0,00	0,15	0,03	5,5
Norma 3930 de 2010		---	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	5 - 9

Los resultados presentes en la Tabla 20 representan las condiciones que afectan en menor proporción el medio ambiente (Pasante malla Tyler #200 a 2000 r.p.m.) debido a que durante los lavados realizados las concentraciones de los metales son las menores durante los cuatro ensayos practicados resaltando que el Arsénico con el agente lixiviante Sandioss en el tercer lavado se diluyó completamente.

Tabla 20. Cumplimiento Ambiental para la Malla Tyler #200 a 2000 r.p.m.

Lixiviante	Lavado	Au	Ag	Fe	Ni	Cu	Mn	As	Cd	Cr	Zn	pH
Cianuro	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	1,98	19,23	150,43	1,85	94,60	8,85	59,75	0,00	1,58	13,15	9
	2	0,51	3,47	24,00	0,38	16,05	0,39	6,93	0,00	1,55	2,22	7
	3	0,11	0,25	3,40	0,01	2,22	0,36	4,35	0,00	0,07	0,06	6
Sandioss	No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	pH
	1	1,03	0,00	37,98	0,00	2,33	0,35	2,88	0,00	0,19	0,02	7
	2	0,09	0,00	3,04	0,00	0,01	0,32	0,88	0,00	0,16	0,02	6
	3	0,08	0,00	1,38	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,09	0,02	5,5
Norma 3930 de 2010		---	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	5 - 9

3.6 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS GENERAL

El Cianuro de Sodio (NaCN) es el reactivo utilizado por excelencia en la extracción de minerales auroargentíferos representando una alta efectividad en el proceso de lixiviación, pero afectando en gran parte la calidad de vida humana por su toxicidad y contaminación, es por estas razones que en este trabajo se buscó reemplazar este producto por un nuevo agente lixivante llamado Sandioss, de procedencia China que aún en nuestro país no se ha trabajado pero que según la ficha técnica del fabricante indica efectividades similares y que es amigable con el medio ambiente, utiliza los mismos equipos y no requiere ningún cambio en las

condiciones de operación, permitiendo que su transporte sea más seguro y con menores restricciones a la hora de su adquisición. Por lo tanto, se concluye de acuerdo con el trabajo realizado que este reactivo (Sandioss) disuelve porcentajes de Au similares al NaCN, sin embargo es necesario realizar una mayor cantidad de análisis teniendo en cuenta que en los lavados de las colas se presentaron metales tales como Fe, Cu, Mn, As, Cr y Zn con niveles no permisibles de acuerdo con los estipulados en la norma Colombiana presente en el decreto 3930 de 2010.

4. CONCLUSIONES

- Los porcentajes de disolución presentes en el proceso de lixiviación de Oro son similares a las diferentes condiciones analizadas logrando en promedio un 82%, tanto para el Cianuro como para el Sandioss, mientras que para la Plata, los porcentajes varían en un promedio de 58% con NaCN y en un 32% con Sandioss.
- En el proceso de lixiviación estudiado, se observó que el porcentaje promedio de consumo del agente lixiviante Sandioss es mayor con un 60% en comparación del 43% con Cianuro de Sodio, en relación al costo su valor aproximadamente es tres veces mayor al NaCN (21 millones de pesos/Tn a 6 millones de pesos/Tn respectivamente), se debe tener en cuenta que presenta porcentajes de disolución similares, sin embargo es necesario realizar una mayor cantidad de análisis para poder determinar con certeza que el Sandioss presenta un menor grado de contaminación.
- Se observó de acuerdo con la metodología experimental desarrollada, que las mejores condiciones para lograr los mayores porcentajes de disolución en la extracción de Au (88,16% con NaCN y 86,84% con Sandioss) y Ag (73,70% con NaCN y 52,88% con Sandioss) fueron con tamaños de partícula pasante malla Tyler #200 y con una velocidad de agitación de 1500 r.p.m.

- El agua en los lavados de las colas del mineral lixiviado presentó elementos químicos (Ag, Ni y Cd) que contienen concentraciones menores a las permitidas en la reglamentación Colombiana, mientras que los metales que no cumplieron la norma fueron Fe, Cu, Mn, As, Cr y Zn de los analizados en este proyecto, teniendo en cuenta los análisis realizados al mineral se puede inferir que los porcentajes de estos elementos se debe en mayor proporción a la mineralogía del material.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer ensayos teniendo en cuenta la variación de todas las condiciones del proceso de lixiviación (concentración de reactivos, temperatura, densidad de pulpas, velocidad de agitación y granulometría) para lograr mayor certeza en la optimización del proceso de extracción con el agente lixivante Sandioss.
- Es recomendable realizar la lixiviación diagnóstico para futuras muestras, con el fin de conocer el tipo de asociación presente entre los metales preciosos y los minerales que componen la mena aurífera, en donde se reporta si el Oro y la Plata se encuentran libres o asociados incluidos en óxidos, en sulfuros y/o en silicatos.
- Se recomienda realizar estudios en donde se trabaje con menores concentraciones de reactivos con el propósito de evaluar el comportamiento de los porcentajes de extracción de Oro y Plata seguido de las concentraciones de metales pesados que presenten las colas.

- Se sugiere después del proceso de lixiviación utilizando el agente lixiviante SandioSS realizar la precipitación del Au y la Ag para determinar los porcentajes totales de recuperación.

- Para el cumplimiento de la norma ambiental establecida en Colombia, se recomienda elaborar un sistema de tratamiento al lavado de las colas, para lograr la disminución de los metales pesados antes de ser vertidos a las fuentes hídricas.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOGSDON, Mark J. Y AGELSTEIN, Karen et al. El manejo del cianuro en la extracción de oro. Ottawa: ICME, 2001. 47 p.
- [2] CÁRDENAS, Mauricio y REINA, Mauricio. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal. Bogotá D.C.: La Imprenta Editores Ltda., 2008. 130 p.
- [3] UPME. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia: mercurio, cianuro y otras sustancias. Bogotá D.C.: Scripto Impresores S.A., 2007. 60 p.
- [4] SHANGHAI SANDIOSS NEW MATERIALS CO., LTD. Sandioss Non-cyanide Gold Extraction Reagent. Shanghái: Shanghai Sandioss New Materials Co., Ltd, 2010. 22 p.
- [5] GUERRERO, José J. Cianuro: Toxicidad y Destrucción Biológica. En: El ingeniero de Minas. Mayo, 2005. Vol. 10, no. 35, p. 22-25.
- [6] PATIÑO PALLARES, Carlos Alberto. Mejoramiento del control químico analítico en la extracción metalúrgica del oro y de la plata en los laboratorios del grupo de investigación en minerales biohidrometalurgia y ambiente de la UIS. Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2003. 214 p.

- [7] CÁRDENAS REVILLA, Agustín. Metalurgia Extractiva del Oro. Oruro: Imprenta FOCET Ltda., 1994. 340 p.
- [8] GUERRERO GUTIERREZ, Henry Mauricio. Mejoramiento de los procesos de beneficio y tratamiento de minerales auroargentíferos de la zona minera de San Martín de Loba (Mina el eje, Sur de Bolívar). Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2008. 103 p.
- [9] ARGUETA JUÁREZ, Hugo Eligio. Estudio sobre la verificación de condiciones ambientales seguras en el manejo de concentraciones altas de plomo en la prueba de ensayo al fuego para la determinación de oro y plata. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 106 p.
- [10] GALVEZ A., Edelmira. PIROMETALÚRGIA I, Apuntes para alumnos de Ingeniería Metalúrgica. Antofagasta: Universidad Católica del Norte de Chile, 2003. 219 p.
- [11] MÉRIDA CANO, Marvin Eduardo. Evaluación del plomo presente en cada etapa del proceso de la determinación analítica de oro y plata en un laboratorio metalúrgico. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 133 p.

- [12] YÁNEZ TRASLAVIÑA, José Julián. Mejoramiento del proceso de beneficio de minerales auroargentíferos de Mina Vieja en el asentamiento minero de San Pedro Frío. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2002. 20-25 p.
- [13] LLORENTE, J. Y MARTÍNEZ, J. et al. Minería Química. Madrid: ITGE, 1991. 510 p.
- [14] PEÑATE ZÚÑIGA, Yesid Alberto. Desarrollo de correlaciones entre mineralogía y extracción de oro en minerales auríferos mediante datos de lixiviación diagnóstico. Trabajo de maestría Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2004. 209 p.
- [15] CARRILLO PÉREZ, Lisbert Carolina y GÓMEZ GUALDRÓN, Mauricio Alonso. Recopilación, evaluación y análisis de la información para el programa de control de vertimientos industriales con descarga al alcantarillado para el municipio de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniero Sanitario y Ambiental. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Ambiental. Escuela de Ingenierías y Administración, 2008. 104 p.
- [16] COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 (26, Junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte

III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1984. 55 p.

- [17] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 (25, Octubre, 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2010. 29 p.
- [18] FORSYTHE, Warren. Manual de Laboratorio: Física de Suelos. San José (Costa Rica): IICA, 1975. 212 p.
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. D3173-11. West Conshohocken: PA, 2011. 4 p.
- [20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. E400-07. West Conshohocken: PA, 2007. 6 p.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. C136-05. West Conshohocken: PA, 2005. 5 p.
- [22] CARRILLO SANDOVAL, Matha Isabel. Estudio comparativo de la lixiviación de dos minerales auroargentíferos (oxidado y sulfurado) con Cianuro y

Tiourea. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2013. 70 p.

- [23]** ARDILA REY, Jose Daniel. Mejoramiento de la recuperación metalúrgica de concentrado aurífero en la sociedad minera la ELSY LTDA., del municipio de Vetas, departamento de Santander. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2013. 66 p.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. E400-07. West Conshohocken: PA, 2007. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. C136-05. West Conshohocken: PA, 2005. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. D3173-11. West Conshohocken: PA, 2011. 4 p.

ARDILA REY, Jose Daniel. Mejoramiento de la recuperación metalúrgica de concentrado aurífero en la sociedad minera la ELSY LTDA., del municipio de Vetas, departamento de Santander. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2013. 66 p.

ARGUETA JUÁREZ, Hugo Eligio. Estudio sobre la verificación de condiciones ambientales seguras en el manejo de concentraciones altas de plomo en la prueba de ensayo al fuego para la determinación de oro y plata. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 106 p.

CÁRDENAS REVILLA, Agustín. Metalurgia Extractiva del Oro. Oruro: Imprenta FOCET Ltda., 1994. 340 p.

CÁRDENAS, Mauricio y REINA, Mauricio. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal. Bogotá D.C.: La Imprenta Editores Ltda., 2008. 130 p.

CARRILLO PÉREZ, Lisbert Carolina y GÓMEZ GUALDRÓN, Mauricio Alonso. Recopilación, evaluación y análisis de la información para el programa de control de vertimientos industriales con descarga al alcantarillado para el municipio de Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniero Sanitario y Ambiental. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Ambiental. Escuela de Ingenierías y Administración, 2008. 104 p.

CARRILLO SANDOVAL, Matha Isabel. Estudio comparativo de la lixiviación de dos minerales auroargentíferos (oxidado y sulfurado) con Cianuro y Tiourea. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2013. 70 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 (26, Junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1984. 55 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 (25, Octubre, 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2010. 29 p.

FORSYTHE, Warren. Manual de Laboratorio: Física de Suelos. San José (Costa Rica): IICA, 1975. 212 p.

GALVEZ A., Edelmira. PIROMETALÚRGIA I, Apuntes para alumnos de Ingeniería Metalúrgica. Antofagasta: Universidad Católica del Norte de Chile, 2003. 219 p.

GUERRERO GUTIERREZ, Henry Mauricio. Mejoramiento de los procesos de beneficio y tratamiento de minerales auroargentíferos de la zona minera de San Martín de Loba (Mina el eje, Sur de Bolívar). Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2008. 103 p.

GUERRERO, José J. Cianuro: Toxicidad y Destrucción Biológica. En: El ingeniero de Minas. Mayo, 2005. Vol. 10, no. 35, p. 22-25.

LLORENTE, J. Y MARTÍNEZ, J. et al. Minería Química. Madrid: ITGE, 1991. 510 p.

LOGSDON, Mark J. Y AGELSTEIN, Karen et al. El manejo del cianuro en la extracción de oro. Ottawa: ICME, 2001. 47 p.

MÉRIDA CANO, Marvin Eduardo. Evaluación del plomo presente en cada etapa del proceso de la determinación analítica de oro y plata en un laboratorio metalúrgico. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 133 p.

PATIÑO PALLARES, Carlos Alberto. Mejoramiento del control químico analítico en la extracción metalúrgica del oro y de la plata en los laboratorios del grupo de investigación en minerales biohidrometalurgia y ambiente de la UIS. Trabajo de grado Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2003. 214 p.

PEÑATE ZÚÑIGA, Yesid Alberto. Desarrollo de correlaciones entre mineralogía y extracción de oro en minerales auríferos mediante datos de lixiviación diagnóstico. Trabajo de maestría Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2004. 209 p.

SHANGHAI SANDIOSS NEW MATERIALS CO., LTD. Sandioss Non-cyanide Gold Extraction Reagent. Shanghái: Shanghai Sandioss New Materials Co., Ltd, 2010. 22 p.

UPME. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia: mercurio, cianuro y otras sustancias. Bogotá D.C.: Scripto Impresores S.A., 2007. 60 p.

YÁNEZ TRASLAVIÑA, José Julián. Mejoramiento del proceso de beneficio de minerales auroargentíferos de Mina Vieja en el asentamiento minero de San Pedro Frío. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2002. 20-25 p.

ANEXOS

Anexo A. PROCESO DE ENSAYO AL FUEGO

A.1 Reactivos

- Litargirio.
- Bórax.
- Carbonato de Sodio.
- Harina de Trigo.
- Ácido Nítrico (1:7, 1:3, 1:1, concentrado).

A.2 Equipos y Materiales

- Balanza
- Mufla
- Campanas extractoras
- Pinzas para crisol
- Pinzas para manejo de copelas, crisoles y platos de arcilla
- Guantes y delantal de asbesto
- Careta
- Lingoteras
- Yunque

- Martillo
- Crisol de arcilla
- Platos de arcilla
- Copelas
- Plancha de calentamiento
- Crisol de porcelana
- Vidriería

A.3. Procedimiento

A.3.1 Tostación de la Muestra

- Se realiza cono y cuarteo hasta obtener una muestra de 30 g.
- Mantener encendida la campana extractora y el lavador de gases durante toda la prueba.
- Colocar una muestra en el plato de arcilla y llevar a la mufla a una temperatura entre 500 y 700 °C. Agitando la muestra con una espátula por fuera de la mufla cada 10 minutos hasta la eliminación de azufre (se observa un color rojizo de la muestra y desaparición de olor característico).
- Sacar de la mufla y dejar enfriar.

A.3.2 Fusión de la muestra

- Preparar una carga de mezcla de fundentes, oxidantes y reductores, (Litargirio [45 g], Bórax [7 g], Carbonato de sodio [37 g], Harina de trigo [5 g]) dicha carga debe ser de granulometría fina.

- En un crisol de arcilla mezclar vigorosamente la carga con la muestra tostada y cubrir con bórax.
- Colocar en una mufla a 1100 °C (la mufla debe estar precalentada a una temperatura de mínimo 800 °C) por un tiempo aproximado de 75 minutos.
- Vaciar el contenido en una lingotera precalentada sobre el exterior de la mufla.
- Dejar enfriar y separar con un martillo la fase metálica de la escoria apoyándose en un yunque. Darle forma de cubo.

Figura A 1. Proceso de fusión de la muestra.



a) Mineral Tostado.



b) Preparación de las Cargas.



c) Vertido en lingotera.



d) Fase metálica de la escoria.

A.3.3 Copelación

- Calentar las copelas en la mufla a 900 °C por 20 minutos.
- Introducir el botón metálico, sobre la copela y esperar a que se evapore el plomo, permitiendo el ingreso de aire.
- Sacar la copela sin dejar evaporar la plata del doré resultante (el instante preciso de sacar la copela es cuando la gota fundida pierde el brillo metálico, se conoce como apagado).
- Laminar y pesar el doré que contiene Oro y Plata en la balanza analítica de cinco cifras decimales.

Figura A 2. Copelación y doré combinado de Oro y Plata.



A.3.4 Ataque Químico

- Llevar el doré a un crisol de porcelana.
- Atacar en caliente con ácido nítrico en una relación 1:7, 1:3, 1:1 y luego concentrado, hasta que no se observe reacción y la solución sobrante.
- Enjuagar con agua destilada caliente libre de cloruros, secar y dejar enfriar.
- Pesar el residuo que corresponde al Oro de la muestra en una balanza analítica de cinco cifras decimales.

Anexo B. PROCESO MOLIENDA

B.1 Molienda y Clasificación

B.1.1 Equipos y Materiales

- Rotap.
- Molino de bolas.
- Balanza analítica.
- Tamices serie Tyler.

B.1.2 Procedimiento

- Pesar 1 kg de mineral.
- Moler hasta obtener pasante malla Tyler #100 y malla Tyler #200.
- Separar en fracciones granulométricas (-100 +200 y -200), por medio del tamizado en rotap.

Figura B 1. Molino de bolas y Clasificador del Laboratorio de Metalúrgica, UIS.



a) Molino de bolas.



b) Clasificador con tamices #100 y #200.

B.2 Determinación Cualitativa de Sales Solubles

B.2.1 Reactivos

- Ferrocianuro de Potasio [$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ 1N (105.6 g/L)].
- Ferrocianuro de Potasio [$K_4Fe(CN)_6$ 1N (109.7 g/L)].

B.2.2 Equipos

- Balanza.

- Plancha con agitación magnética.

B.2.3 Materiales

- Vasos de precipitado.
- Magnetos.
- Embudos.
- Papel filtro.
- Tubos de ensayo.
- Goteros.

B.2.4 Procedimiento

- Pesar 500g de muestra y transferir a un recipiente de 2000 ml.
- Adicionar agua hasta que la muestra quede saturada al 100%.
- Dejar decantar durante un tiempo de dos horas y volver a cambiar el agua.
- Filtrar con papel filtro.
- Sacar 10 ml de la muestra filtrada y agregar dos gotas de cada reactivo indicado anteriormente.

Figura B 2. Prueba Cualitativa de Sales Solubles.



a) Prueba con Ferricianuro.



b) Prueba con Ferrocianuro.

B.2.5 Clasificación de las Sales

B.2.5.1 Sales ferrosas. En un vidrio de reloj con 5 ml de la muestra filtrada adicionar 2 gotas de ferricianuro de potasio 5%, la aparición de un precipitado azul intenso indica la presencia de sales ferrosas.

B.2.5.2 Sales férricas. En otro vidrio de reloj con 5 ml de la muestra filtrada adicionar 2 gotas de ferrocianuro de potasio, la aparición de un precipitado amarillo verdoso indica la presencia de sales férricas.

Anexo C. TITULACIÓN PARA CIANURO DE SODIO Y SANDIOSS.

C.1 Reactivos

- **Nitrato de plata:** Se disuelve 1.7333 g de reactivo ($AgNO_3$) en 1 dm^3 de agua destilada, se trabaja por conveniencia en ml.
- **Rodamina (Solución indicador):** Se diluye 0.1 g de rodamina en 100 ml de acetona analítica.

C.2 Equipos y materiales

- Una bureta volumétrica de 25 ml.
- Un soporte de bureta.
- Un gotero.
- Una probeta de 10 ml.
- Un vaso de precipitado.
- Un Erlenmeyer de 250 ml.
- Papel filtro franja azul.
- Un embudo.

C.3 Procedimiento

- Sacar una muestra representativa de la solución lixiviada en un vaso de precipitado y filtrarla en el Erlenmeyer con la ayuda de un embudo.

- Cuando se tenga la muestra clara, medir en la probeta los 10 ml de solución al cual se va a realizar la titulación.
- Usar el gotero para absorber 2 gotas de Rodamina o agente indicador y verterlo en la solución anteriormente preparada.
- Gotear lentamente la solución tituladora ($AgNO_3$) agitando la probeta hasta observar algún cambio de color.
- Cuan la solución cambia de un color amarillo claro a rosado fuerte en el caso de trabajar con el NaCN y rosado claro en el caso de trabajar con el Sandioss se le da punto final a la valoración.
- Calcular el consumo del agente de prueba mediante el siguiente cálculo.

$$x = C_i - \frac{C_i * V_t}{V_i} \quad (4)$$

Dónde,

x : Cantidad de Agente Lixivante a reponer.

C_i : Concentración de Agente Lixivante inicial [g/L]

V_t : Volumen medido en el tiempo t ; ($t=0, 1, 2, \dots, 72$) de $AgNO_3$ [ml]

V_i : Volumen inicial de $AgNO_3$

Figura C 1. Titulaciones de los Agentes Lixivantes.



a) Titulación con Cianuro de Sodio.



b) Titulación con Sandioss.