

**TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE LA NEUTRALIZACIÓN
DE CIANURO EN EL PROCESO DE BENEFICIO DE ORO EN EL SUR DEL
DEPARTAMENTO DE BOLIVAR-COLOMBIA**



**DÍAZ DURANGO LUZ KARIME
PÉREZ MENDOZA LAURA VIVIANA**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2016

**TRATAMIENTO DE LODOS PROVENIENTES DE LA NEUTRALIZACIÓN
DE CIANURO EN EL PROCESO DE BENEFICIO DE ORO EN EL SUR DEL
DEPARTAMENTO DE BOLIVAR-COLOMBIA**

DÍAZ DURANGO LUZ KARIME

PÉREZ MENDOZA LAURA VIVIANA

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Trabajo de Investigación y/o
Extensión, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero ambiental**

Directores

JOSÉ LUIS MARRUGO NEGRETE, PhD

IVÁN DAVID URANGO CÁRDENAS, MSC

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA**

2016



**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN AGUAS QUÍMICA
APLICADA Y AMBIENTAL
LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN
AMBIENTAL**

Rumbo a la
**ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
TRABAJOS DE GRADO - Restricciones de Uso
DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL – PROHIBICIÓN DE
REPRODUCCIÓN**

Todo el material contenido en este documento está protegido por la Constitución Política de Colombia, y las Leyes sobre propiedad intelectual concerniente a Derechos de Autor existentes en Colombia.

El uso de imágenes (figuras, mapas, fotografías, entre otras), tablas y demás elementos contenidos en este documento, que sea objeto de protección de la propiedad intelectual será únicamente para usos educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo, mencionando el autor o los autores. Cualquier uso distinto como el lucro o beneficio, reproducción, edición o modificación, entre otros aspectos, incurrirá en violación a la ley y estará sujeto a las sanciones que se establezcan con el fin de proteger los derechos del titular de la propiedad intelectual.



Comprometida con el desarrollo regional

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería Córdoba NIT. 891080031-3 www.unicordoba.edu.co 1964-2014

Telefax: 7860577 ext. 261 - e-mail: dptoquimica@unicordoba.edu.co

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Yo, Laura Viviana Pérez Mendoza dedico este proyecto a Dios que me permitió vivir y disfrutar de cada detalle diario. A mis padres Alfonso Pérez y Athyz Mendoza que siempre me apoyan y me aconsejan a seguir adelante ante cualquier problema. A mis abuelitos que a pesar de su rápida partida, siempre me motivaban a ser la mejor y principalmente a mis hermanos que son el mayor motivo para mi progreso.

Yo Luz Karime Díaz Durango dedico este proyecto a Dios, por ser fuente de sabiduría y acompañamiento todo los días. A mi madre Lourdes por ser mi gran compañía en este largo camino de la vida, mi aliada, mi ejemplo incondicional y a mi padre Gustavo por su gran apoyo moral. A mi amiga Laura, por su colaboración en la elaboración del proyecto.

Agradecimientos especial a:

Agradecemos sinceramente a nuestros asesores de tesis PhD José Luis Marrugo y MSC Iván David Urango Cárdenas, por su esfuerzo y dedicación.

Agradecimientos:

Cada uno de los autores de este trabajo agradecemos inmensamente a las personas y entidades que construyeron con información presentada en este trabajo.

A la Universidad de Córdoba por darnos acceso a la formación superior con excelentes bases científicas y al laboratorio de toxicología por brindarnos el espacio y las herramientas necesarias para desarrollar nuestro proyecto de investigación.

Al grupo de toxicología y gestión ambiental, German Rojas, Profesora Saudith Burgos, Daniela Márquez, Lorena Almario, José Salazar, José Joaquín y Ángel, gracias por su apoyo.

A mis amigos Valeria Durante, Mauricio Rosso, Leonardo Reyes y el resto de estudiantes de décimo semestre del programa de ingeniería ambiental.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
INTRODUCCIÓN.....	18
1. REVISIÓN DE LITERATURA	20
1.1 EL CIANURO EN LA PRODUCCIÓN DE ORO.....	21
1.1.1 Química del cianuro.....	21
1.1.2 Proceso de neutralización de cianuro.....	24
1.2 METALES PESADOS EN LA MINERÍA DE ORO.....	27
1.2.1 Toxicidad y propiedades de los metales pesados.....	27
1.2.2 Lavado de metales pesados en lodos	29
2. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	32
2.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	34
2.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS MUESTRAS	34
2.3.1 Caracterización de pH, Conductividad y Materia orgánica de las muestras.....	34
2.3.2 Caracterización de metales pesados.....	35
2.3.3 Caracterización de Cianuro.....	36
2.4 LAVADO DE LODOS.....	36
2.4.1 Lavado con ácidos inorgánicos	37

2.4.2 Lavado con peróxido de hidrógeno.....	39
2.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE LAVADO.....	40
2.6 BENEFICIOS AMBIENTALES EN LA APLICACIÓN DEL PROYECTO.	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	43
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.....	44
3.2 LAVADO DE LODO ÁCIDO CLORHÍDRICO.	48
3.3 LAVADO DE LODO CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO H ₂ O ₂	62
3.4 BENEFICIOS AMBIENTALES EN LA APLICACIÓN DEL PROYECTO.	68
4. CONCLUSIONES.....	73
5. RECOMENDACIONES.....	76
6. BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXO	87

LISTAS DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Límites máximos de metales pesados totales permitidos en los lodos aplicados a distintos suelos de Australia, Estados Unidos, Chile y Europa.	88
Anexo B. Resultados obtenidos en el lavado con ácido para la remoción de metales pesados (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As).	89
Anexo C. Resultados de metales pesados (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) obtenidos en el lavado con peróxido de hidrogeno.	90
Anexo D. Resultados de Biodisponibilidad de metales después (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) del lavado con HCl.	91
Anexo E. Resultados de cianuro obtenidos en el lavado con ácidos.	92
Anexo F. Resultados de cianuro obtenidos en el lavado con peróxido de hidrogeno.	92
Anexo G. Pruebas estadísticas para el lavado con HCl.	93
Anexo H. Prueba estadísticas para el lavado con peróxido de hidrogeno.	101
Anexo I. Conductímetro	107
Anexo J. Electrodo de Ion selectivo de cianuro.	108
Anexo K. pHmetro.	108
Anexo L. Equipo de absorción atómica por llama.	109
Anexo M. Montaje de destilación para cianuro total.	109
Anexo N. Lavado con Peróxido de Hidrógeno.	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aspectos ambientales de algunos metales pesados.....	28
Tabla 2. Extractantes utilizados para el lavado de suelo y lodos	29
Tabla 3. Porcentaje de remoción de los agentes de lavado en el estudio realizado en Atenas Grecia. Tomada de: Moutsatsou et al. 2005	30
Tabla 4. Diseño experimental del lavado con ácido clorhídrico	38
Tabla 5. Diseño experimental del lavado con peróxido de hidrogeno.....	40
Tabla 6. Matriz de Impactos ambientales en la minería de oro en Colombia. Tomada de: UPME 2005	42
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de la muestra de lodo.....	45
Tabla 8. Biodisponibilidad de metales (Hg, Cd, Pb, Fe, Zn y As).	47
Tabla 9. Concentración residual de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As usando HCl 1 M	49
Tabla 10. Concentración de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCL 3 M	50
Tabla 11. Concentración de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCL 6M.....	51
Tabla 12. Biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCl 1 M.....	56
Tabla 13. Biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCl 3 M.....	56
Tabla 14. Biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCl 6 M.....	57
Tabla 15. Remoción de cianuro después de lavado con ácido	60
Tabla 16. Remoción CN ⁻ total con peróxido de Hidrogeno H ₂ O ₂	62
Tabla 17. Resultados de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As con relación 1 de H ₂ O ₂	64
Tabla 18. Resultados de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As con relación 2 de H ₂ O ₂	64
Tabla 20. Beneficios del sistema de lavado.....	69

LISTAS DE GRÁFICOS

Pág.

Gráfico 1. Porcentaje de extracción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) asociada a las fracciones 1, 2 y 3 de Tessier.	46
Grafico 2. Remoción de Metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCL 1 M.....	49
Grafico 3. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCL 3 M	50
Grafico 4. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCL 6 M.....	52
Grafico 5. Variación de la remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) a diferentes concentraciones de HCl.....	54
Grafico 6. Porcentaje de extracción en las Fases 1, 2 y 3 después de lavado a tres horas de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCL 1 M.....	58
Grafico 7. Porcentaje de extracción de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As en las Fases 1, 2 y 3 después de lavado a tres horas con HCL 3 M	59
Grafico 8. Porcentaje de extracción de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As en las Fases 1, 2 y 3 después de lavado a tres horas con HCL 6 M	59
Grafico 9. Concentración de cianuro después de lavado con HCl	61
Grafico 10. Remoción CN⁻ total con H₂O₂.....	63
Grafico 11. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con relación 1.2g H₂O₂:2.3g CN	65
Grafico 12. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con relación 12g H₂O₂:2.3g CN	66
Grafico 13. Comparación de relaciones de peróxido a tres horas de lavado.....	67

LISTAS DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo típico de plantas tradicionales de extracción de oro. Tomada de: Ortiz y Delgado 2009	22
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio	33
Figura 3. Metodología utilizada para el tratamiento de lodos procedentes del beneficio de oro.....	37
Figura 4. Reactor de lavado de lodos procedentes del beneficio de oro	41

REFERENCIA DE SIGLAS Y ABREVIACIONES

As: Arsénico.

Cd: Cadmio.

cm: centímetros

CN: Cianuro.

CNO: cianato

Co: cobalto

Cu: cobre

DAD: disociables en ácidos débiles

Fe: Hierro.

g: gramos

H₂O₂: Peróxido de Hidrogeno.

HCl: Ácido Clorhídrico.

HCN: Ácido Cianhídrico.

Hg: Mercurio.

kg: kilogramos

L: litro

M: Molar

mg: miligramos

mL: mililitros

NaOH: hidróxido de sodio

Ni: níquel

Pb: Plomo.

PIB: Producto interno bruto.

Ppm: Partes por millón.

rpm: revoluciones por minuto

SO₂: Dióxido de azufre.

Zn: Zinc.

RESUMEN

En Colombia la minería de oro genera muchos residuos ricos en contaminantes tóxicos que no cuentan con gestión adecuada, como los lodos del proceso de neutralización de cianuro, que además de contar con altas concentraciones de cianuro, sus niveles de metales no son la excepción. Este estudio presenta una alternativa de tratamiento para estos lodos, a través del lavado con HCl (1 M, 3 M y 6 M) y H₂O₂ (1.2 g H₂O₂:2.3 g CN⁻ y 12 g H₂O₂:2.3 g CN⁻) a 1, 2 y 3 horas, para remover sustancias como Hg, Pb, Cd, Fe, Zn, As y CN⁻. Los lodos se trataron así: lavado con HCl, enjuague con agua, lavado con peróxido y enjuague con agua. Teniendo en cuenta las mejores remociones, las condiciones adecuadas para el tratamiento son HCl 6 M y una relación 1.2 g H₂O₂: 2.3 g CN⁻ durante tres horas cada lavado, dando como resultados remociones de 97.77% de CN⁻, 65.2%Hg, 96.6%Pb, 22%As, 51% Fe, 22.6% Cd y 94.24% Zn. Cabe resaltar que aproximadamente el 99% de la concentración de los metales estudiados, se encuentran asociados a la fase residual (oxidables y asociados a silicatos), indicando que en su totalidad después del lavado aplicado no son biodisponibles en el suelo en donde se depositará.

Palabras Clave: Metales pesados, biodisponibilidad, cianuro, HCl, H₂O₂.

ABSTRACT

In Colombia the gold mining produces many rich toxic waste pollutants that doesn't have proper management, such as sludges of neutralization process of cyanide, also they have high concentration of cyanide, and their levels of metals are not an exception. This research introduces an alternative treatment to this sludges, by washing with HCl (1 M, 3 M and 6 M) and H₂O₂ (1.2 g H₂O₂: 2.3 g CN⁻ and 12 g H₂O₂: 2.3 g CN⁻) to 1, 2 and 3 hours to remove substances like Hg, Pb, Cd, Fe, Zn, As and CN⁻. The sludges treatment is: washing with HCl, washing with water, washing with H₂O₂ and washing with water again. From the best removals, the proper conditions to this treatment are HCl 6M and a relation of 1.2 g H₂O₂: 2.3g CN⁻ during three hours each washing, presenting removals of 97.77%CN⁻, 65.2%Hg, 96.6%Pb, 22%As, 51% Fe, 22.6% Cd and 94.24% Zn. Worth nothing that approximately 99% of concentration of the metals studied, they are associated to the residual phase (oxidizable and associated silicates), showing after washing that they won't be bioavailable in the soil.

Key words: heavy metals, bioavailable, cyanide, HCl, H₂O₂

INTRODUCCIÓN

La extracción de metales preciosos genera un auge en el crecimiento económico de los países, lo que provoca mayor interés en incrementar la práctica de esta actividad en diferentes modalidades, como por ejemplo, la minería de oro. En Colombia, la actividad minera en el primer trimestre del 2015 aumento un 4.2% del PIB del país, con una producción aproximada de 8455 kg de oro, del cual el 5.2% es aportado por el departamento de Bolívar, especialmente, la zona sur del departamento (4.92%) (SIMCO 2015). Las metodologías utilizadas para la obtención de este metal precioso son amalgamación o cianuración, siendo la primera la más empleada. Sin embargo, con la restricción del uso de mercurio según lo establecido en la ley 1658 del 2013, se induce a un aumento de la extracción por cianuración como un método alternativo, económico y simple (Logsdon et al. 2001). Dentro de este proceso de beneficio del metal, se debe neutralizar el cianuro para obtener el oro, generando consigo lodos con alta carga de contaminantes como cobre (Cu), hierro (Fe), cianuro (CN), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), entre otros, los cuales son depositados a medios abióticos sin gestión y tratamiento adecuado, provocando efectos nocivos que limitan el uso de los suelos. Afectan las aguas superficiales y subterráneas, degradan la flora y la fauna, y restringen

los derechos de las poblaciones locales de usar tales recursos, sin correr el riesgo de afectar su salud (Yupari 2001).

Al implementar como tratamiento el lavado a lodos, se puede disminuir la concentración de los metales y el cianuro, usando agentes quelantes y oxidantes, de tal forma que el lodo remediado tenga la posibilidad de ser depositado o contenido sin provocar un riesgo de contaminación (Ortiz et al. 2007). Cabe agregar, que su bajo costo y rápida implementación permite el fácil acceso por parte de los mineros, reduciendo problemas legales y ambientales (Volke y Velasco 2005).

El objetivo de este trabajo, fue evaluar el tratamiento de lavado para los lodos residuales de la neutralización de cianuro generados en el proceso de beneficio de oro, en una mina en la zona sur del departamento de Bolívar-Colombia, implementando un sistema de lavado secuencial con HCl y H₂O₂, con base en su eficiencia para remover metales tóxicos y cianuro; de igual forma se realizó la evaluación de la biodisponibilidad de metales en los lodos finales, con el fin de verificar el potencial impacto hacia los ecosistemas al momento de la disposición final de los mismos.

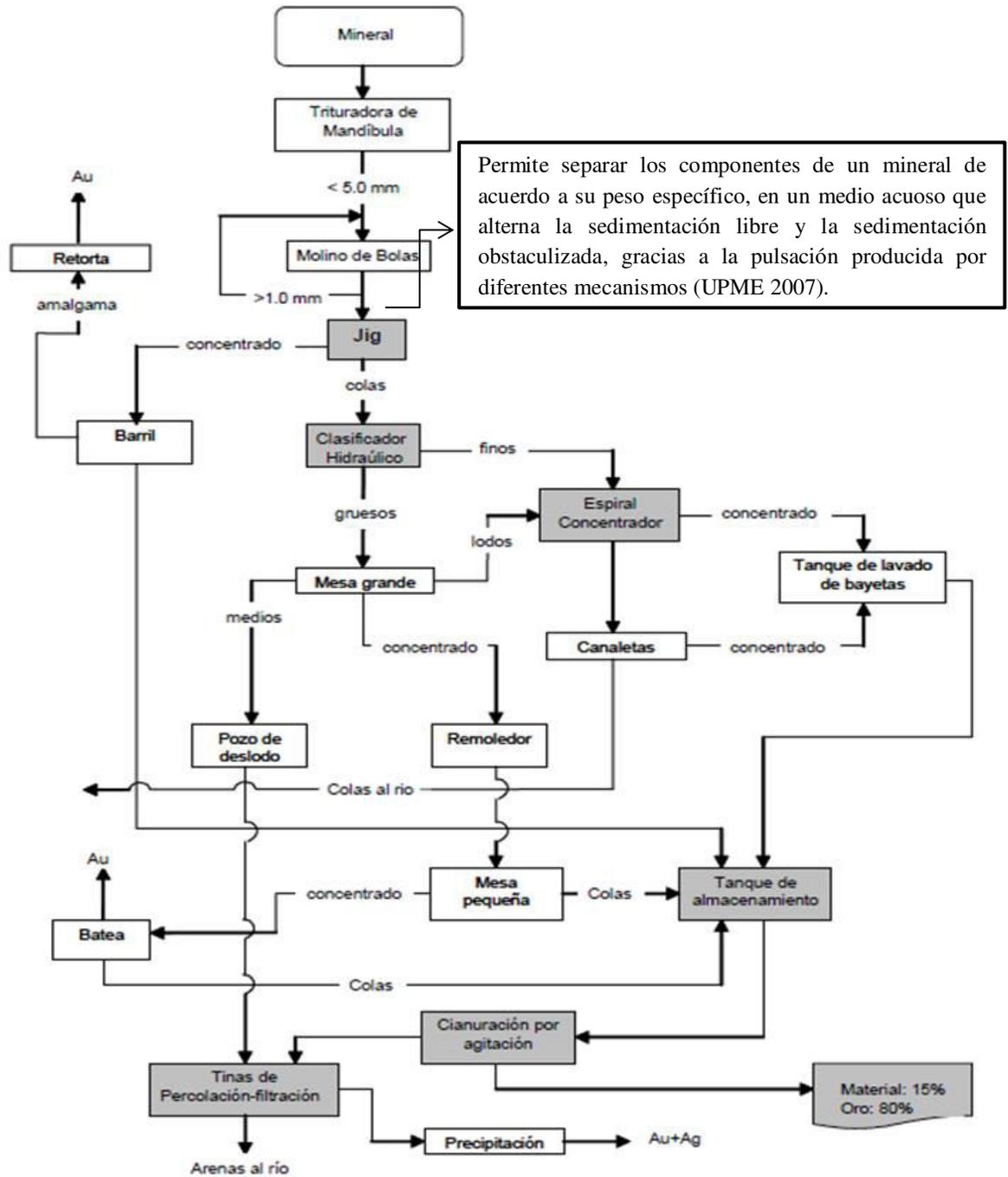
1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 EL CIANURO EN LA PRODUCCIÓN DE ORO

Anualmente se utiliza más de un millón de toneladas de cianuro, del cual, el 18% de la producción mundial es usado en la minería en todo el mundo, en su mayoría para la recuperación de oro (Ortiz y Delgado 2009). Las operaciones de minería de oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón) para el proceso de disolución de metales, el cual se denomina lixiviación. El cianuro de sodio disuelve el oro contenido en el mineral, esta solución resultante que contiene el oro se denomina “solución cargada”. Luego se agrega zinc o carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro extrayéndolo de la solución. La solución residual o “estéril” (es decir, carente de oro) puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos (Logsdon et al. 2001). En la **figura 1** se presenta un diagrama de flujo del proceso típico de una mina tradicional de extracción de oro.

1.1.1 Química del cianuro

El cianuro es una molécula que se encuentra en la naturaleza en gran variedad de formas. El anión cianuro, formado por un átomo de carbono y uno de nitrógeno, presenta un enlace σ , dos enlaces π y dos orbitales antienlazantes desocupados, sin embargo su comportamiento pseudohalógeno no puede explicar la formación de complejos cianurados con los metales de la serie de transición como Fe, Co, Ni, Cu y Zn. Por otra parte, el ión cianuro tiene también un triple enlace que puede romperse fácilmente, siendo el responsable de su elevada reactividad (Ortiz y Delgado 2009).



Permite separar los componentes de un mineral de acuerdo a su peso específico, en un medio acuoso que alterna la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada, gracias a la pulsación producida por diferentes mecanismos (UPME 2007).

Figura 1. Diagrama de flujo típico de plantas tradicionales de extracción de oro. Tomada de: Ortiz y Delgado 2009

Después de la extracción de oro, el cianuro puede estar presente en tres tipos de compuestos: cianuro libre, cianuro débilmente complejado y cianuro fuertemente complejado. Juntos, estos compuestos de cianuro constituyen el “cianuro total” (Logsdon et al. 2001).

Cianuro Libre: Es el término utilizado para describir tanto el ion de cianuro (CN^-) que se disuelve en el agua del proceso, como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Las briquetas sólidas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion de sodio y el anión de cianuro (CN^-). El anión de cianuro se combina luego con el ion de hidrógeno para formar HCN molecular. Casi todo el cianuro libre está presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrógeno presentes, es decir, a un valor de pH de 8 o menos (Logsdon et al. 2001).

Complejos de cianuro: Los complejos débiles de cianuro, con frecuencia denominados cianuros “disociables en ácidos débiles” o cianuros DAD (WAD), pueden disociarse en solución y producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre. Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado al cual se disocian estos complejos depende en gran medida del pH de la solución. Por otra parte, los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro DAD en condiciones químicas y físicas normales. Los complejos de cianuro con oro, cobalto y hierro son fuertes y estables en solución. Esta estabilidad del complejo oro-cianuro es un factor clave en el uso del cianuro para la extracción del oro del mineral (Ortiz y Delgado 2009).

Cianato: El cianato (CNO^-) es un producto generado durante el procesamiento de minerales, debido a la reacción entre el ión cianuro y el oxígeno, o durante el tratamiento de efluentes que contienen cianuro por medio de un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno, el ión hipoclorito o algunos otros. El cianato es estable en condiciones básicas pero se descompone en medio ácido para generar iones amonio (Gómez 2012).

1.1.2 Proceso de neutralización de cianuro

La neutralización de cianuro generalmente se aplica a las arenas residuales provenientes del proceso de cianuración. Teniendo en cuenta la reacción violenta de algunos neutralizantes con estos residuos, es necesario realizar un tratamiento a las arenas cianuradas para poder realizar el proceso de neutralización. Este método se aplica a través de los siguientes pasos (Fajardo 2010):

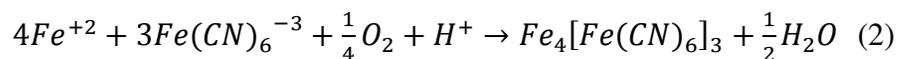
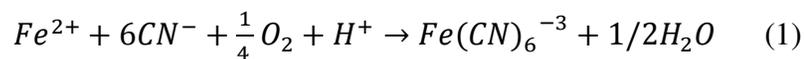
- 1) Filtración de las arenas: Con el fin de realizar la separación de sólidos se lleva a cabo una etapa de filtración a la muestra inicial de arenas para extraer la solución rica en cianuro, la cual se puede realizar a través de un sistema de filtración por vacío.
- 2) Lavado de las arenas por agitación: Se realiza con una solución de lavado básica (Agua destilada + NaOH pH=12) con el objetivo de tener la alcalinidad suficiente para capturar todo el cianuro soluble de la muestra. Por lo general, el lavado se hace a una relación 1L/1 kg con una agitación de 1 hora a 250 rpm. Por último la muestra lavada se transfiere a una celda de filtrado.
- 3) Se realiza una neutralización del agua de lavado a través de cualquiera de los siguientes procesos: Precipitación con sulfato ferroso, Oxidación con peróxido

de hidrógeno, Tratamiento con hipoclorito de calcio, Proceso INCO, SO₂/aire, entre otros.

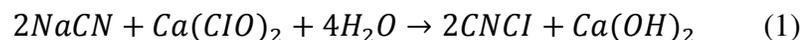
4) Por último se realiza una recirculación de la misma para un nuevo lavado.

Entre los anteriores procesos de neutralización propuestos se destacan por sus porcentajes de remoción los siguientes:

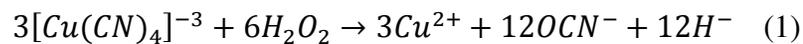
Precipitación con sulfato ferroso: Este proceso es utilizado para transformar el cianuro libre a ferrocianuro y/o ferricianuro, que son compuestos más estables considerados de baja toxicidad, y se realiza a un pH óptimo de 7.5-10.5; el hierro se adiciona como sulfato ferroso (Fajardo 2010). Las reacciones del proceso son:



Tratamiento con hipoclorito de calcio: Consiste en la oxidación de cianuro a cianato de calcio y luego a pH ácido éste se descompone en amoníaco y bicarbonato; el uso de estos productos tiene desventajas como, la formación de compuestos tóxicos tales como cloruro de cianógeno y organoclorados, la liberación al medio ambiente de cloro residual y cloruros, se requiere condiciones alcalinas fuertes y el consumo del oxidante puede ser muy alto (Fajardo 2010).



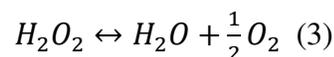
Degradación de cianuro con peróxido de hidrógeno: Este proceso es utilizado para la destrucción oxidante del cianuro y los complejos de cianuro, pero es adecuado para el tratamiento tanto de cianuro libre y algunos cianuros disociables de ácido débil, como los complejados con zinc, cobre, o cadmio (Ortiz y Delgado 2009). La adición de un catalizador puede ser necesaria para evitar el problema asociado con el tiempo prolongado de reacción. De acuerdo con la prueba piloto realizado por Sims (1983) se ha demostrado que el cobre es un catalizador para reducir el cianuro en solución a un 98% en 5 horas (Pak y Chang 1996), además, es un catalizador homogéneo ampliamente utilizado. El Cu^{+2} se adiciona como sulfato de cobre en medio alcalino, formándose un complejo con el ion cianuro (tetracianocuprato), el cual tiene mayor afinidad con el peróxido (Fajardo 2010). La reacción fundamental es:



El producto de la reacción de H_2O_2 es cianato (CNO^-), que es 1000 veces menos tóxico que el cianuro y es a menudo aceptable para la descarga. El cianato puede ser destruido a través de hidrólisis ácida, formando dióxido de carbono y amoníaco (Lee et al. 2004).



Finalmente, cualquier nivel residual del oxidante se descompone espontáneamente generando oxígeno:



Éste es un proceso nuevo, simple, con mínimos requisitos de supervisión y bajo costo; el peróxido de hidrógeno es un compuesto no tóxico y altamente oxidante que puede

romper fácilmente el compuesto de cianuro (Fajardo 2010). El carbón activado, también se utiliza como catalizador para la oxidación heterogénea entre el peróxido de hidrogeno y el cianuro. La impregnación de carbón activado puede resultar en la creación de CuO (Reda et al. 2011). El uso teórico de H₂O₂ en el proceso es 1.31 g de H₂O₂ por gramo de CN⁻ a oxidar en la muestra, pero en la práctica el uso real varía de aproximadamente 2.0 a 8.0 g por H₂O₂ gramo de CN⁻ oxidado. El H₂O₂ utilizado en el proceso se proporciona típicamente como un líquido al 50% y se debe mantener a un pH>9 (Botz 1996).

1.2 METALES PESADOS EN LA MINERIA DE ORO

La minería oro intensiva da lugar a la acumulación de altas concentraciones de metales pesados y elementos tóxicos, donde esta acumulación es un tipo especial de degradación que se denomina contaminación, causando graves problemas socioeconómicos y ambientales. Estos metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano, estos se van acumulando de forma lenta en distintos órganos alterando su correcto funcionamiento. Además de esto cuando están presentes en los suelos, no son biodegradables por procesos naturales y permanecen en el ecosistema (Moutsatsou et al. 2005).

1.2.1 Toxicidad y propiedades de los metales pesados

La contaminación generada por estos metales pesados inhibe la actividad enzimática de los suelos, debido a la destrucción del poder de autodepuración, que se da al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo; disminuyendo cualitativa y cuantitativamente el crecimiento normal de las poblaciones de microorganismos y la fauna en el suelo, y afectando el ciclo biogeoquímico y la función de biofiltro (Agraz et al. 2013). Teniendo en cuenta esto, se estudia la toxicidad de algunos ver **Tabla 1**.

Tabla 1. Aspectos ambientales de algunos metales pesados

Metal	Aspecto ambiental	Referencia
As	Es adsorbido fuertemente por el suelo y a su vez se transporta a través de distancias cortas en aguas subterráneas y superficiales. La presencia de distintas especies compromete la calidad del suelo y modifica la producción de biomasa, la regulación ambiental, el reciclaje de materias primas, los hábitats para organismos, la reserva genética, la calidad del agua y la fauna.	Wuana y Okieimen 2011
Hg	Es adsorbido por los suelos, sedimentos y materiales húmicos, además forma complejos fuertes con una variedad de ligandos inorgánicos y orgánicos, siendo así muy soluble en los sistemas acuáticos. También es absorbido por las plantas, principalmente a través de sus raíces, limitando el intercambio entre el suelo y la parte aérea de la planta (el HgCl ₂ inhibe el crecimiento de la mayoría de las plantas, afecta procesos fisiológicos y biológicos en estas y por ende la cadena trófica).	Sancha 2005
Pb	No es un elemento esencial para el crecimiento de la planta y animales. Sin embargo, esta omnipresente en los sistemas del suelo y agua. Se mantiene fuertemente en los suelos, formando complejos con componentes inorgánicos y orgánicos del suelo, modificando la actividad biológica del suelo.	Wuana y Okieimen 2011
Zn	Puede interrumpir la actividad en los suelos, ya que influye negativamente en la actividad de los microorganismos y lombrices de tierra, retardando así la descomposición de la materia orgánica. Además el zinc es soluble en agua, por lo tanto pueden contaminar las aguas subterráneas, aumentando su acidez.	Wuana y Okieimen 2011
Cd	Es uno de los elementos más tóxicos en la cadena alimenticia y no experimenta una degradación química o microbial, el aumento de su concentración provoca su acumulación en las plantas e indirectamente genera efectos nocivos en la salud de los seres humanos.	Wuana et al. 2010

Además de los componentes tóxicos que tienen estos lodos, según lo establecido por el decreto 4741 del 2005, Anexo I y II, estos lodos son residuos peligrosos conformados por Y23, Y24, Y26, Y29, Y31, Y33 y Y38. Además, según la corriente del residuo son

clasificados como A1 “Desechos metálicos o que contengan metales”, resultado de la presencia de As, Hg, Cd y Pb en los lodos.

1.2.2 Lavado de metales pesados en lodos

Para aplicar esta técnica a un suelo o lodo contaminado, primero se procede a realizar un proceso de trituración y tamizaje, posteriormente se lava con diversos agentes, ya sea a través de reactores o por lixiviación en pilas. Idealmente, el suelo es limpiado lo suficiente para ser devuelto de nuevo al medio (Eriksson y Johansson 2013). Existen varios agentes de lavado, tales como ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos, agentes quelantes o combinaciones de los mencionados como se observa en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Extractantes utilizados para el lavado de suelo y lodos

AGENTE DE LAVADO	Elementos Removidos	Porcentaje de remoción	Referencias
Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	Cianuro y algunos metales pesados	97% CN, 56%Pb y 31% Ni	Fajardo et al. 2010
EDTA y H ₂ SO ₄	Metales s y metaloides	15% Cu y 25%As	Alcaino 2012
EDTA	Metales pesados, compuestos orgánicos y metaloides	79%Pb, 38%Zn, 41%Cu, 14%Fe, 13% As	Velasco et al. 2004, Martínez et al. 2005, Moutsatsou et al. 2005.
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) (6M)	Metales pesados y metaloides	47% Fe, 30%Cu, 78%Zn, 93%Mn y 80%As	Moutsatsou et al. 2005
Ácido clorhídrico (HCl) (6M)	Metales pesados	70%Pb, 97%Zn, 73% As, 72%Fe	Velasco et al.2004, Moutsatsou et al. 2005
Agua (H ₂ O)	Compuesto orgánico, sales orgánicas	74% NaCl, 0%Pb	Villafañe et al.2011, Martínez et al.2005
Ácido cítrico (HNO ₃)	Metales pesados y compuestos orgánicos	57% Pb	Velasco et al.2004

AGENTE DE LAVADO	Elementos Removidos	Porcentaje de remoción	Referencias
EDTA y Ácido Fosfórico (H ₃ PO ₄)	Metales pesados	20% Cu y 28%As	Alcaino 2012
Ácido nítrico (HNO ₃) (6M)	Metales pesados	11% AS, 44% Pb, 10%Cu y 45%Zn	Moutsatsou et al. 2005
Surfactantes	Metales pesados	86.6% Zn	Torres et al. 2012

Los fuertes lazos entre el suelo y los metales hacen que el proceso de limpieza sea difícil. Por tanto, los extractantes capaces de disolver de manera óptima los metales incluyen tensoactivos, codisolventes, ciclodextrinas, agentes y ácidos orgánicos (Wuana et al. 2010). Ahora, los ácidos y bases movilizan, neutralizan o transforman el contaminante; se utilizan principalmente para incrementar la solubilidad de muchos metales, y ser extraídos de la fase sólida (Volke 2005). El ácido clorhídrico presenta alta remoción para Zn, As, Hg y Pb como se observa en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Porcentaje de remoción de los agentes de lavado en el estudio realizado en Atenas Grecia. Tomada de: Moutsatsou et al. 2005

Contaminante (%)	HCl 6M	HCl 3M	HCl 2M	HCl 1M	EDTA 0.1 M	H₂SO₄ 6 M	HNO₃ 6 M
Fe	72	63	55	37	14	47	14
Cu	46	51	42	41	41	30	10
Zn	97	65	67	67	38	78	45
Mn	80	75	70	68	42	93	42
Pb	83	79	57	35	44	6	44
As	73	77	92	64	13	80	11
Total	78	67	58	43	18	45	25

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La región aurífera del sur de Bolívar comprende una extensión de 16000km², comprendida por los municipios mineros: Río viejo, Arenal, Morales, Santa Rosa Del Sur, Simití, San pablo, Cantagallo y San Martín de Loba. Para este estudio se tomaron como referencia los lodos del proceso de neutralización de cianuro del beneficio de oro realizados en el municipio de San Martín de Loba ubicado en el sur del departamento de Bolívar, situado en la margen sur del Brazo de Loba del río Magdalena, en las coordenadas latitud Norte 08° 56' 20.3'' y longitud Oeste 74° 02' 42'' a una altura de 32.49 m.s.n.m. Esta zona presenta un clima cálido húmedo, con temperatura mayor de 24 °C, precipitación de 2001 – 3000 mm/año, con paisaje predominante de planicie, constituido principalmente por superficies inclinadas a onduladas, sucedidas por colinas para luego descansar en extensas planicies, presenta textura arcillosa, franco arcillosa y limosa (Barrientos 2011).

El material geológico de esta zona lo constituyen rocas volcánicas félsicas (riolita, riolacita), los cuales han originado suelos bien drenados. Estas rocas están compuestas en su mayoría por sílice (SiO₂), cuarzo (SiO₂) sanidina ((K,Na)(Si,Al)₄O₈), plagioclasa ((Na,Ca)(Si,Al)₃O₈) y biotita K(Mg, Fe)₃AlSi₃O₁₀(OH, F)₂. También se ha identificado la presencia de otros minerales como Galena (PbS) y Pirita (FeS₂) (Barrientos 2011). Ver **figura 2**.

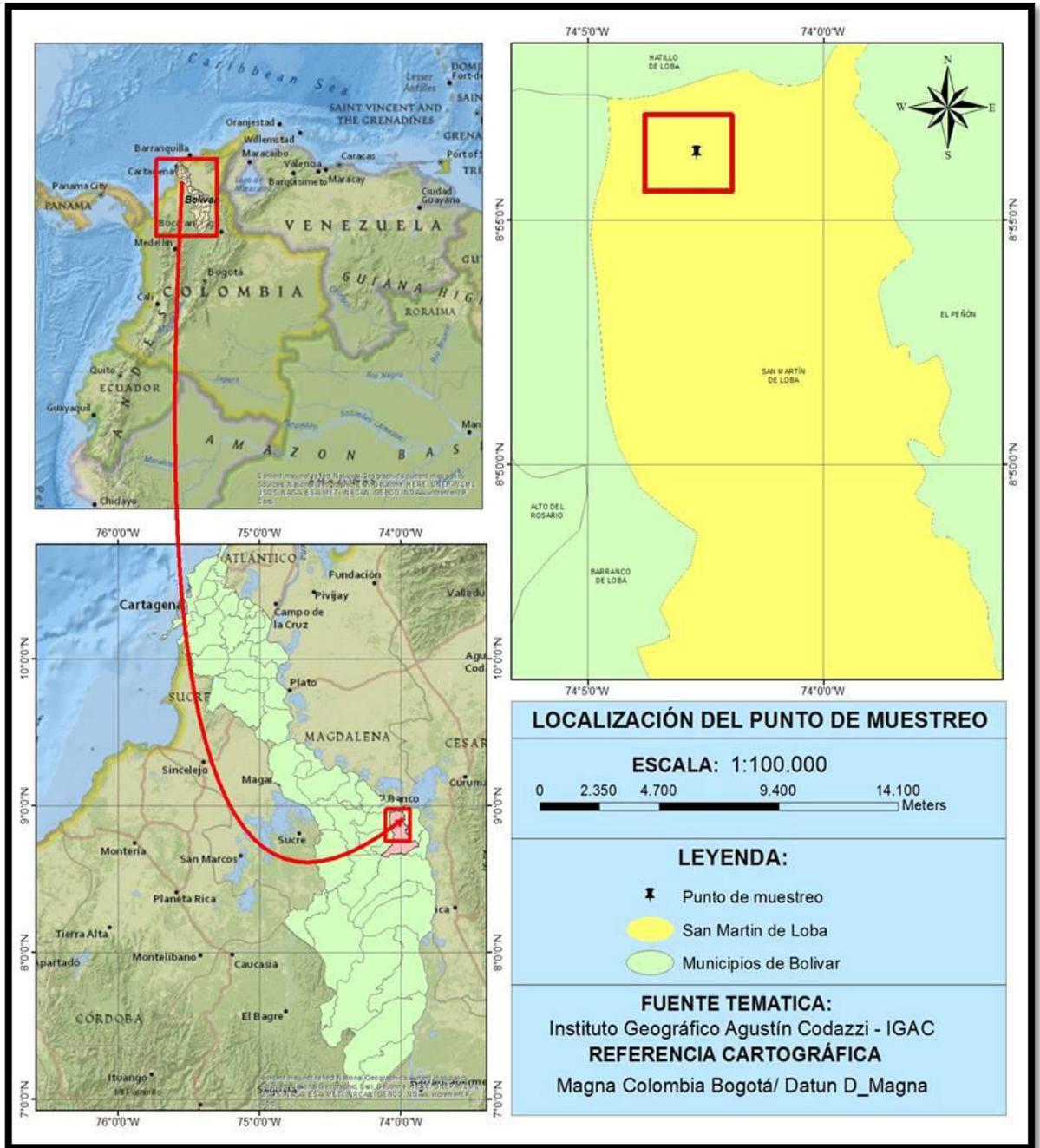


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio

2.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Se realizó un muestreo de identificación sistemático con el objetivo de investigar los contaminantes existentes en los lodos y sus concentraciones, a través de la obtención de muestras representativas de las pilas de acopio de sedimentos extraídos de la laguna de sedimentación de la mina. Para asegurar un muestreo homogéneo se elaboró un patrón de muestreo de rejilla rectangular de 0.4 m² en cada pila, tomando muestras a profundidades entre 0-50 cm desde la superficie del sedimento (Ministerio del ambiente 2014).

Finalmente, se obtuvo una única muestra representativa de aproximadamente 60 kg de lodo, utilizando el método de cuarteo. Las muestras fueron guardadas y transportadas en bolsas de polietileno denso.

2.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS MUESTRAS

La caracterización de los lodos se realizó en el laboratorio de Suelos y laboratorio de Toxicología y Gestión ambiental de la Universidad de Córdoba.

2.3.1 Caracterización de pH, Conductividad y Materia orgánica de las muestras.

El pH de las muestras se determinó a partir de un pHmetro HANNA HI 9126, bajo las condiciones de humedad del lodo basado en el método AS-02, establecido por la norma NOM-021-RECNAT (2000). El contenido de materia orgánica se determinó a partir del método de calcinación, es decir, la muestra seca a 103 °C se sometió a calentamiento por 4 horas a una temperatura de 500 °C en un horno Thermo Scientific (Nelson y Sommers 1996). Para determinar la conductividad de las muestras se utilizó un conductímetro

SCHOTT Z453 sobre el extracto de la muestra basado en el método AS-18, establecido por la norma NOM-021-RECNAT (2000). Ver **Anexos I y K**.

2.3.2 Caracterización de metales pesados

Se cuantificó la concentración de metales pesados por digestión ácida asistida por microondas, utilizando un horno microondas Milestone EHOS-ONE. Se tomaron 0.5g de muestra seca y homogenizada, siguiendo las recomendaciones del método EPA 3051B (1994), y luego se realizó la lectura en un espectrómetro de absorción atómica Thermo Electron IC-3500, utilizando la técnica de llama FLAAS (Gómez 2011). Ver **Anexo L**.

Se determinó la biodisponibilidad de los metales más concentrados en el lodo, aplicando el procedimiento planteado por Tessier (1979), con modificaciones realizadas por Campbell et al. (1980), considerando solo tres fases de extracciones a 1g de muestra, ya que estas mediciones permiten una mejor interpretación del potencial de biodisponibilidad de estos elementos en el suelo y lodo, teniendo en cuenta que las fases biodisponibles o móviles corresponden a F1 y F2 por ser las débilmente unida al material (Barragán 2008). Estas fases fueron:

-Fase Soluble (F1); se realizó utilizando 8mL de cloruro de magnesio 0.1 M como extractante con agitación continua a 150 rpm por una hora.

-La segunda fase, unido a los Carbonatos (F2), se obtuvo a partir de 8mL de acetato de sodio 1M con agitación a 150 rpm por un tiempo de 5 horas.

-La tercera fase, la Reducible (F3), se llevó a cabo adicionando 20mL de cloruro de hidroxilamina 0.04 M en ácido acético 25%(v/v), en baño de María a 96 °C por 5 h.

-Por último la fase 4 y 5, metales oxidables (asociados a compuestos orgánicos y a sulfuros) y litogénica (asociados a silicatos) respectivamente; se obtuvo de la sustracción de la concentración total menos la sumatoria de las fases 1, 2 y 3, y denotándose en el documento como la fase residual (FR).

2.3.3 Caracterización de Cianuro

Se determinó cianuro libre a partir de la metodología establecida por Standard Methods 4500-CN⁻ título F (1992). La medición se realizó tres veces en el lodo utilizando un electrodo de Ion específico Thermo Scientific 1234Z08 y luego se realizó un promedio de los resultados, esto con el fin de comparar el margen de error de las lecturas en cada medición. Los cianuros totales se cuantificaron mediante destilación con hidróxido de sodio NaOH, según lo establecido en el método 4500-CN⁻ título C Standard Methods (1992), utilizando ácido sulfúrico para descomponer los complejos metálicos (Jiménez et al. 2013). Ver **Anexos J y M**.

2.4 LAVADO DE LODOS

Para este estudio, se implementaron dos lavados consecutivos como se observa en la **figura 3**. Se realizó inicialmente lavado a los metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) y posteriormente al cianuro, con el fin de remover los metales del lodo y extraer el cianuro ligado a complejos fuertes, ya que estos no se encontraban en forma soluble en la muestra y este los separó de la muestra sólida; y el segundo lavado eliminó el cianuro liberado en el primer lavado.

El primer lavado se realizó con HCl, para la movilización de metales pesados y el vapor de HCN se recolectó en una solución de NaOH 0.5 M, para evitar la inhalación de dicho

gas y recuperar parte del cianuro contenido en la muestra; el segundo se utilizó peróxido de hidrógeno H_2O_2 para degradar el cianuro restante en la muestra tras el tratamiento con ácido.

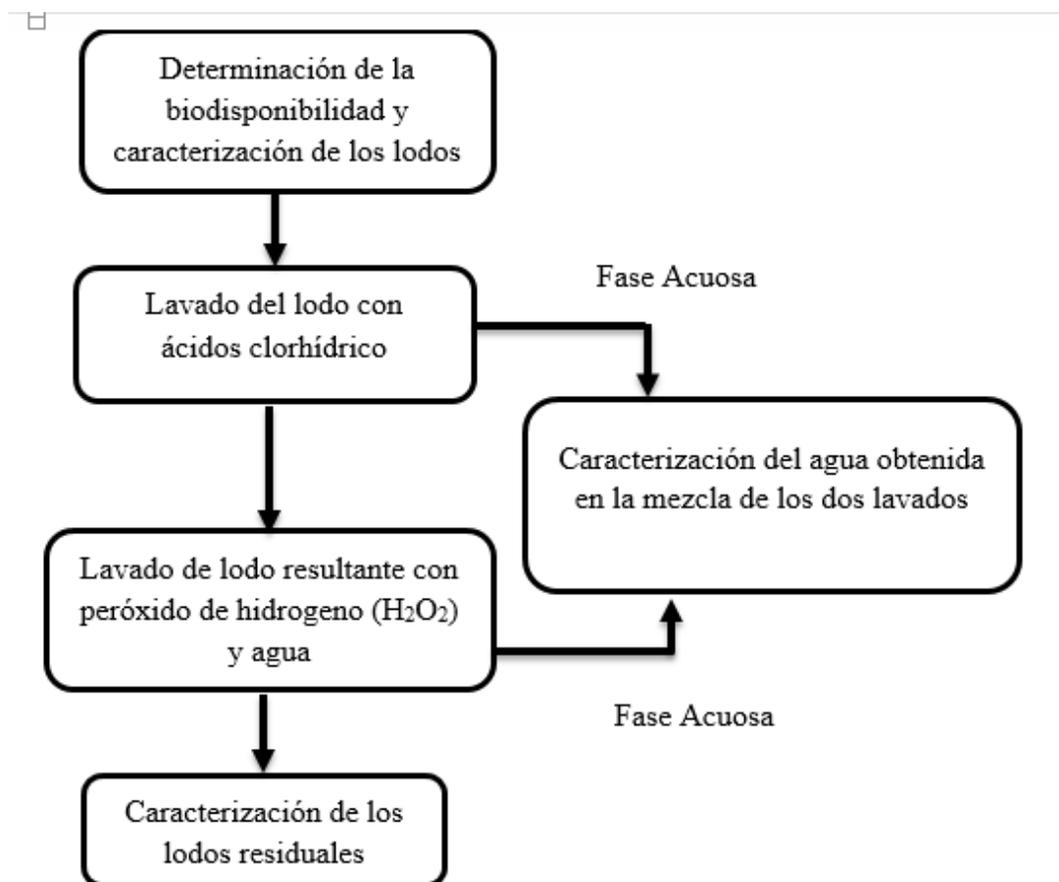


Figura 3. Metodología utilizada para el tratamiento de lodos procedentes del beneficio de oro

2.4.1 Lavado con ácidos inorgánicos

El lavado de metales pesados en los lodos se realizó con ácido clorhídrico (HCl), con el fin de remover los metales como Cd, Pb, As, Hg, Zn y Fe de las fracciones del lodo.

Para este proceso se aplicó el Diseño factorial 3^2 como se observa en la **tabla 4**, teniendo como factores la concentración de HCl y el tiempo de agitación.

Tabla 4. Diseño experimental del lavado con ácido clorhídrico

Variable 1	Variable 2	Repeticiones
C1: (1 M de HCl)	T1: (1 hora)	(C1+T1) ₁
		(C1+T1) ₂
		(C1+T1) ₃
	T2: (2 horas)	(C1+T2) ₁
		(C1+T2) ₂
		(C1+T2) ₃
	T3: (3 horas)	(C1+T3) ₁
		(C1+T3) ₂
		(C1+T3) ₃
C2: (3 M de HCl)	T1: (1 hora)	(C2+T1) ₁
		(C2+T1) ₂
		(C2+T1) ₃
	T2: (2 horas)	(C2+T2) ₁
		(C2+T2) ₂
		(C2+T2) ₃
	T3: (3 horas)	(C2+T3) ₁
		(C2+T3) ₂
		(C2+T3) ₃
C3: (6 M de HCl)	T1: (1 hora)	(C3+T1) ₁
		(C3+T1) ₂
		(C3+T1) ₃
	T2: (2 horas)	(C3+T2) ₁
		(C3+T2) ₂
		(C3+T2) ₃
	T3: (3 horas)	(C3+T3) ₁
		(C3+T3) ₂
		(C3+T3) ₃
Total de ensayos		27

Dónde: C (Concentración del HCl) y T (Tiempo de agitación).

Cada lavado se realizó por triplicado, con una relación de 5 mL de solución de lavado por 1 g de lodo a una velocidad de agitación de 150 rpm. Para los distintos ensayos se tomaron 100 g de lodo y se adicionaron 500 mL de solución de HCl, los cuales fueron

aplicados directamente al lodo, y finalmente se evaluó la eficiencia de cada lavado con base al porcentaje de remoción obtenido.

2.4.2 Lavado con peróxido de hidrógeno.

Al finalizar el lavado con ácido, se enjuagó dos veces la muestra de lodo con 500 mL de agua destilada a una agitación de 150 rpm durante media hora, y se adicionó 1 g de cal para mantener un pH básico de 9, evitando así, la liberación continua de HCN gaseoso debido al medio ácido. Posteriormente, se lavó con H₂O₂ evaluando la relación de los gramos de H₂O₂ adicionados con base a los gramos de CN⁻ residual que presentó el lodo después del lavado con ácido (g H₂O₂/ g CN⁻), y el tiempo de agitación. El uso teórico de H₂O₂ en el proceso es 1.31 gramos de H₂O₂ por gramo de CN⁻ a oxidar, esto correspondería a 100µL de peróxido de hidrogeno al 50%, sin embargo, se tomaron volúmenes de 10 y 100 veces por encima de este valor de referencia (1 y 10ml peróxido de hidrogeno al 50%), teniendo en cuenta la cantidad de materia orgánica y otras sustancias oxidantes presentes en el lodo, las cuales consumen gran parte del peróxido adicionado (Botz 1996).

Esta evaluación se realizó a través del diseño factorial 2x3, donde dos indica el número de niveles de relación gH₂O₂/gCN, y tres los niveles de tiempo de agitación (Montgomery 2004) (Ver **Tabla 5**). Se realizaron tres réplicas por cada lavado, y se evaluó la eficiencia de cada lavado con base al porcentaje de remoción obtenido, es decir, a partir de la diferencia de las concentraciones de cianuros totales finales obtenidas con respecto a la concentración inicial del lodo (Scavo et al. 2004; Fajardo et al. 2010). Ver **Anexo N**

Tabla 5. Diseño experimental del lavado con peróxido de hidrogeno

Variable 1	Variable 2	Repeticiones
Relación 1: (1.2 g de H ₂ O ₂ /2.3 g CN)	T1: (1hora)	(R1+T1) ₁
		(R1+T1) ₂
		(R1+T1) ₃
	T2: (2 horas)	(R1+T2) ₁
		(R1+T2) ₂
		(R1+T2) ₃
	T3: (3 Horas)	(R1+T3) ₁
		(R1+T3) ₂
		(R1+T3) ₃
Relación 2: (12 g de H ₂ O ₂ /2.3 g de CN)	T1: (1hora)	(R2+T1) ₁
		(R2+T1) ₂
		(R2+T1) ₃
	T2: (2 horas)	(R2+T2) ₁
		(R2+T2) ₂
		(R2+T2) ₃
	T3: (3 Horas)	(R2+T3) ₁
		(R2+T3) ₂
		(R2+T3) ₃
Total de ensayos		18

Dónde: R (Relación de g de H₂O₂/ g de CN), y T (Tiempo de agitación).

2.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE LAVADO

El reactor de lavado se construyó de polietileno, para evitar la degradación del material por soluciones ácidas, y con forma de tubo cilíndrico con el fin de impedir zonas muertas en el proceso de homogenización. Las dimensiones del reactor correspondieron a un diámetro inferior de 9 cm, superior de 11 cm, y una longitud de 20 cm; con un volumen de 1.5 L, y con controles de evacuación de lodos y lixiviados. Este fue un sistema cerrado para el control de gases, con una trampa de hidróxido de sodio a una concentración de 0.5 M y una bomba de aire que inyectaba un flujo de 20 L/min que permitieron la circulación de los gases del reactor a la trampa y la introducción de

oxígeno para favorecer los procesos de oxidación a una agitación de 150 rpm, con un motor de eje rotatorio. Lo anterior garantizó que la muestra estuviera en constante contacto con la solución y se diera una mejor eficiencia en las reacciones. Ver **figura 4**.



Figura 4. Reactor de lavado de lodos procedentes del beneficio de oro

2.6 BENEFICIOS AMBIENTALES EN LA APLICACIÓN DEL PROYECTO

La ejecución de este estudio pudo afectar de manera positiva, nula e intermedia al medio donde se desarrolló, resultando viable o improductiva. Por lo tanto, se tomó una matriz de los impactos ambientales generados por la minería de oro en Colombia establecida por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME 2005), y se estableció aquellos efectos ambientales directos e indirectos que surgen por la implementación de este estudio en los impactos de la minería de oro. Ver **tabla 6**

Tabla 6. Matriz de Impactos ambientales en la minería de oro en Colombia. Tomada de:

UPME 2005

Medio		Impacto	
Abiótico	Suelo	Contaminación del suelo	Botaderos y cola ricos en cianuro y metales pesados
		Cambio del uso del suelo	
	Aire	Emisiones de gases, vapores de Hg y HCN	Malas prácticas en el manejo y destilación de la amalgama de mercurio
	Agua	Contaminación del agua	Por Hg (Efluentes solidos)
			Por Cianuro (Efluentes solidos)
			Metales pesados en solución
Drenajes ácidos			
Biótico	Flora y fauna	Pérdida de biodiversidad	Afectación a la fauna acuática
			Afectación a los microorganismos
	Paisaje	Modificación del paisaje	Deforestación y erosión
Socio – económico	Social	Calidad de vida	Afectaciones a la salud
	Económico	Generación de empleo	Alto % de empleo de mano de obra
		Infraestructura	Adquisición de equipos y tecnologías

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS

La **tabla 7** muestra los diferentes parámetros fisicoquímicos evaluados para la muestra de lodo proveniente de la neutralización de cianuro en el beneficio de oro en el sur de Bolívar. El porcentaje de materia orgánica de este lodo fue bajo, (1.35%), el pH de 6.75 considerado ligeramente ácido, y presentó una conductividad de 2040 $\mu\text{S}/\text{cm}$, demostrando un alto contenido de sustancias solubles (Núñez 2000). En este lodo, se observó una alta concentración de cianuro total registrando un valor de 20433 mg/kg y la concentración de cianuro libre en la muestra fue muy baja, con un valor de 0.128 mg/kg. La carencia de cianuro libre es característica de estos residuos al provenir de un proceso anterior de neutralización con oxidantes, quedando en el lodo las formas más complejas del cianuro que no fueron arrastrados u oxidados por los químicos utilizados en el proceso.

Estos lodos, además de presentar una alta concentración de cianuro, también presentaron altas concentraciones de Hg, As, Pb, Cd y Zn. Sin embargo, la galena (PbS) presente en los minerales extraídos en la mina es el principal mineral portador de Pb, explicando así las grandes concentraciones de este en los lodos residuales de la mina, también es el responsable de la presencia de Cd. Además, el Fe en los lodos está asociada a la pirita y biotita, también se fundamenta la presencia de As y Zn a la asociación con la pirita (Tovar et al. 2012).

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de la muestra de lodo

Parámetro	Unidad	Lodo	Limites Max. Norma Australiana	Limites Max. Norma Chilena
pH	-	6.75		
Materia Orgánica	%	1.35		
Conductividad	μS/cm	2040		
Cianuro Total	mg/kg	20433.33		
Cianuro Libre	mg/kg	0.128		
Mercurio	mg/kg	55.25	15	20
Arsénico	mg/kg	462.35	60	40
Plomo	mg/kg	20415.05	420	400
Cadmio	mg/kg	75.90	20	40
Zinc	mg/kg	11024.3	2500	2800
Hierro	mg/kg	131513.92	-	-
Aluminio	mg/kg	249.0	-	-
Cobalto	mg/kg	106.6	-	-
Manganeso	mg/kg	560.5	-	-
Cromo	mg/kg	59.3	500	-
Níquel	mg/kg	16.5	270	420
Cobre	mg/Kg	93.32	2500	1200

Colombia, aún no cuenta con una norma que establezca límites permisibles para contaminantes en suelos o en lodos, por lo tanto, se tomó como referencia la norma de suelos de otros países, ya que estos se depositarán o considerarán como parte del suelo receptor (Ver **Anexo A**). Teniendo en cuenta la alta concentración de metales en la muestra de lodo, se tomó como referencia los límites máximos de metales pesados permitidos en los lodos aplicados a distintos suelos de Australia y Chile, por su posible deposición en los mismos suelos de la zona, que son degradados por la actividad minera, y su condición de lodo residual. Las concentraciones de los metales analizados en la muestra (ver **tabla 7**), superan los establecidos en las normas en una proporción de 2.8, 11.6, 51, 1.9 y 3.9 veces los niveles de Hg, As, Pb, Cd y Zn respectivamente, por lo cual para este estudio fueron seleccionados estos elementos como contaminantes metálicos

de interés. Aunque el Fe no es un metal considerado tóxico, las altas concentraciones pueden afectar el medio; y en este caso la muestra de lodo presenta un alto valor de 131513.92 mg/kg.

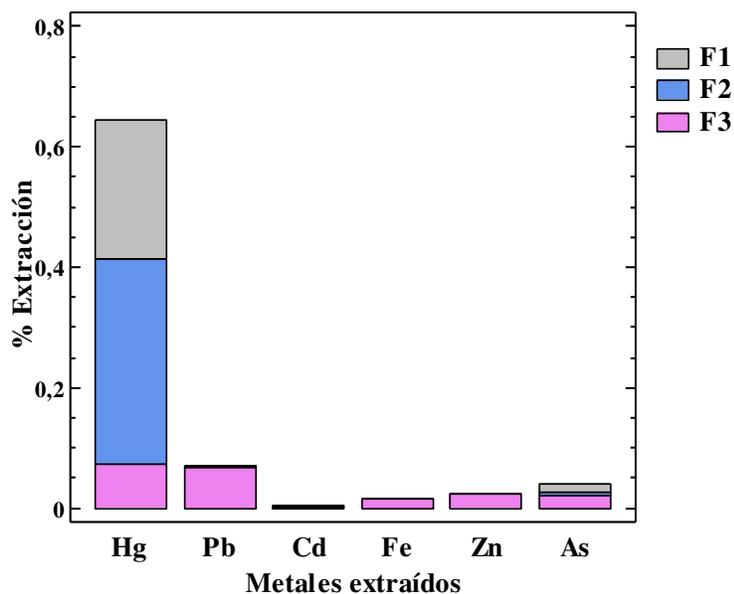


Gráfico 1. Porcentaje de extracción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) asociada a las fracciones 1, 2 y 3 de Tessier.

En el **gráfico 1**, se puede observar la biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As para las fase 1 (fácilmente intercambiable), fase 2 (asociadas a fracciones de carbonatos) y fase 3 (asociadas a fracciones oxi-hidróxidos). La fuerza de unión de los metales con los minerales, aumenta a medida que se avanza en los pasos del proceso de extracción secuencial, lo que significa que los metales extraídos en las primeras fracciones son más lábiles y biodisponibles que el obtenido en fracciones posteriores, porque en estas últimas fracciones el metal se encuentra unido a la fracción mineralógica del lodo; solo los metales asociados con las fracciones 1 y 2 están realmente disponibles para que interactúen con los organismos y presenten cierta toxicidad, puesto que estos se

encuentran libres o débilmente unidos a la solución del suelo (Kim. et al. 2013). En general, los metales analizados se encuentran asociados a la red silicatada del lodo, es decir, a la fase residual (FR) (Ver **tabla 8**), estando más del 99% de la concentración del Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As (extraído) asociado a esta fase. El remanente de las concentraciones de estos metales fue menor al 0.8% del total, asociadas a las fases 1, 2 y 3.

Tabla 8. Biodisponibilidad de metales (Hg, Cd, Pb, Fe, Zn y As).

Metales	F1(mg/kg)	F2(mg/kg)	F3(mg/kg)	F Residual (4-5) (mg/kg)
Hg	0.1285	0.1875	0.0404	54.89
Pb	0.0945	0.0399	1.4039	20413.51
Cd	0.0014	0.0002	0.0039	75.89
Fe	0.0046	0.0000	2.1469	131511.77
Zn	0.0702	0.0147	2.5249	11024.69
As	0.0648	0.0171	0.1005	462.17

La mayor concentración en las fases biodisponibles (F1 y F2) es presentada por el Hg, con un valor de 0.316 mg/kg que corresponde a un 0.57% de su total, adquirido posiblemente a su uso extensivo en el proceso de beneficio de oro, que incorpora cantidades antrópicas del tóxico al lodo. A pesar de ser un porcentaje bajo, teniendo en cuenta la gran cantidad de Hg total presente en el lodo, supera el valor establecido como límite (0.130 mg/kg) para presentar efectos tóxicos en suelos por Tipping et al. (2010). La fracción biodisponible (F1 y F2) de los demás metales, es decir, Pb, Cd, Fe, Zn y As, se encontró por debajo del 0.1% de sus concentraciones totales. (Ver **gráfico 1**).

De igual forma, a pesar de los bajos porcentajes biodisponibles de estos metales, siguen siendo altas las cantidades de estos metales que pueden ser transferidos a los distintos

organismos y medios receptores del lodo, como el suelo. La fase 1, 2 y 3 de Pb corresponde a un 0.0074 % del total, que tiene un valor de 1.54 mg/kg biodisponible, el 0.004 % de Cd tiene un valor de 0.005 mg/kg, el 0.002% de Fe y Zn corresponden a 2.15 mg/kg y 2.60 mg/kg respectivamente, y el 0.04% de As con un valor de 0.18 mg/kg.

En conclusión, los metales estudiados están asociados principalmente a la fracción Residual (F4 y F5), con bajos porcentajes en las fracciones biodisponibles, esto es debido a la naturaleza del material rocoso de la zona, la cual está compuesta principalmente por minerales como la galena, pirita y biotita, que incorporan estos metales dentro de su estructura impidiendo su movilidad. Sin embargo, los altos contenidos de estos tóxicos en los lodos representan cantidades considerables de metales disponibles para los organismos, lo cual genera una problemática ambiental y de salud pública, teniendo en cuenta que la actual disposición de estos lodos es la incorporación a suelos aledaños a las zonas mineras (como estrategia de dilución o arrastradas por las escorrentías de agua lluvia), que en la mayoría de los casos son utilizados para la siembra de productos de la canasta familiar (UPME 2014).

Por todo lo anterior se hace necesario realizar un tratamiento a estos lodos, con el fin de minimizar los riesgos asociados a la manipulación y disposición final de dichos residuos.

3.2 LAVADO DE LODO ÁCIDO CLORHÍDRICO.

En las **tablas 9, 10 y 11** se muestran los promedios de las concentraciones residuales de metales en lodos y los porcentajes de remoción en cada uno de los ensayos realizados con HCL 1 M, 3 M y 6 M. (Ver **Anexo B**).

Tabla 9. Concentración residual de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As usando HCl 1 M

Metal /Tiempo	mg/kg inicial	HCl 1 M					
		concentración (mg/kg) / remoción					
		1h	%	2h	%	3h	%
Hg	55.25	52.20	5.53	47.41	14.19	44.62	19.24
Pb	20415.05	17326.94	15.13	17218.00	15.66	17296.56	15.28
Cd	75.9	67.71	10.71	67.5	11.06	67.2	11.41
Fe	131513.92	124503.6	5.33	123724.71	5.92	124017.43	5.70
Zn	11024.3	2468.66	77.61	1997.98	81.88	2224.26	79.82
As	462.35	452.46	2.14	450.09	2.65	449.64	2.75

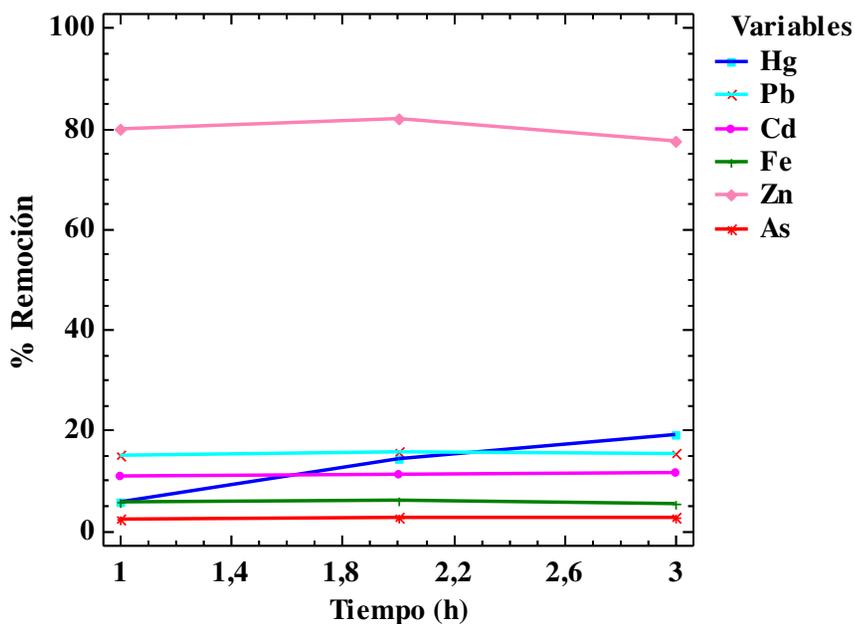


Grafico 2. Remoción de Metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCl 1 M

En el **gráfico 2**, se puede observar que los porcentajes de remoción de la mayoría de los metales con HCl 1 M no sobrepasaron el 20% durante el tiempo de lavado evaluado; excepto del Zn, que alcanzó remociones superiores al 80% durante la segunda hora. La remoción de la concentración de metales como el Fe, Cd y As, presentaron una tendencia constante en el tiempo con porcentajes alrededor de 10 %. Sin embargo, el Hg

presentó un aumento significativo al transcurrir el tiempo, registrando valores de hasta 20% aproximadamente; y el Pb presentó una remoción del 15 % (10.63 mg/kg removido) desde la primera hora de lavado. Esto indica que la remoción de metales, bajo estas condiciones, solo depende de la concentración de HCl.

Tabla 10. Concentración de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCL 3 M

Metal /Tiempo	mg/kg inicial	HCl 3 M					
		concentración (mg/kg) / remoción					
		1 h	%	2h	%	3h	%
Hg	55.25	50.59	8.43	44.09	20.21	33.73	38.95
Pb	20415.05	8861.35	56.59	7407.22	63.72	8657.77	57.59
Cd	75.9	65.89	13.18	67.03	11.68	66.87	11.90
Fe	131513.92	98610.66	25.03	94418.79	28.21	95769.43	27.18
Zn	106438.03	2717.23	75.35	2225.44	79.81	2675.56	75.73
As	462.35	367.11	20.60	358.78	22.40	356.01	23.00

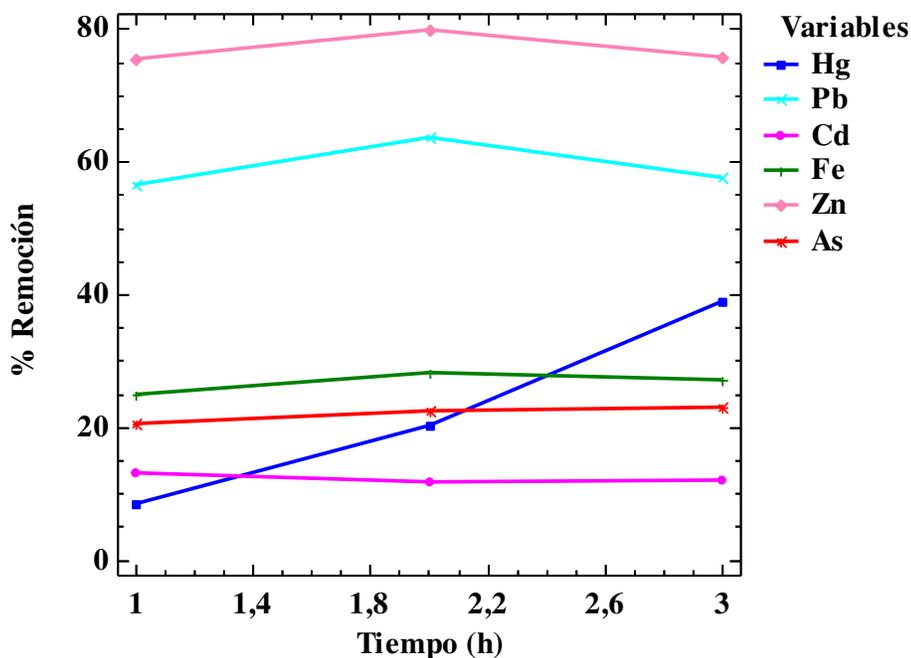


Grafico 3. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCl 3 M

Se observó que en el lavado del lodo con HCl 3 M (**tabla 10**), a la primera hora, se obtuvo una alta remoción de Pb, Zn, Fe y As con valores del 56.59, 75.35, 35.03 y 20.60 % respectivamente, sin embargo, en metales como Hg y Cd, la remoción obtenida fue menor al 15% de sus concentraciones totales (Ver **gráfico 3**). En la segunda hora de lavado, existió un leve aumento en los porcentajes de remoción de todos los metales, a excepción del Cd, posiblemente a una redistribución del mismo nuevamente hacia los lodos; y finalmente en la tercera hora de lavado se observó una ligera disminución en la remoción de Pb, Fe y Zn. No obstante, hubo un incremento progresivo en la remoción de Hg y As al transcurrir el tiempo.

En el lavado con HCl 6 M (ver **Tabla 11**), se presentó un notable incremento en la remoción del Hg, Zn, y Cd al transcurrir los tres tiempos estipulados, siendo más marcada para el Hg, el cual, incrementó alrededor de 5 veces su remoción en la última hora de lavado con respecto a la primera hora. La mejor remoción fue obtenida en un tiempo de tres horas, para la mayoría de los metales, 8.66% para As, 65% para Hg, 10.36% para Cd, 58.8% para Fe y 93.98% para Zn. Ver **Gráfico 4**

Tabla 11. Concentración de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCL 6M

Metal /Tiempo	mg/kg	HCl 6 M					
		concentración (mg/kg) / remoción					
		1 h	%	2h	%	3h	%
Hg	55.25	48.49	12.24	33.42	39.50	19.31	65.05
Pb	20415.05	724.11	96.45	550.16	97.31	899.15	95.60
Cd	75.9	64.67	14.8	63.33	16.56	61.53	18.93
Fe	131513.92	81508.71	38.02	80567.45	38.74	80492.52	38.80
Zn	11024.3	1329.88	87.94	1388.11	87.41	663.48	93.98
As	462.35	428.41	7.34	425.14	8.05	422.33	8.66

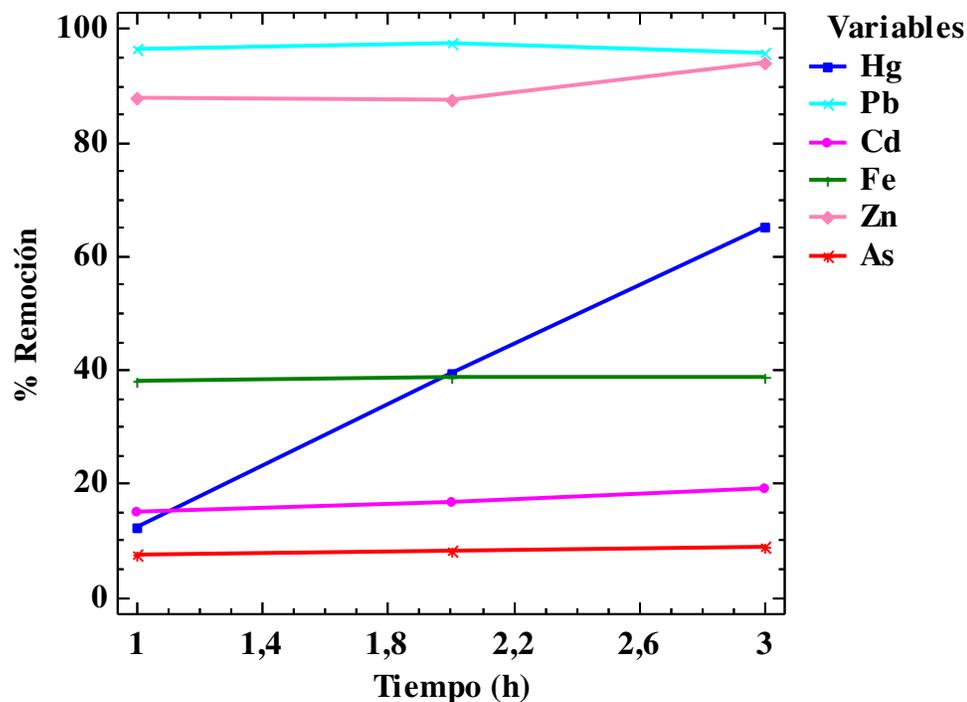


Grafico 4. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCL 6 M

En este lavado, se obtuvo una concentración final de Hg de 19.31 mg/kg, la cual está por debajo del límite máximo establecido por la norma Chilena NCH295C-2004 correspondiente a 20 mg/kg; además para el caso de Zn se obtuvo una concentración de 663.48 mg/kg, por debajo de lo establecido en dichas normas. También se obtuvo la mayor remoción del resto de metales, excepto para el As que presentó su máxima remoción en el lavado con HCl 3M.

El análisis de ANOVA del diseño experimental (Ver **Anexo G**) mostró diferencias estadísticamente significativas para las concentraciones de todos los metales pesados en los distintos tiempos de agitación ($p < 0.01$), excepto para el Zn, denotando cierta homogeneidad en los porcentajes de remoción durante los ensayos realizados, este análisis permitió demostrar el efecto positivo que tiene el tiempo de agitación en el

proceso del lavado de metales en los lodos utilizando HCl. El análisis de rango Múltiple de Tukey demostró diferencias significativas con un $p < 0.01$ entre las concentraciones de Hg para los distintos tiempos de lavado, encontrándose en las 3 horas los mayores porcentajes de remoción; mientras que para el Cd, Fe, y As a pesar de las ligeras tendencias de aumento y disminución a través del tiempo se presentaron valores similares de movilidad metálica entre la segunda y tercera hora de lavado, excepto para el Pb en el cual la mayor desorción de metales pesados se alcanzó a la segunda hora de lavado, esto se debió posiblemente a una redistribución del Pb nuevamente hacia el lodo en la tercera hora, debida a la inyección constante de oxígeno en el sistema de lavado, lo que produjo una oxidación del sulfuro presente a sulfato, formando así, sulfato de plomo como precipitado, resultado de su bajo producto de solubilidad ($K_{sp} = 1.82 \cdot 10^{-8}$) (Moutsatsou et al. 2005).

En general la naturaleza geoquímica del lodo, que proviene de material de mina con altos contenidos de sulfuros, carbonatos y silicatos (UPME, 2005), retarda la tasa de disolución de los metales por efecto de desorción/disolución favorecida por los bajos pHs proporcionados por el HCl, este fenómeno también fue encontrado por Moutsatsou et al. (2005) en suelos contaminados con residuos mineros; hecho que podría explicar la tardía disolución de metales como el Pb y Zn que normalmente alcanzan un equilibrio después de la primera hora de lavado (Cline and Reed 1995; van Benschoten et al. 1997) y el aumento progresivo del porcentaje de remoción en metales como el Hg, Cd y As con el incremento del tiempo de lavado; especialmente para el caso del Hg, en el cual los cloruros son considerados como uno de los agentes complejantes de Hg más móviles (Kabata Pendias 2011) capaz de competir con OH^- y ligandos orgánicos, incluso para

la unión de Hg (Gabriel y Williamson 2004). Las diversas fluctuaciones en los porcentajes de remoción entre las horas de lavado evaluadas pueden ser debidas a permanentes procesos de equilibrios de disolución/precipitación en los metales estudiados; estudios han demostrado disminuciones en la solubilidad de PbCl_2 y ZnCl_2 a partir de las 2 h de lavado y posterior redisolución por efecto de las altas concentraciones de Cl^- (Moutsatsou et al., 2005). Considerando los resultados anteriores y teniendo en cuenta la remoción del contenido metálico total, se puede concluir que el tiempo óptimo de extracción para todos los metales fue de 3 h, exceptuando el caso del As el cual mostró mejor remoción a las 2 h de lavado.

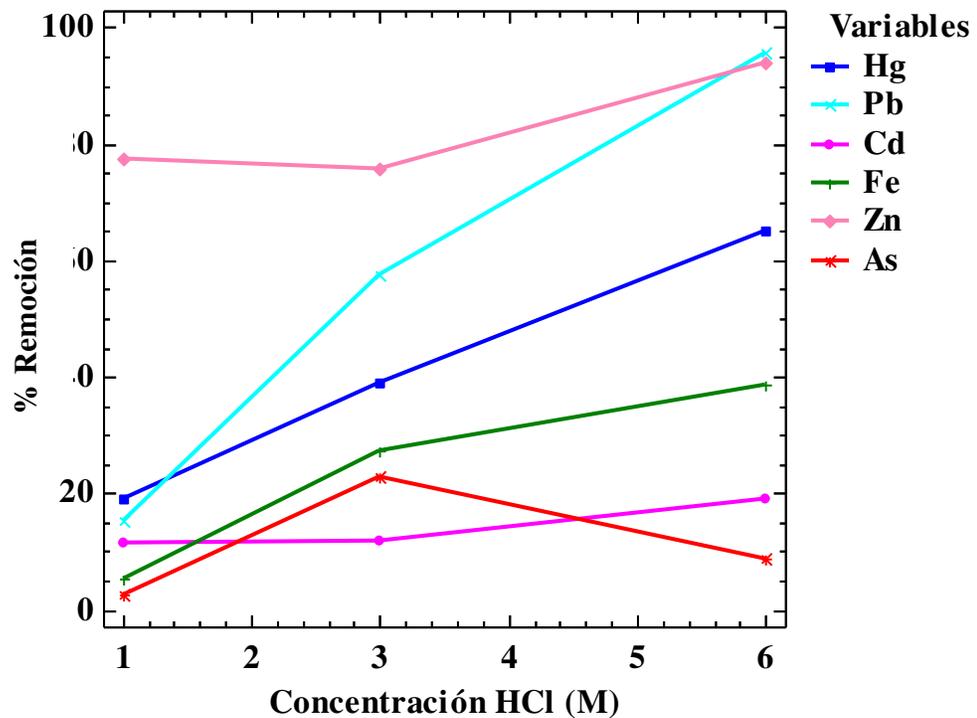


Grafico 5. Variación de la remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) a diferentes concentraciones de HCl

De acuerdo a los lavados realizados a diferentes concentraciones de HCl, se puede observar en la **gráfica 5**, la variación final de los porcentajes de remoción de los metales analizados a un tiempo de tres horas. En este tiempo, se obtuvieron altas remociones en metales como Hg y Pb, pero de igual forma un aumento de remociones en el resto de metales.

El análisis estadístico basado en un análisis de ANOVA y pruebas de rango múltiple de Tukey (Ver **Anexo G**) demostró que las mayores remociones para todos los metales fueron obtenidas para el lavado con HCl 6 M, excepto para el As el cual presentó una mayor remoción usando HCl 3 M; la tendencia para el Pb, Hg, Fe, Cd y Zn fue de incrementar su movilidad a medida a que se aumenta la concentración de HCl, esto está acorde con la teoría de que los procesos de desorción y disolución de metales aumenta con la disminución de pH (Xu et al. 2014). El **gráfica 5** muestra la movilización del Pb que incrementa con una tendencia logarítmica y un aumento lineal del Hg y Fe con el aumento de la concentración, además el Cd también obtuvo su mayor remoción a esta concentración de HCl, aunque no sobrepasó el 20%. Por otra parte, según Cotton (1995), la disminución de la concentración obtenida de As después de 3 M de HCl, se debió a la presencia de aniones S^{2-} , que al aumentar las concentraciones de HCl condujo a la formación de precipitado As_2S_3 , que es insoluble en ácidos fuertes. El Zn al igual que el Pb alcanzaron porcentajes de remoción superiores al 95% usando un lavado con HCl 6 M, a pesar de que el Pb presentó niveles por encima de las normas, estos resultados fueron satisfactorios para el tratamiento evaluado. Por otro lado para el Hg, que en este tipo de materiales es suministrado durante el proceso de extracción de oro, se verifica la

tendencia en la formación de complejos con iones cloruros a bajos niveles de pH y con una alta movilidad (Xu et al. 2014).

De igual forma se puede concluir que un parámetro crítico para la movilización de metales es la naturaleza y forma química de los metales en el residuo a tratar; conociendo que la mayor parte de estos metales están en la fase mineral del lodo, estos resultados son satisfactorios bajo las condiciones presentadas para esta muestra, encontrando las mejores remociones de metales totales a una concentración de HCl 6 M con un tiempo de 3 horas.

Tabla 12. Biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCl 1 M

HCl 1 M				
Metales	F1 (mg/kg)	F2 (mg/kg)	F3 (mg/kg)	F Residual (4-5) (mg/kg)
Hg	0.02	0.09	0.02	43.74
Pb	0.25	0.63	0.29	17295.39
Cd	0.00	0.00	0.00	67.23
Fe	0.15	0.18	0.26	124016.85
Zn	0.11	0.39	0.78	2222.98
As	0.01	0.00	0.06	449.57

Tabla 13. Biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCl 3 M

HCL 3 M				
Metales	F1 (mg/kg)	F2 (mg/kg)	F3 (mg/kg)	F Residual (4-5) (mg/kg)
Hg	0.11	0.04	0.28	33.30
Pb	0.34	0.34	0.17	8656.92
Cd	0.00	0.00	0.00	66.86
Fe	0.39	0.09	0.19	95767.95
Zn	0.66	0.13	0.69	2674.08
As	0.02	0.00	0.04	355.95

Tabla 14. Biodisponibilidad de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As después de lavado con HCl 6 M

HCL 6 M				
Metales	F1 (mg/kg)	F2 (mg/kg)	F3 (mg/kg)	F Residual (4-5) (mg/kg)
Hg	0.04	0.02	0.04	19.21
Pb	0.48	0.08	0.05	898.54
Cd	0.00	0.00	0.00	61.52
Fe	0.11	0.09	0.22	80492.1
Zn	0.45	0.08	1.01	661.94
As	0.03	0.00	0.06	422.24

Además, como parte del análisis de este trabajo, la biodisponibilidad cumple un papel importante para determinar la finalidad ambiental de estos lodos mineros, porque esta define si los metales pueden ser adsorbidos por plantas o animales y así establecer un medio receptor adecuado que no afecte el ambiente. Al igual que la muestra inicial se realizó la metodología de Tessier después del lavado con HCl 6 M a tres horas, debido a que en este tiempo se obtuvieron las mejores remociones de los metales de interés. En la **tabla 12, 13 y 14**, se puede observar las concentraciones mg/kg de cada metal en las fases fácilmente intercambiables (F1), asociados a carbonatos (F2), asociados a oxihidróxidos de Fe y Mn (F3), oxidables y asociados a silicatos (FR), después de los respectivos lavados con HCl 1 M, 3 M y 6 M (Espinosa et al. 2011). Ver **Anexo D**

Como se pudo observar, para los tres lavados el metal con mayor biodisponibilidad fue el Hg. En el lavado con HCl 1 M la fracción asociada a las fases 1, 2 y 3 correspondieron a 0.33%, con HCl 3 M 1.27% y con HCl 6 M a un 0.55% de la concentración obtenida de Hg en cada lavado. La fracción asociada a carbonatos (fase 2) disminuyó con el aumento de la concentración de HCl, 0.09 mg/kg, 0.04 mg/kg y 0.02

mg/kg respectivamente, pero se presentó una variación de las fracciones en las fases fácilmente intercambiables y oxi-hidróxidos (1 y 3), donde de 1 M a 3 M aumentaron las fracciones pero en 6 M disminuyeron. (Ver **gráficos 6, 7 y 8**). Estos resultados se encuentran por debajo de los establecidos por Tipping (2010) para presentar efectos ecológicos tóxicos en los suelos (0.130 mg/kg).

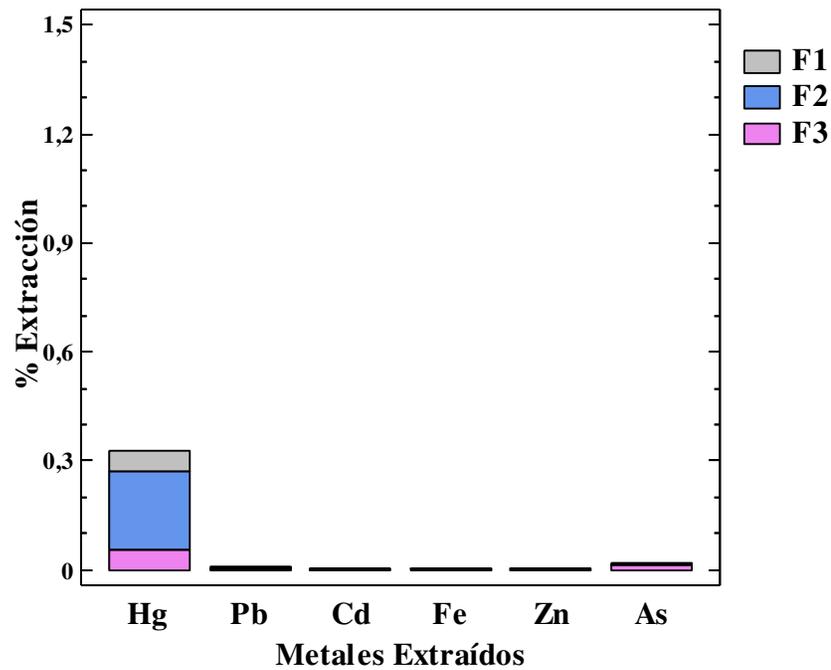


Gráfico 6. Porcentaje de extracción en las Fases 1, 2 y 3 después de lavado a tres horas de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con HCL 1 M

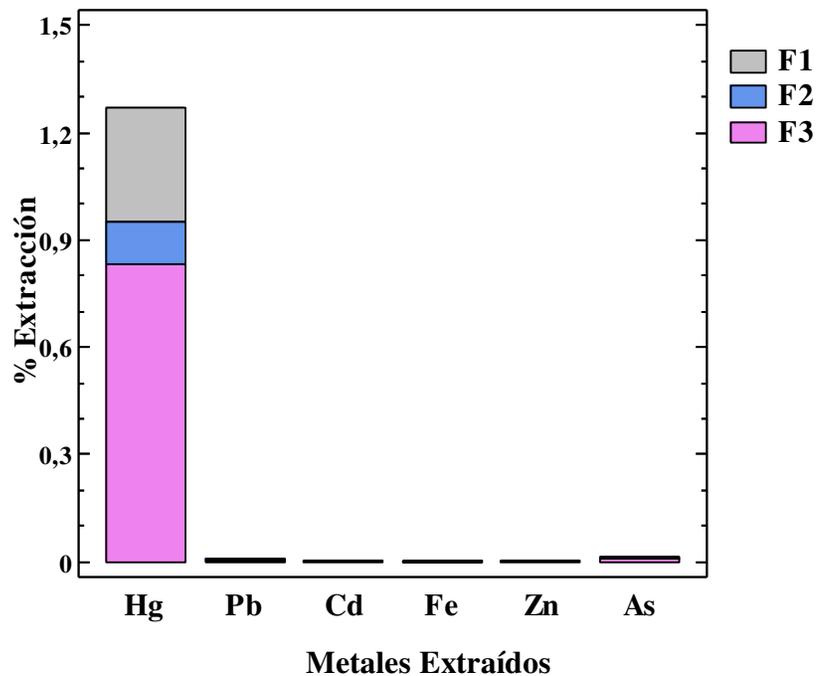


Grafico 7. Porcentaje de extracción de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As en las Fases 1, 2 y 3 después de lavado a tres horas con HCL 3 M

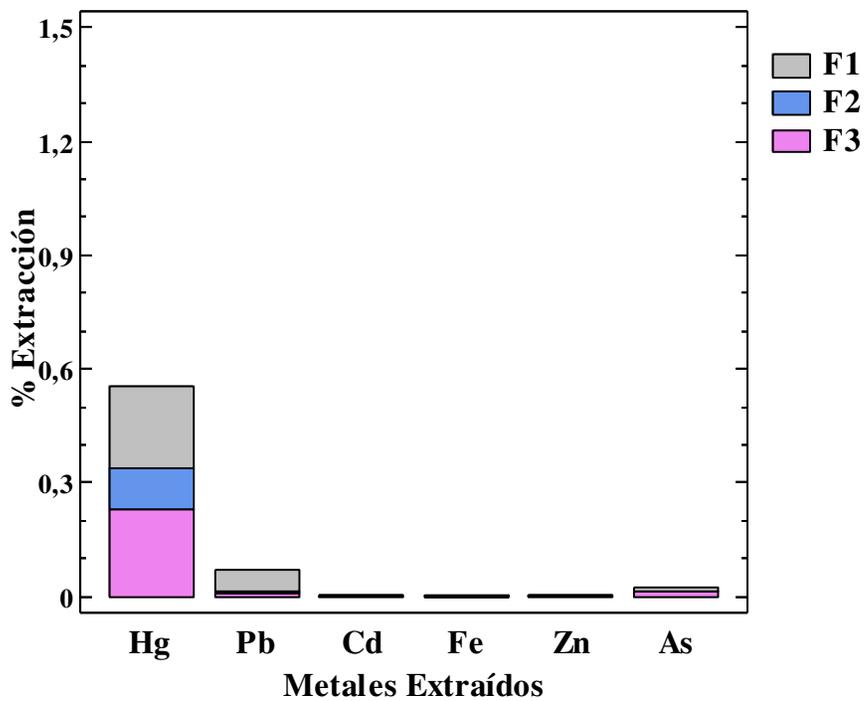


Grafico 8. Porcentaje de extracción de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As en las Fases 1, 2 y 3 después de lavado a tres horas con HCL 6 M

Más del 99% de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As (extraído) del lodo del lavado con HCl 1 M, 3 M y 6 M se encontraron asociados a la fase residual, es decir, ligados a la materia orgánica y a la red silicatada del lodo, sin embargo, la materia orgánica no obtuvo una diferencias durante el lavado por su baja cantidad inicial, por lo que se puede concluir que los metales están más asociados a la red silicatada. Las concentraciones restantes de las fases 1, 2 y 3 de Pb, Cd, Fe, Zn y As, se encontraron por debajo del 0.2% del total en los tres lavados. No obstante, aunque en las concentraciones iniciales de estos metales en el lodo, también se encontraron por debajo del 0.2% en dichas fases, se logró una disminución de la fracción biodisponible al aumentar la concentración del HCl del lavado. Ver **gráfico 1** y **tabla 7**

A diferencia de las condiciones biodisponibles iniciales del lodo, con los lavados disminuyó la concentración que puede ser transferida a los medios receptores del lodo. Es decir, si antes se aportaba un 1.54 mg/kg de Pb, ahora solo 1.17 mg/kg (HCl 1 M), 0.85 mg/kg (HCl 3 M) y 0.60 mg/kg (HCl 6 M). Y elementos como el Cd que no es biodisponible y a pesar de que su concentración sobrepasó la norma chilena, su biodisponibilidad tanto inicial como después de los lavado, mostró que está fuertemente asociado a la fracción silicatada del lodo, siendo parte de las condiciones propias del mismo.

Además, aproximadamente el 99% de la concentración de los elementos traza estudiados, se encontraron asociados a la fase residual (oxidables y asociados a silicatos), indicando que en su totalidad después del lavado aplicado no son biodisponibles para el suelo receptor, generando efectos positivos para el medio

ambiente, al eliminar el riesgo de que estos metales sean adsorbidos por las plantas y animales o que puedan ser arrastrados a cuerpos de agua y altere el ciclo de la vida acuática.

Tabla 15. Remoción de cianuro después de lavado con ácido

Agente de lavado	Concentración (mg/kg)	Remoción (%)
HCl 1M	12934.13	36.70
HCl 3M	10788.24	47.20
HCl 6M	536.47	97.37

Al igual que en los metales, el lavado con ácido reflejó un influencia directa en la concentración de cianuro presente en el lodo, liberándolo de los complejos a los cuales se encuentra asociado. En la **tabla 15**, se observa las concentraciones y porcentajes de remoción obtenidas de cianuro total después del lavado con HCl a 1 M, 3 M y 6 M. Ver **Anexo E**

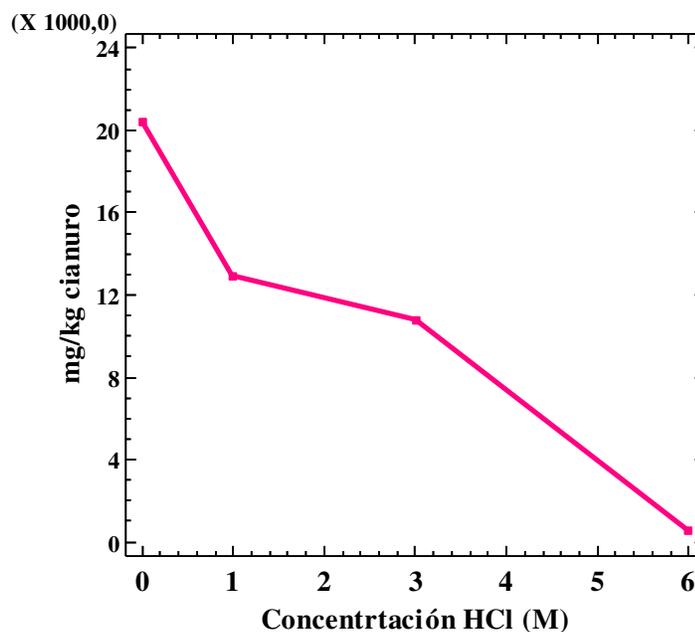


Grafico 9. Concentración de cianuro después de lavado con HCl

En la **gráfica 9**, se observa que para el lavado con HCl 6 M, se pasó de una concentración inicial de 12934.13 mg/kg a una concentración final de 536.47 mg/kg de CN⁻, donde la diferencia en las concentraciones del contaminante fueron retenidas sobre la trampa de NaOH, esto representa una descontaminación del lodo y a su vez permite una recuperación del cianuro en forma de hidróxido.

3.3 LAVADO DE LODO CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO H₂O₂

De acuerdo al lavado anterior, las condiciones para iniciar este segundo lavado partieron de las mejores remociones obtenidas, las cuales fueron con el lavado HCl 6 M en un tiempo de tres horas.

Tabla 16. Remoción CN⁻ total con peróxido de Hidrogeno H₂O₂

Relación H ₂ O ₂ /tiempo (horas)	Concentración (mg/kg)	Remoción (%)
1/1	534.99	0.28
½	509.35	5.06
1/3	455.96	15.01
2/1	535.34	0.21
2/2	533.85	0.49
2/3	532.98	0.65

La finalidad de este segundo lavado fue encontrar la mejor relación entre la cantidad de peróxido de hidrogeno y la cantidad de cianuro total, para oxidar el resto de cianuro presentes en la muestra. En la **tabla 16**, se puede observar las remociones de cianuro total obtenidas para una relación 1.2g H₂O₂:2.3g CN⁻ y una relación de 12g H₂O₂:2.3g CN⁻ de peróxido utilizado. Ver **Anexo F**

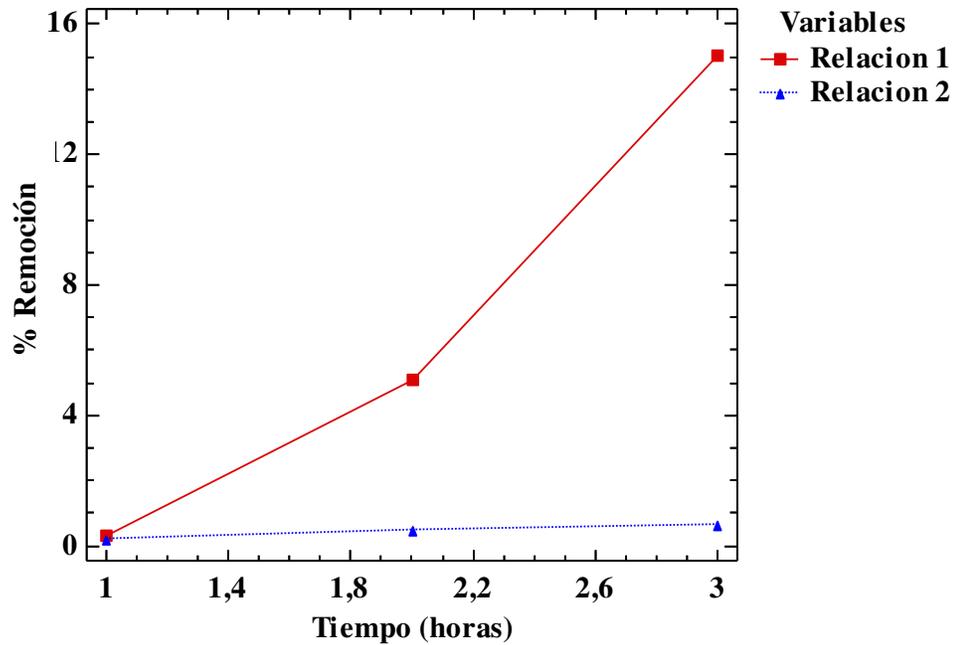


Grafico 10. Remoción CN^- total con H_2O_2

Al someterse la muestra de lodo a lavado con peróxido en relación 1.2 g H_2O_2 :2.3 g CN^- , se observó un gradiente de remoción de cianuro de 0.28%, 5.06% y 15.01% para los tiempos de 1 h, 2 h y 3 h respectivamente. Sin embargo, al utilizar una relación de peróxido de 10 veces la cantidad inicial, es decir, 12g H_2O_2 :2,3g CN^- no se observó remoción en el transcurso del tiempo, (Ver **gráfico 10**); de igual forma el análisis estadístico de ANOVA (Ver **Anexo H**) demostró que existieron diferencias altamente significativas en las concentraciones medias de CN^- al utilizar distintas cantidades de peróxido y distintos tiempo de lavado, siguiendo el orden de 3h>2h>1h. Así que, a pesar de que el HCl removió el 97.37% del cianuro en el lodo, utilizando una relación de 1.2 g H_2O_2 :2.3 g CN^- se pudo remover el 15.01% del residual del lavado con ácido, para un total de 97.77% de cianuro. Por esta razón, existe una cantidad de H_2O_2 en exceso, que hace que la remoción de cianuro se vuelva constante dentro de un rango de tiempo adecuado (Delgado y Ortiz 2009)

Aunque la finalidad del lavado fue oxidar el cianuro restante en el lodo, también se tuvo en cuenta el comportamiento de la concentración de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As, ante el efecto de este agente oxidante como se observa en las **tablas 17 y 18**. Ver **Anexo C**.

Tabla 17. Resultados de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As con relación 1 de H₂O₂

Metal /Tiempo	Relacion1.2g CN:2.3g H ₂ O ₂					
	concentración (mg/kg) / remoción					
	1h	%	2h	%	3h	%
Hg	15.95	17.41	14.89	22.88	19.24	0.39
Pb	86.43	4.08	750.24	16.56	695.14	22.69
Cd	52.72	14.32	53.94	12.33	58.73	4.55
Fe	80447.87	0.06	76905.23	4.46	64400.51	19.99
Zn	582.95	12.14	581.34	12.38	634.56	4.36
As	419.65	0.63	420.27	0.49	360.54	14.63

Tabla 18. Resultados de Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As con relación 2 de H₂O₂

Metal /Tiempo	Relacion12g CN:2.3g H ₂ O ₂					
	concentración (mg/kg) / remoción					
	1 h	%	2h	%	3h	%
Hg	16.24	15.91	16.33	15.,47	19.23	0.42
Pb	804.60	10.52	828.66	7.81	752.33	16.33
Cd	55.43	9.91	51.75	15.89	57.81	6.05
Fe	80443.62	0.06	80105.56	0.48	64443.37	19.94
Zn	583.43	12.07	569.11	14.22	614.8	7.34
As	419.82	0.59	420.22	0.50	336.0	20.37

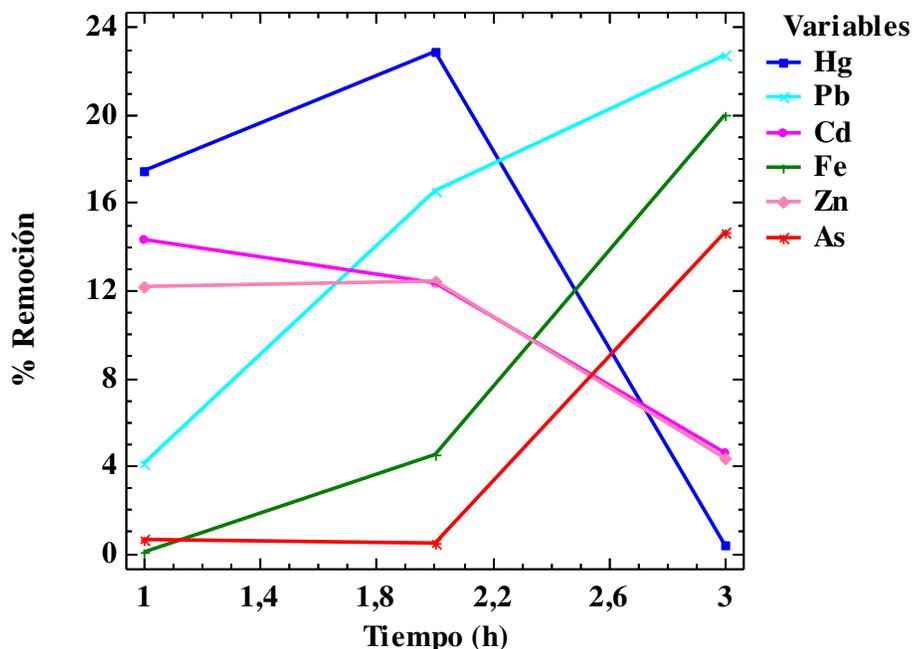


Grafico 11. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con relación 1.2g H₂O₂:2.3g CN

Teniendo en cuenta el **gráfico 11**, que en la primera relación de peróxido al cabo de tres horas se obtuvo mejor remoción, se logra obtener de igual forma una remoción significativa en metales como Pb, Fe y As de 22.69%, 19.99% y 14.63% respectivamente. En el resto de metales analizados, en las primeras horas de agitación se observó un aumento en la remoción, sin embargo al alcanzar la última hora de agitación empezaron a aumentar la concentración en los lodos, probablemente debido a procesos de precipitación después de la segunda hora de lavado. Es decir, al cabo de una hora se presentó una remoción de 17.41%, 14.32% y 12.14% de Hg, Cd y Zn respectivamente; a las dos horas el Hg y Zn aumentaron su remoción en una cantidad de 5.47% y 0.24% respectivamente. No obstante, al aumentar el tiempo de agitación, la acción del agente oxidante favorece la formación de hidróxidos metálicos tales como el Hg(OH)₂, Cd(OH)₂ y el Zn(OH)₂ que precipitan aumentando la concentración de estos metales en

los lodos (Gaviria y Meza 2006). Para Cd solo se obtuvieron porcentajes de remoción significativos al transcurrir la primera hora de lavado, al aumentar el tiempo se aumentó la concentración del metal.

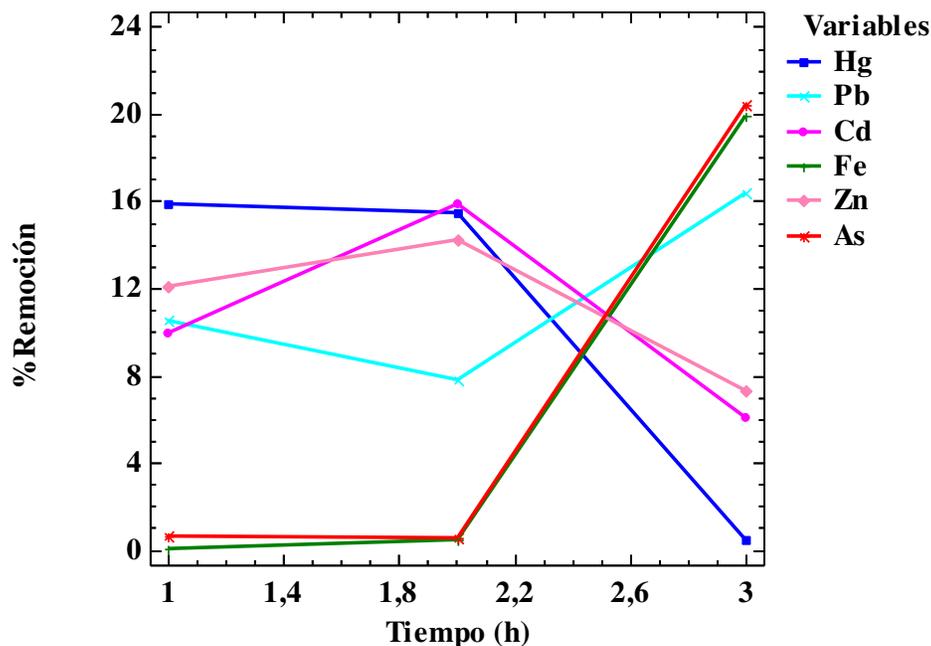


Grafico 12. Remoción de metales (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) con relación 12g H₂O₂:2.3g CN

El **grafico 12**, muestra que a una relación 12g H₂O₂:2.3g CN, metales como Pb, As y Fe presentaron remoción de 16.33%, 19.94% y 20.37% respectivamente al cabo de tres horas de agitación, siendo estas los mejores porcentajes alcanzados con dicha relación de peróxido de hidrógeno. Para el Hg, Cd y Zn se obtuvieron remociones de 15.31%, 9.91% y 12.07% para una hora de agitación, 15.47%, 15.89% y 14.22% en la segunda hora de agitación y 0.42%, 6.05% y 7.34% a las tres horas de agitación respectivamente. Lo anterior demuestra que Cd y Zn aumentaron su remoción al alcanzar dos horas de agitación pero al seguir pasando el tiempo empezaron a aumentar la concentración en la muestra de lodo, por efecto de formación de especies precipitantes [Hg(OH)₂, Cd(OH)₂

y $Zn(OH)_2$]. Para Hg, solo al pasar la primera hora de agitación se removió su concentración significativamente.

El análisis de ANOVA (ver **Anexo H**) muestra diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones medias de metales con respecto al tiempo de agitación; el análisis de Tukey demostró que no existieron diferencias en las dos primeras horas para las remociones de Cd, Hg y Zn obteniéndose en estas las mayores porcentajes de remoción; sin embargo para el Fe y As se observaron las más altas remociones para la tercera hora de agitación según los resultados del análisis de rango múltiple a $p < 0.05$.

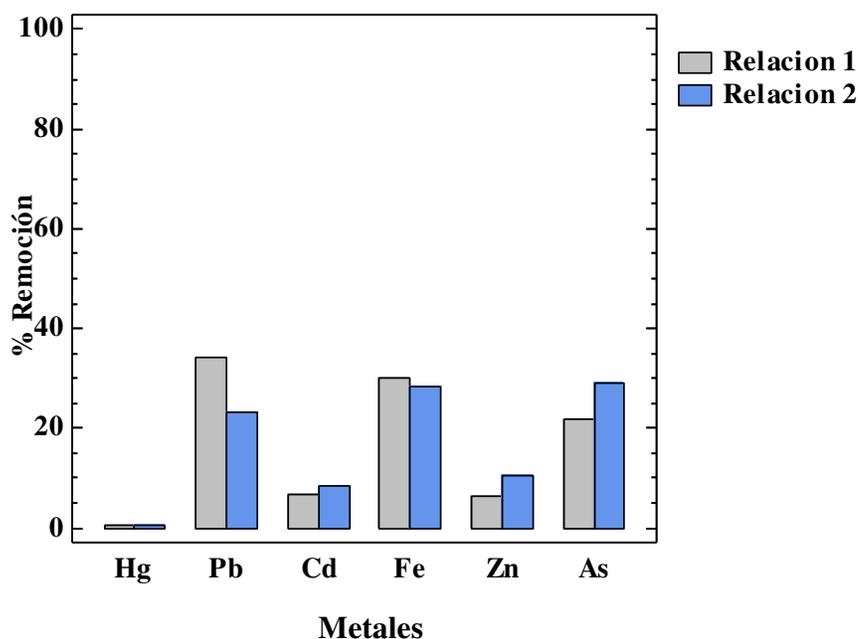


Gráfico 13. Comparación de relaciones de peróxido a tres horas de lavado

El **gráfico 13** muestra la comparación entre la relación 1.2g H_2O_2 :2.3g H_2O_2 y 12g CN: 2.3g CN de peróxido de hidrógeno utilizado en el primer lavado. Los porcentajes de remoción comparados son los obtenidos para el tiempo de tres horas, debido a que en

este tiempo se alcanzó la mejor remoción de cianuro total. En el lavado con relación 1 y 2 se observó remoción de todos los metales de interés. Sin embargo, para la relación 1, la cual obtuvo la mayor remoción de cianuro, hubo mayor remoción de Pb y Fe en comparación con todos los metales en la relación 2. El análisis de ANOVA (ver **Anexo H**) mostró que el efecto del peróxido en los metales analizados con ambas relaciones, es el mismo para los tiempos establecidos a un nivel de confianza del 95%.

Los resultados obtenidos del lavado con peróxido de hidrogeno dan respuesta a la oxidación del cianuro libre, el cianuro combinado con cadmio, cobre, níquel y zinc a cianato, los metales que quedan libres, quedan en forma de hidróxidos y dependiendo del pH será la concentración final en el suelo.

Realizando los lavados con HCl 6M a tres horas y una relación 1.2g H₂O₂: 2.3g CN⁻ a tres horas, se obtuvieron remociones totales de 65.2% Hg, 22% As, 96.6%, 22,6% de Cd, 94,24% Zn, 51% Fe y 97.77% de cianuro total, estando la concentración final de Hg y Zn por debajo de los límites permitidos por la norma chilena, con valores de 19,24 634.56 mg/kg y mg/kg respectivamente. La caracterización de los lixiviados obtenida después del tratamiento, presentó una concentración de 34.62mg/kg de Hg, 14461.04 mg/kg de Pb, 14.37 mg/kg Cd, 51021.40 mg/kg Fe, 10360.82 mg/kg Zn y 40.02 mg/kg de As.

3.4 BENEFICIOS AMBIENTALES EN LA APLICACIÓN DEL PROYECTO

Se observaron impactos tanto positivos como negativos en el medio donde se desarrolla el proyecto. Ver **Tabla 20**, la columna que indica los impactos con tratamiento, describe aquellas afectaciones directas e indirectas que tiene el proyecto a los impactos ya

generados por la minería de oro, esta descripción deja ver que es mayor el número de impactos positivos, que los negativos, por lo tanto ambientalmente hablando se puede decir que es un proyecto viable y beneficioso, tanto para los propietarios de la mina como para la comunidad afectada, ya que logra mayor aceptación de estos proyectos en las comunidades, al ver que sus recursos no se verán afectados.

Tabla 19. Beneficios del sistema de lavado.

Sin Tratamiento				Con tratamiento
Medio		Impacto		Impacto
Abiótico	Suelo	Contaminación del suelo	Botaderos y cola ricos en cianuro y metales pesados	En las colas y lodos residuales un 97.77% de remoción de cianuro, 65.2% de remoción en Hg, 96.6% de remoción de Pb, 27% de remoción de Fe, 22% de remoción de As y 15% de remoción de Cd y Zn. Por lo tanto hay una disminución significativa de estos contaminantes en los suelos donde se realice la disposición final de estos. (+) Disminución en el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por el arrastre de estos contaminante en los suelos. (+)
	Aire	Emisiones de gases, vapores de Hg y HCN	Malas prácticas en el manejo y destilación de la amalgama de mercurio	Control de gases de Hg y HCN durante el tratamiento. (+) Se reduce la probabilidad de intoxicación en los operarios. (+) Aprovechamiento del cianuro y Hg recuperado. (+) Reducción de costos de reactivos para el beneficio. (+)

Sin Tratamiento		Con tratamiento		
Medio		Impacto		
Abiótico	Agua	Contaminación del agua	Por Hg (Efluentes solidos)	Reducción del mercurio biodisponible en los lodos. (+) Disminución de probabilidad de infiltración y posterior contaminación de cuerpos hídricos. (+) Reducción de posibles intoxicaciones en las personas que utilizan estas fuente para consumo(+)
			Por Cianuro (Efluentes solidos)	Eliminación el cianuro libre de los lodos residuales. (+) Disminuye la probabilidad de contaminar cuerpos hídricos. (+) Disminución de muertes de peces y otros animales acuáticos. (+)
			Metales pesados en solución	Disminución significativa del mercurio y plomo en solución, evitando así la acumulación en plantas y la intoxicación por ingesta de estos(+)
			Drenajes ácidos	Aumento del pH de los lodos residuales, evitando la disolución de los restantes por lixiviación (+) No se produce contaminación de los cuerpos hídricos aledaños y de los cultivos. (+)

Sin Tratamiento				Con tratamiento
Medio		Impacto		Impacto
Abiótico	Agua	Contaminación del agua	Por Hg y CN (Efluentes líquidos)	<p>Generación de Residuos líquidos ricos en metales pesados como Hg, Pb, Cd, Zn, Fe y As, con un volumen aproximado de 1L por cada 100g tratados, sin posterior tratamiento. (-)</p> <p>Aumento de costos extra de inversión. (-)</p> <p>Dificultades para disposición final.(-)</p>
Biótico	Flora y fauna	Pérdida de biodiversidad	Afectación a la fauna acuática	<p>Reducción de biodisponibilidad de metales. (+)</p> <p>Disminución en la bioacumulación en la fauna acuática. (+)</p> <p>Reducción de enfermedades por consumo de peces. (+)</p> <p>Aumento de las actividades piscícolas. (+)</p>
			Afectación a los microorganismos	No se produce proliferación de microorganismos benéficos para plantación de cultivos. (-)
	Paisaje	Modificación del paisaje	Deforestación y erosión	Disposición adecuada de lodos residuales, cambiando así la visión negativa de la minería en las comunidades mineras(+)

Sin Tratamiento				Con tratamiento
Medio		Impacto		Impacto
Socio - económico	Social	Calidad de vida	Afectaciones a la salud	Disminuye la afectaciones en la salud, provenientes de la acumulación en plantas y frutos, de cultivos en zonas mineras, como resultado de la baja biodisponibilidad de metales en los lodos residuales, mejorando así la calidad de vida de las comunidades aledañas (+)
	Económico	Generación de empleo	Alto % de empleo de mano de obra	Generación de empleo a la comunidad, para la operación del sistema de tratamiento. (+) Aceptación de la minería en la comunidad y mejorando la calidad de vida de las familias involucradas(+)

(+): Indica que el impacto fue positivo (-): Indica que el impacto fue negativo

4. CONCLUSIONES

Para lodos residuales del proceso de neutralización de cianuro, el tratamiento de lavado es una alternativa práctica, que permite la movilización o arrastre de metales pesados y remoción de cianuro, característicos de estos lodos. El objetivo general de este estudio, se pudo alcanzar teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímica de lodos, que mostró altas concentraciones de Hg, Pb, Zn, CN^- , Cd Fe y As, lo que permitió comparar las condiciones iniciales de lodos en los resultados obtenidos posterior al tratamiento de lavados, con lo cual se pudo calcular la cantidad de los contaminantes removidos y se determinó que el lavado de los lodos del proceso de neutralización de cianuro es eficiente, al obtener altas remociones de Hg, Pb, Zn y CN^- con valores aproximados de 65%, 97%, 94% y 98% respectivamente, con la utilización de HCl 6 M como primer lavado y aplicando 1.2g H_2O_2 : 2.3g CN^- como segundo lavado, ambas con tiempo de tres horas. Sin embargo, para metales como Cd, Fe y As, también se logró obtener remociones considerables de 22.6%, 51% y 22% aproximadamente. Además, la identificación y descripción de los beneficios ambientales permitió establecer que el tratamiento de lavado es ambientalmente viable, por lo que es una alternativa de tratamiento prometedor para lodos con las características estudiadas.

Cabe resaltar, que el 99% de la biodisponibilidad de los metales estudiados, es decir, Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As, se encontraron asociados a la fase residual (oxidables y asociados a silicatos), más exactamente a la red silicatada del lodo por el bajo porcentaje de materia orgánica, indicando que en su totalidad, antes y después del lavado aplicado no son biodisponibles para el medio de disposición final. Sin embargo, después de la aplicación de este lavado las concentraciones de cianuro se remueven del lodo. Lo anterior, disminuye las posibilidades de contaminación de sus medios receptores como el suelo, sobre el cual puede ser depositado y este posteriormente puede ser arrastrado a las aguas superficiales y subterráneas promoviendo así su consumo y bioacumulación en plantas y animales que entran en la cadena trófica.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de este tratamiento para remover altas concentraciones de metales pesados como Hg, Pb, Zn y cianuro total.

Este proyecto puede ser aplicado y utilizado por todas las actividades de minería de oro en el país.

Se recomienda realizar estudios sobre la remoción directamente proporcional de Hg al seguir aumentando las concentraciones de ácido clorhídrico, y la posible afectación de los parámetros fisicoquímico al tratamiento.

Para obtener los resultados alcanzados por este proyecto, el tratamiento solo se puede aplicar bajo las condiciones sobre las cuales se realizó y modificó.

Para los metales como Fe, Cd y As se recomienda aplicar un tratamiento posterior para reducir su contenido en los lodos, a pesar de que presentan baja biodisponibilidad.

Aplicar un sistema complementario para el tratamiento de los lixiviados obtenidos en el proceso de lavado, debido a sus altas concentraciones de metales.

Se recomienda aplicar métodos alternativos para la obtención de oro con el fin de reducir el consumo excesivo de cianuro de sodio.

Se recomienda realizar un análisis técnico económico de este trabajo de investigación, con fines de proyección a gran escala.

Se recomienda realizar estudios sobre toxicidad y la posible disposición adecuada de este tipo de residuo.

6. BIBLIOGRAFÍA

Agraz, F. Guízar, B. Larrea, P. Castillo, M. Velázquez, A. y Vázquez, V. 2013. Intoxicación por metales pesados en la salud. Internet, <http://www.acmor.org.mx/reportescongreso/2013/prepa/biolquimsalud/231-intoxicacion-metales-pesados.pdf>

Alcaino, G. 2012. Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales. Tesis Ingeniero Civil en Biotecnología, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

ARMCANZ/ANZECC. 2000. Guidelines for direct land application of biosolids and biosolids products. Australia.

Barragán, O. 2008. Estudio de diferentes metodologías para determinar la biodisponibilidad de cadmio y arsénico en suelos y su relación con la concentración en plantas. NOVA 6(9): ISSN:1794-2470

Barrientos, H. 2011. Reconocimiento y prospección arqueológica en la explotación mineral la chiva, licencia N°16902, municipio San Martín de Loba, Departamento de Bolívar. Universidad de Antioquia. Medellín. p14

Botz, M. 1999. Overview of cyanide treatment methods. Reprinted with permission of The Gold Institute. Washington, D.C. (USA) 20036

Cline, R. Y Reed, E. 1995. Lead removal from soils via bench-scale soil washing techniques. J. Environ. Eng. 121, 700–705.

Cotton, A. Wilkinson, W. Y Gauss, L. 1995. Basic inorganic chemistry, third ed. John Wiley and Sons Inc, New York, USA.

Delgado, J Y Ortiz, J. 2009. Estudio del proceso de neutralización del cianuro presente en los residuos del proceso de lixiviación deminerales auríferos en el distrito minero de vetas y california. Tesis Ingeniero Metalurgico. Universidad industrial de Santander, Bucaramanga.

ERIKSSON, A Y JOHANSSON, P. 2013. Soil Washing: Optimization of Acid Leaching of Copper from Contaminated Soil. Thesis in the Master Degree Programme, Chemistry and Bioscience, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, Sweden.

Espinosa, L. Parra, J. Y Villami, C. 2011. Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de santa marta, Colombia. INVEMAR 40(1): 0122-9761

Fajardo, J. Burbano, D. Burbano, E. Apraez, J. y Moreano, M. 2010. Estudio de métodos químicos de remoción de cianuro presente en residuos de cianuración provenientes del proceso de extracción de oro de veta en el departamento de Nariño. Revista Luna Azul 31(8-16): 1909-2474.

Gabriel, D. Williamson. 2004. Principal biogeochemical factors affecting the speciation and transport of mercury through the terrestrial environment Environ. Geochem. Health.

Gaviria, A. y Meza, L. 2005. Analysis of alternatives for the degradation of the cyanide in liquids and solids efluentes of the county of segovia, antioquia and in the ore dressing mill of the mineros nacionales, county of marmato, caldas 73(149): ISSN 0012-7353

Gómez, D. 2011. Validación de la metodología por el método estándar 3111^a – absorción atómica para el análisis de metales pesados en muestras de aguas y aguas

residuales. Tesis Tecnólogo Químico, Corporación Autónoma Regional De Risaralda Carder, Pereira.

Gómez, P. 2012. Degradación de cianuros mediante oxidación química de efluentes industriales. Tesis de Maestría. Departamento de Química orgánica e Inorgánica. Universidad de Oviedo, Oviedo. p. 1–8.

Instituto Colombiano Agustín Codazzi. 2012. Conflictos de uso del territorio colombiano escala 1:100.000.

Instituto nacional de normalización (INN). 2004. Norma uso de lodos y norma chilena Compost-clasificación y requisitos. Chile.

Kabata, P. 2011. Trace Elements in Soils and Plants (fourth ed.) CRC Press, Boca Raton, Florida

Kim, K. Kim, J. Park, J. Kim, M. Owens, G. Youn, G. Y Lee, J. 2012. Immobilizer-assisted management of metal-contaminated agricultural soils for safer food production. J. Environ, Manag. 101. p88-95

Lee, T. Kwon, Y. Y Kim, D. 2004. Oxidative treatment of cyanide in wastewater using hydrogen peroxide and homogeneous catalyst. Journal of environmental science and health 39(3):787-801.

Logsdon, M. Hagelstein, K. Y Mudder, T. 2001. El manejo del cianuro en la extracción de oro. p7. Internet, <http://www.panoramaminero.com.ar/ICMME.pdf>

Marmo, I. 2003. Heavy metals in the context of EU policies on soil and waste. European Commission, DG Environment.

Martínez, V. Núñez, R. Vong, Y. Avelar, F. y Rodríguez, F. 2005. Lavado de suelo contaminado con plomo y recuperación electroquímica del Pb. Memorias I. Congreso Interamericano de Residuos, Mérida. p1-10.

Ministerio del ambiente. 2014. Guía para muestreo de suelos en el marco del decreto supremo N°002-2013-MINAM, estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo. Internet, http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf

Moutsatsou, A. Gregou, M. Matsas, D. y Protonotarios, V. 2005. Washing as a remediation technology applicable in soils heavy polluted by mining-metallurgical activities. CREMOSPHERE 63(1): 1632-1640.

Nelson, D.Y Sommers, L. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Black, C.A., ed. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. p961-1010

NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial, 31 de diciembre de 2002.

Nuñez, J. 2000. Fundamentos de la edafología. Editorial universidad estatal a distancia, Costa Rica, p119-150

Ortiz. I. Sanz, J. Dorado, M. Y Villas, S. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informa de vigilancia tecnológica. España. p33

Pak, D. Y Chang, W. 1996. Oxidation of aqueous cyanide solution using hydrogen peroxide in the presence of heterogeneous catalyst. *Environmental Technology* 18(5)

Reda, A. Chergui, S. Chergui, A. Halet, F. Hamza, A. Nadjemi, B. Ould-Dris, A. Y Belkouch, J. 2011. Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide in presence of copper-impregnated activated carbon. *Minerals Engineering* 24(1): 0892-6875

Sancha, A. 2005. Criterios de calidad de agua o efluentes tratados para uso en riego. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile. p18

Scavo, M. 2004. Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en Villa de Cura, estado Aragua". Tesis de Maestría Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía. Caracas. 71p.

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. 2004. LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT/SSA1. México.

Sistema De Información Minero Colombiano. 2015. Comportamiento de la producción minera y exportaciones en Colombia primer trimestre del 2015. Internet, <http://www.simco.gov.co/>

Tessier, A. Campbell, P. Y Bisson, M. 1979. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *ANALYTICAL CHEMISTRY* 5(7): 0003-2700/79/0351-0844\$0 1 .00/O

Tessier, A. Campbell, P. Y Bisson, M. 1980. Trace metal speciation of USGS reference sample MAG-1. *Geostandards Newsletter, Association Nationale de la Recherche Technique* 4(2): 145-148

Tipping, M. Kim, Y. Kyriakakis, P. Tong, M. Shvartsman, S.Y Veraksa, A. 2010. β -arrestin Kurtz inhibits MAPK and Toll signalling in *Drosophila* development. *EMBO J.* **29(19)**: 3222--3235.

Torres, L. López, R. y Beltran, M. 2012. Removal of As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from a highly contaminated industrial soil using surfactant enhanced soil washing. *Elsevier* 37-39, p30-36.

Tovar, R. Hernández, J. Y Monroy, M. 2012. Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental* 28(3): 188-4999

U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge (40 code of federal regulation part 503). Washington, D.C. U.S.

Udovic, M. Y Lestan, D. 2012. EDTA and HCL leaching of calcareous and acidic soils polluted with potentially toxic metals: Remediation efficiency and soil impact. *Chemosphere* 88(2012):718-724

Unidad De Planeación Minero Energética. 2006. Formulación de una iniciativa de producción más limpia para el sector de los metales preciosos en pequeña escala en Colombia. *GeoMinas S.A.* 431p.

Unidad De Planeación Minero Energética. 2007. Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Mercurio, Cianuro y otras sustancias. Subdirección de planeación minera. 24-25p.

Unidad de Planeación Minero Energético. 2014. Estudio de la cadena de mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro. Internet, http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/cadena_de_mercurio/Cadena_Mercurio_Tomo_II.pdf

Van, J. Matsumoto, R. Y Young, H. 1997. Evaluation and analysis of soil washing for seven lead contaminated soils. J. Environ. Eng. 123, 217–224.

Velasco, J. De la rosa, D. Ramírez, M. y Volke, T. 2004. Evaluación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales. INE-Semarnat, México.

Villafañe, R. DeLeón, N. Camacho, F. Ramírez, R. y Sánchez, L. 2011 Acumulación y lavado de sales en columnas de suelo regadas con agua salina procedente de un pozo petrolero. Agronomía Tropical 54 (1): 0002-192X.

Volke, T. Velasco, J. Y De la rosa, D. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Instituto Nacional de Ecología. Mexico. p70-71

Wuana, R. Okieimen, F. Y Imborvungu, J. 2010. Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. Int. J. Environ. Sci. Tech., 7 (3):1735-1472.

Wuana, R. Y and Okiyeimen, F. 2011. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. ISRN Ecology 2011(1):402647. P20

Xu, J. Kleja, D. Biester, H. Lagerkvist, A. Y Kumpiene, J. 2014. Influence of particle size distribution, organic carbon, pH and chlorides on washing of mercury contaminated soil, Chemosphere, Volume 109, Pages 99-105

Yupari, A. 2001. Pasivos ambientales mineros en Sudamérica. CEPAL, Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales, BGR, y el Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN.

ANEXO

Anexo A. Límites máximos de metales pesados totales permitidos en los lodos aplicados a distintos suelos de Australia, Estados Unidos, Chile y Europa.

Norma	Fuente	Descripción	Unidad	Metales				
				As	Cd	Hg	Pb	Zn
Norma Australian Standard AS4454-1999	ARMCANZ ANZECC 2000	Lodo C1	mg/kg MS	20	3	1	150	200
		Lodo C2		60	20	15	420	2500
Norma de lodos Chile Nch295c-2004	INN 2004	Suelos aptitud frutal y/o forestal	mg/kg MS	20	8	10	300	2000
		Suelos degradados		40	40	20	400	2800
Norma de EEUU 503-40 CFR/1993	US EPA 1993	Concentración	mg/kg MS	75	85	840	420	7500
		Tasa anual	Kg/ ha yr	2	1.9	15	21	140
		Carga acumulada	Kg/ha	41	39	300	420	2800
Directiva UE 86/278/EEC	Marmo 2003	Suelos pH<7	mg/kg MS	n.n ⁵ .	20	16	750	2500
		Suelos pH>7		n.n.	40	25	1200	4000
Normativa oficial Mexicana-147-SEMARNAT/SSA1-2004	SEMARNAT 2004	Excelentes en base seca	mg/kg	41	39	17	300	2800
		Buenos en base seca		75	85	57	840	7500

Anexo B. Resultados obtenidos en el lavado con ácido para la remoción de metales pesados (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As).

Agente de lavado	Tiempo (h)	Hg		Pb		Cd		Zn		Fe		As	
		Concentración (mg/kg)	Remoción (%)										
HCl 1M	1	52.19	5.54	17324.53	15.14	67.64	10.89	2053.80	81.37	124005.19	5.71	452.37	2.16
		51.91	6.04	17341.77	15.05	67.78	10.70	2554.37	76.83	124230.78	5.54	452.24	2.19
		52.49	5.00	17314.53	15.19	67.72	10.77	2064.62	81.27	123816.34	5.85	452.79	2.07
	2	47.19	14.59	17181.51	15.84	67.44	11.15	1877.18	82.97	123728.87	5.92	449.11	2.86
		47.60	13.84	17248.18	15.51	67.62	10.92	2127.10	80.71	123828.84	5.84	449.57	2.76
		47.44	14.14	17224.31	15.63	67.45	11.13	1989.65	81.95	123616.41	6.01	451.60	2.33
	3	44.86	18.81	17145.19	16.02	67.23	11.42	2352.03	78.67	124578.60	5.27	448.14	3.07
		45.27	18.07	17429.84	14.62	67.20	11.46	2551.97	76.85	124503.63	5.33	449.90	2.69
		43.74	20.83	17314.65	15.19	67.27	11.37	2501.98	77.31	124428.65	5.39	450.89	2.48
HCl 3M	1	50.68	8.27	9568.60	53.13	65.82	13.29	2725.59	75.28	97469.20	25.89	365.78	20.89
		50.20	9.15	8432.69	58.69	65.88	13.21	3150.87	71.42	98595.50	25.03	366.71	20.69
		50.90	7.88	8582.77	57.96	65.99	13.06	2275.23	79.36	99767.29	24.14	368.85	20.22
	2	44.79	18.94	7265.32	64.41	66.93	11.81	2450.63	77.77	93544.81	28.87	358.81	22.39
		43.39	21.48	7590.50	62.82	67.13	11.55	2000.26	81.86	95292.76	27.54	356.65	22.86
		44.09	20.21	7365.85	63.92	67.04	11.67	2225.85	79.81	94388.30	28.23	360.90	21.94
	3	33.68	39.04	9270.83	54.59	66.96	11.78	2775.58	74.82	96569.34	26.57	358.00	22.57
		34.71	37.18	8903.10	56.39	66.57	12.29	3400.82	69.15	95021.22	27.75	355.04	23.21
		32.80	40.64	7799.37	61.80	67.08	11.62	1850.27	83.22	95717.71	27.22	354.98	23.22
HCl 6M	1	48.41	12.39	700.90	96.57	63.71	16.05	2002.12	81.84	80754.81	38.60	426.65	7.72
		50.21	9.12	785.45	96.15	65.82	13.29	1705.31	84.53	81271.33	38.20	432.70	6.41
		46.84	15.22	685.98	96.64	64.48	15.05	282.21	97.44	82499.99	37.27	425.89	7.89
	2	31.16	43.61	554.32	97.28	62.79	17.28	1652.23	85.01	78830.41	40.06	423.82	8.33
		38.22	30.83	604.35	97.04	64.62	14.86	1205.63	89.06	80771.65	38.58	428.81	7.25
		30.90	44.07	491.81	97.59	62.59	17.53	1306.45	88.15	82100.29	37.57	422.81	8.55
	3	17.05	69.15	980.47	95.20	61.08	19.52	652.55	94.08	78555.50	40.27	420.06	9.15
		20.39	63.10	910.73	95.54	62.42	17.76	456.12	95.86	82620.46	37.18	428.17	7.39
		20.50	62.90	806.25	96.05	61.09	19.51	881.76	92.00	80301.61	38.94	418.75	9.43

Anexo C. Resultados de metales pesados (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) obtenidos en el lavado con peróxido de hidrogeno.

Agente de lavado	Tiempo (h)	Hg		Pb		Cd		Zn		Fe		As	
		Concentración (mg/kg)	Remoción (%)										
1.2gCN:2.3g H2O2	1	15.14	21.61	899.05	0.01	53.13	13.65	591.68	10.82	80440.29	0.06	421.92	0.10
		16.86	12.69	862.47	4.08	52.50	14.69	578.15	12.86	80448.55	0.05	418.21	0.97
		15.85	17.94	825.76	8.16	52.53	14.63	578.99	12.73	80454.77	0.05	418.83	0.83
	2	14.14	26.77	551.78	38.63	54.07	12.12	591.35	10.87	74958.93	6.87	419.79	0.60
		15.55	19.47	882.70	1.83	53.77	12.62	573.87	13.51	80320.31	0.21	421.92	0.10
		14.98	22.41	816.25	9.22	54.00	12.24	578.79	12.76	75436.44	6.28	419.10	0.76
	3	19.19	0.65	707.68	21.29	57.89	5.92	629.73	5.09	64677.16	19.65	358.47	15.12
		19.26	0.29	657.40	26.89	58.43	5.04	618.67	6.75	62581.85	22.25	377.93	10.51
		19.27	0.24	720.33	19.89	59.88	2.69	655.27	1.24	65942.51	18.08	345.21	18.26
12gCN:2.3g H2O2	1	13.92	27.93	886.14	1.45	56.25	8.58	588.05	11.37	80434.71	0.07	421.03	0.31
		18.96	1.83	739.31	17.78	54.75	11.02	578.87	12.75	80451.44	0.05	418.68	0.86
		15.84	17.97	788.35	12.32	55.30	10.13	583.36	12.08	80444.73	0.06	419.74	0.61
	2	14.40	25.43	848.04	5.68	52.66	14.42	585.03	11.82	80159.17	0.41	421.81	0.12
		17.56	9.05	822.06	8.57	50.92	17.25	555.33	16.30	80042.26	0.56	419.39	0.70
		17.01	11.91	815.89	9.26	51.69	15.99	566.95	14.55	80115.26	0.47	419.45	0.68
	3	19.30	0.07	792.82	11.83	60.53	1.63	658.38	0.77	67717.76	15.87	394.65	6.55
		19.22	0.49	704.28	21.67	53.48	13.09	592.36	10.72	62233.59	22.68	305.15	27.75
		19.18	0.69	759.89	15.49	59.43	3.42	593.65	10.52	63378.77	21.26	309.11	26.81

Anexo D. Resultados de Biodisponibilidad de metales después (Hg, Pb, Cd, Fe, Zn y As) del lavado con HCl.

Concentraci n de HCl	Hg				Pb				Cd			
	F-1 mg/kg	F-2 mg/kg	F-3 mg/kg	FR mg/kg	F-1 mg/kg	F-2 mg/kg	F-3 mg/kg	FR mg/kg	F-1 mg/kg	F-2 mg/kg	F-3 mg/kg	FR mg/kg
3M	0.11	0.05	0.27	18.89	0.37	0.29	0.11	20414.29	0.00	0	0	75.9
	0.12	0.03	0.24	18.93	0.31	0.32	0.24	20414.18	0.00	0	0	75.9
	0.10	0.04	0.33	18.84	0.34	0.41	0.17	20414.14	0.00	0	0	75.9
6M	0.04	0.02	0.05	19.20	0.49	0.10	0.01	20414.45	0.00	0	0	75.9
	0.04	0.02	0.04	19.21	0.49	0.08	0.13	20414.37	0.00	0	0	75.9
	0.05	0.02	0.04	19.21	0.46	0.06	0.02	20414.52	0.00	0	0	75.9
1M	0.03	0.09	0.02	19.17	0.25	0.66	0.31	20413.83	0.00	0	0	75.9
	0.02	0.07	0.03	19.19	0.26	0.57	0.25	20413.97	0.00	0	0	75.9
	0.02	0.12	0.03	19.15	0.25	0.67	0.30	20413.83	0.00	0	0	75.9
	Fe				Zn				As			
3M	0.42	0.09	0.21	131513.20	0.76	0.12	0.68	11022.83	0.02	0	0.04	462.29
	0.38	0.10	0.20	131513.24	0.59	0.12	0.75	11022.93	0.02	0	0.04	462.29
	0.36	0.07	0.17	131513.31	0.62	0.14	0.64	11022.99	0.01	0	0.03	462.3
6M	0.09	0.09	0.21	131513.54	0.39	0.10	1.04	11022.86	0.02	0	0.06	462.26
	0.12	0.09	0.25	131513.46	0.43	0.03	1.10	11022.83	0.02	0.01	0.06	462.26
	0.13	0.09	0.21	131513.48	0.52	0.10	0.88	11022.89	0.03	0	0.06	462.26
1M	0.18	0.19	0.23	131513.31	0.14	0.43	0.73	11023.09	0.01	0	0.07	462.26
	0.12	0.12	0.26	131513.41	0.11	0.38	0.85	11023.05	0.01	0	0.07	462.27
	0.15	0.23	0.27	131513.26	0.09	0.36	0.75	11023.19	0.01	0	0.06	462.27

Anexo E. Resultados de cianuro obtenidos en el lavado con ácidos.

Agente de lavado	Tiempo	Concentración	Remoción
HCl 1M	3	12935.02	36.70
		12933.13	36.71
		12934.25	36.70
HCl 3M	3	10787.20	47.21
		10789.26	47.20
		10788.25	47.20
HCl 6M	3	538.66	97.36
		533.84	97.39
		536.92	97.37

Anexo F. Resultados de cianuro obtenidos en el lavado con peróxido de hidrogeno.

Agente de lavado	Tiempo (h)	Concentración (mg/kg)	Remoción (%)
1.2gCN:2.3gH ₂ O ₂	1	532.98	0.65
		536.39	0.02
		535.60	0.16
	2	504.10	6.04
		514.60	4.08
		509.35	5.06
	3	448.96	16.31
		456.84	14.85
		462.09	13.87
12gCN:2.3gH ₂ O ₂	1	535.60	0.16
		534.29	0.41
		536.13	0.07
	2	532.98	0.65
		535.60	0.16
		532.98	0.65
	3	532.98	0.65
		530.35	1.14
		535.60	0.16

Anexo G. Pruebas estadísticas para el lavado con HCl.

Anexo G.1 Para el Zn:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	954,412 ^a	8	119,301	6,469	,001
Intersección	172705,944	1	172705,944	9365,066	,000
HCl	779,504	2	389,752	21,135	,000
Tiempo	46,344	2	23,172	1,257	,310
HCl * Tiempo	91,920	4	22,980	1,246	,329
Error	313,506	17	18,442		
Total	177203,960	26			
Total corregido	1267,917	25			

a. R al cuadrado = ,753 (R al cuadrado ajustada = ,636)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) HCl	(J) HCl	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	3	3,16	2,087	,309	-2,19	8,51
	6	-10,01*	2,024	,000	-15,20	-4,81
3	1	-3,16	2,087	,309	-8,51	2,19
	6	-13,16*	2,087	,000	-18,52	-7,81
6	1	10,01*	2,024	,000	4,81	15,20
	3	13,16*	2,087	,000	7,81	18,52

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 18,442.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo G.2 Para el Fe:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	4990,822 ^a	8	623,853	879,590	,000
Intersección	14315,620	1	14315,620	20184,055	,000
HCl	4981,442	2	2490,721	3511,748	,000
Tiempo	10,295	2	5,148	7,258	,005
HCl * Tiempo	5,945	4	1,486	2,095	,126
Error	12,057	17	,709		
Total	19339,768	26			
Total corregido	5002,880	25			

a. R al cuadrado = ,998 (R al cuadrado ajustada = ,996)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) HCl	(J) HCl	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	3	-20,97514*	,409222	,000	-22,02494	-19,92534
	6	-32,86778*	,397004	,000	-33,88623	-31,84932
3	1	20,97514*	,409222	,000	19,92534	22,02494
	6	-11,89264*	,409222	,000	-12,94244	-10,84284
6	1	32,86778*	,397004	,000	31,84932	33,88623
	3	11,89264*	,409222	,000	10,84284	12,94244

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,709.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-1,00764	,409222	,061	-2,05744	,04216
	3	-1,10111*	,397004	,033	-2,11957	-,08265
2	1	1,00764	,409222	,061	-,04216	2,05744
	3	-,09347	,409222	,972	-1,14327	,95633
3	1	1,10111*	,397004	,033	,08265	2,11957
	2	,09347	,409222	,972	-,95633	1,14327

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,709.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo G.3 Para el Cd:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	188,925 ^a	8	23,616	37,591	,000
Intersección	4570,736	1	4570,736	7275,637	,000
HCl	159,839	2	79,919	127,214	,000
Tiempo	6,901	2	3,451	5,493	,014
HCl * Tiempo	23,252	4	5,813	9,253	,000
Error	10,680	17	,628		
Total	4890,762	26			
Total corregido	199,605	25			

a. R al cuadrado = ,946 (R al cuadrado ajustada = ,921)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-,35636	,385137	,632	-1,34437	,63166
	3	-1,15823*	,373638	,017	-2,11675	-,19972
2	1	,35636	,385137	,632	-,63166	1,34437
	3	-,80188	,385137	,123	-1,78989	,18614
3	1	1,15823*	,373638	,017	,19972	2,11675
	2	,80188	,385137	,123	-,18614	1,78989

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,628.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) HCl	(J) HCl	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	3	-1,23713*	,385137	,013	-2,22515	-,24912
	6	-5,67198*	,373638	,000	-6,63050	-4,71347
3	1	1,23713*	,385137	,013	,24912	2,22515
	6	-4,43485*	,385137	,000	-5,42286	-3,44683
6	1	5,67198*	,373638	,000	4,71347	6,63050
	3	4,43485*	,385137	,000	3,44683	5,42286

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,628.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo G.4 Para el Hg:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	8994,465 ^a	8	1124,308	117,800	,000
Intersección	16627,911	1	16627,911	1742,203	,000
HCl	3100,222	2	1550,111	162,414	,000
Tiempo	4708,504	2	2354,252	246,669	,000
HCl * Tiempo	1185,739	4	296,435	31,059	,000
Error	171,795	18	9,544		
Total	25794,171	27			
Total corregido	9166,260	26			

a. R al cuadrado = ,981 (R al cuadrado ajustada = ,973)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) HCl	(J) HCl	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	3	-9,54778*	1,456342	,000	-13,26460	-5,83096
	6	-25,94778*	1,456342	,000	-29,66460	-22,23096
3	1	9,54778*	1,456342	,000	5,83096	13,26460
	6	-16,40000*	1,456342	,000	-20,11682	-12,68318
6	1	25,94778*	1,456342	,000	22,23096	29,66460
	3	16,40000*	1,456342	,000	12,68318	20,11682

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 9,544.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-15,90000*	1,456342	,000	-19,61682	-12,18318
	3	-32,34556*	1,456342	,000	-36,06238	-28,62873
2	1	15,90000*	1,456342	,000	12,18318	19,61682
	3	-16,44556*	1,456342	,000	-20,16238	-12,72873
3	1	32,34556*	1,456342	,000	28,62873	36,06238
	2	16,44556*	1,456342	,000	12,72873	20,16238

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 9,544.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo G.5 Para el Pb:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	29758,364 ^a	8	3719,796	1353,628	,000
Intersección	87832,474	1	87832,474	31962,111	,000
HCI	29664,304	2	14832,152	5397,399	,000
Tiempo	46,636	2	23,318	8,485	,003
HCI * Tiempo	47,424	4	11,856	4,314	,013
Error	49,464	18	2,748		
Total	117640,303	27			
Total corregido	29807,828	26			

a. R al cuadrado = ,998 (R al cuadrado ajustada = ,998)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) HCl	(J) HCl	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	3	-43,94667*	,781454	,000	-45,94107	-41,95227
	6	-81,09667*	,781454	,000	-83,09107	-79,10227
3	1	43,94667*	,781454	,000	41,95227	45,94107
	6	-37,15000*	,781454	,000	-39,14440	-35,15560
6	1	81,09667*	,781454	,000	79,10227	83,09107
	3	37,15000*	,781454	,000	35,15560	39,14440

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,748.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-2,83556*	,781454	,005	-4,82995	-,84116
	3	-,09778	,781454	,991	-2,09218	1,89662
2	1	2,83556*	,781454	,005	,84116	4,82995
	3	2,73778*	,781454	,007	,74338	4,73218
3	1	,09778	,781454	,991	-1,89662	2,09218
	2	-2,73778*	,781454	,007	-4,73218	-,74338

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,748.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo G.6 Para el As:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1829,358 ^a	8	228,670	685,043	,000
Intersección	3173,518	1	3173,518	9507,140	,000
HCl	1816,764	2	908,382	2721,307	,000
Tiempo	9,825	2	4,913	14,717	,000
HCl * Tiempo	2,769	4	,692	2,074	,127
Error	6,008	18	,334		
Total	5008,885	27			
Total corregido	1835,367	26			

a. R al cuadrado = ,997 (R al cuadrado ajustada = ,995)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) HCl	(J) HCl	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	3	-19,48667*	,272357	,000	-20,18177	-18,79157
	6	-5,50111*	,272357	,000	-6,19621	-4,80601
3	1	19,48667*	,272357	,000	18,79157	20,18177
	6	13,98556*	,272357	,000	13,29045	14,68066
6	1	5,50111*	,272357	,000	4,80601	6,19621
	3	-13,98556*	,272357	,000	-14,68066	-13,29045

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,334.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-1,00333*	,272357	,005	-1,69843	-,30823
	3	-1,44111*	,272357	,000	-2,13621	-,74601
2	1	1,00333*	,272357	,005	,30823	1,69843
	3	-,43778	,272357	,268	-1,13288	,25732
3	1	1,44111*	,272357	,000	,74601	2,13621
	2	,43778	,272357	,268	-,25732	1,13288

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,334.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo H. Prueba estadísticas para el lavado con peróxido de hidrogeno

Anexo H.1 Para el Hg:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1331,651 ^a	5	266,330	5,631	,007
Intersección	2626,675	1	2626,675	55,538	,000
H2O2	39,605	1	39,605	,837	,378
Tiempo	1245,676	2	622,838	13,169	,001
H2O2 * Tiempo	46,370	2	23,185	,490	,624
Error	567,543	12	47,295		
Total	4525,869	18			
Total corregido	1899,194	17			

a. R al cuadrado = ,701 (R al cuadrado ajustada = ,577)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-2,51167	3,970525	,805	-13,10449	8,08115
	3	16,25667*	3,970525	,004	5,66385	26,84949
2	1	2,51167	3,970525	,805	-8,08115	13,10449
	3	18,76833*	3,970525	,001	8,17551	29,36115
3	1	-16,25667*	3,970525	,004	-26,84949	-5,66385
	2	-18,76833*	3,970525	,001	-29,36115	-8,17551

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 47,295.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo H.2 Para Plomo:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	689,977 ^a	5	137,995	1,634	,225
Intersección	3043,300	1	3043,300	36,034	,000
H2O2	37,411	1	37,411	,443	,518
Tiempo	453,076	2	226,538	2,682	,109
H2O2 * Tiempo	199,490	2	99,745	1,181	,340
Error	1013,483	12	84,457		
Total	4746,761	18			
Total corregido	1703,461	17			

a. R al cuadrado = ,405 (R al cuadrado ajustada = ,157)

Anexo H.3 Para el Cd

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	307,660 ^a	5	61,532	8,252	,001
Intersección	1987,231	1	1987,231	266,506	,000
H2O2	,207	1	,207	,028	,870
Tiempo	256,073	2	128,037	17,171	,000
H2O2 * Tiempo	51,380	2	25,690	3,445	,066
Error	89,479	12	7,457		
Total	2384,370	18			
Total corregido	397,139	17			

a. R al cuadrado = ,775 (R al cuadrado ajustada = ,681)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-1,99000	1,576560	,442	-6,19605	2,21605
	3	6,81833*	1,576560	,003	2,61229	11,02438
2	1	1,99000	1,576560	,442	-2,21605	6,19605
	3	8,80833*	1,576560	,000	4,60229	13,01438
3	1	-6,81833*	1,576560	,003	-11,02438	-2,61229
	2	-8,80833*	1,576560	,000	-13,01438	-4,60229

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 7,457.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo H.4 Para el Zn

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	210,588 ^a	5	42,118	5,150	,009
Intersección	1953,333	1	1953,333	238,845	,000
H2O2	11,281	1	11,281	1,379	,263
Tiempo	192,193	2	96,096	11,750	,001
H2O2 * Tiempo	7,114	2	3,557	,435	,657
Error	98,139	12	8,178		
Total	2262,060	18			
Total corregido	308,727	17			

a. R al cuadrado = ,682 (R al cuadrado ajustada = ,550)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-1,20000	1,651086	,753	-5,60487	3,20487
	3	6,25333*	1,651086	,007	1,84846	10,65821
2	1	1,20000	1,651086	,753	-3,20487	5,60487
	3	7,45333*	1,651086	,002	3,04846	11,85821
3	1	-6,25333*	1,651086	,007	-10,65821	-1,84846
	2	-7,45333*	1,651086	,002	-11,85821	-3,04846

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 8,178.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo H.5 Para el Fe

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1440,369 ^a	5	288,074	55,864	,000
Intersección	1011,450	1	1011,450	196,142	,000
H2O2	8,094	1	8,094	1,570	,234
Tiempo	1416,683	2	708,342	137,363	,000
H2O2 * Tiempo	15,592	2	7,796	1,512	,260
Error	61,881	12	5,157		
Total	2513,700	18			
Total corregido	1502,250	17			

a. R al cuadrado = ,959 (R al cuadrado ajustada = ,942)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	-2,41000	1,311071	,199	-5,90776	1,08776
	3	-19,90833*	1,311071	,000	-23,40609	-16,41057
2	1	2,41000	1,311071	,199	-1,08776	5,90776
	3	-17,49833*	1,311071	,000	-20,99609	-14,00057
3	1	19,90833*	1,311071	,000	16,41057	23,40609
	2	17,49833*	1,311071	,000	14,00057	20,99609

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 5,157.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo H.6 Para As:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1198,225 ^a	5	239,645	9,033	,001
Intersección	692,416	1	692,416	26,099	,000
H2O2	16,321	1	16,321	,615	,448
Tiempo	1148,801	2	574,401	21,651	,000
H2O2 * Tiempo	33,103	2	16,551	,624	,552
Error	318,364	12	26,530		
Total	2209,005	18			
Total corregido	1516,589	17			

a. R al cuadrado = ,790 (R al cuadrado ajustada = ,703)

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: REMOCION

HSD Tukey

(I) Tiempo	(J) Tiempo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	,12000	2,973792	,999	-7,81367	8,05367
	3	-16,88667 [*]	2,973792	,000	-24,82034	-8,95300
2	1	-,12000	2,973792	,999	-8,05367	7,81367
	3	-17,00667 [*]	2,973792	,000	-24,94034	-9,07300
3	1	16,88667 [*]	2,973792	,000	8,95300	24,82034
	2	17,00667 [*]	2,973792	,000	9,07300	24,94034

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 26,530.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel ,05.

Anexo H.7 Para el Cianuro:

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: REMOCION

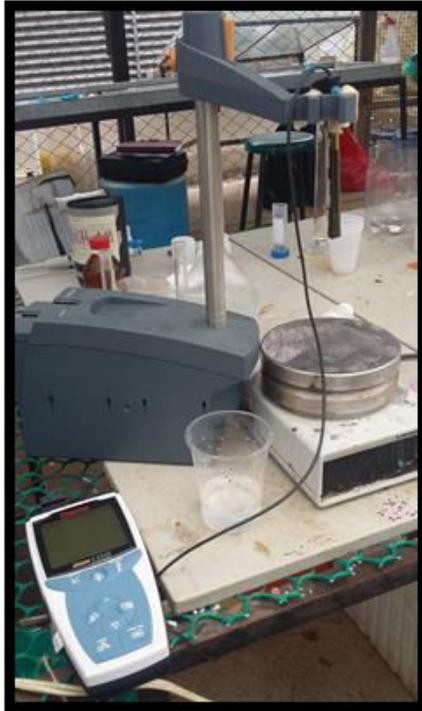
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	519,683 ^a	5	103,937	212,941	,000
Intersección	235,373	1	235,373	482,222	,000
H2O2	180,437	1	180,437	369,672	,000
Tiempo	178,989	2	89,495	183,353	,000
H2O2 * Tiempo	160,257	2	80,128	164,164	,000
Error	5,857	12	,488		
Total	760,913	18			
Total corregido	525,540	17			

a. R al cuadrado = ,989 (R al cuadrado ajustada = ,984)

Anexo I. Conductímetro



Anexo J. Electrodo de Ion selectivo de cianuro



Anexo K. pHmetro.



Anexo L. Equipo de absorción atómica por llama.



Anexo M. Montaje de destilación para cianuro total



Anexo N. Lavado con Peróxido de Hidrógeno.

