



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras distribuir, combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial y, a pesar que son nuevas obras deben siempre rendir crédito y ser no comerciales, no están obligadas a licenciar sus obras derivadas bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>



EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

N° 066-DI-FIMM-2025

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **TESIS** cuyo título es:

“ESTUDIO COMPARATIVO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LA RECUPERACIÓN DE ORO POR LIXIVIACIÓN CON TIOSULFATO DE SODIO Y TIOSULFATO DE AMONIO, NASCA 2023”

Presentado por:

MAGAÑO MACHACA JONATHAN MARCELINO

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 18%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. En Ica 8 de septiembre de 2025.

Atentamente,

.....
DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE INVESTIGACION DE LA FIMM

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUÍS GONZAGA”

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia



Tesis:

Estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca

2023

Línea de investigación: Lixiviación de minerales.

Autor: MAGAÑO MACHACA JONATHAN MARCELINO

NASCA – PERÚ

2025

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres por su amor incondicional y su apoyo constante en este largo camino de aprendizaje y perseverancia.

A mis hermanos por sus sabios consejos, dándome ejemplos de superación y por siempre impulsarme a ser mejor y lograr con éxito mi carrera profesional.

A mis hijos por ser mi fortaleza, motor y motivo.



AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a mi familia por ser parte de todo este proceso académico.

A mi Universidad San Luis Gonzaga de Ica Facultad de ingeniería de minas y metalurgia por ser partícipe de todo mi aprendizaje.

A mi asesor por su apoyo, sus enseñanzas, sus consejos y ser un pilar en mi formación profesional.



INDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA	01
DEDICATORIA	02
AGRADECIMIENTO	03
ÍNDICE DE CONTENIDOS	04
ÍNDICE DE TABLAS	05
ÍNDICE DE FIGURAS	06
RESUMEN	07
ABSTRACT	08
I. INTRODUCCIÓN	09
II. ESTRATEGIA METODOLOGICA	12
2.1. Antecedentes.	12
2.2. Marco teórico.	13
2.3. Marco conceptual.	26
2.4. Estrategia metodológica.	27
2.5. Procedimiento experimental.	27
III. RESULTADOS.	30
IV. DISCUSIÓN.	50
V. CONCLUSIONES	51
VI. RECOMENDACIONES.	52
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	53
VIII. ANEXOS.	54

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis químico de la muestra mineral.	30
Tabla 2. Composición mineralógica cualitativa del mineral.	31
Tabla 3. pH de la solución.	32
Tabla 4. Tiempo de molienda del mineral hasta malla # 325	33
Tabla 5. Concentración de sulfato de cobre en la solución de lixiviación.	34
Tabla 6. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 01)	35
Tabla 7. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 02)	36
Tabla 8. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 03)	37
Tabla 9. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 04)	38
Tabla 10. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 05)	39
Tabla 11. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 06)	40
Tabla 12. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 07)	41
Tabla 13. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 08)	42
Tabla 14. Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 09)	43
Tabla 15. Concentración del $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y la recuperación del oro.	44
Tabla 16. Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (75g/Kg)	45
Tabla 17. Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (150g/Kg)	46
Tabla 18. Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (225g/Kg)	47
Tabla 19. Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (300g/Kg)	48
Tabla 20. Datos comparativos de la recuperación del oro con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$	49

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismo elemental de la lixiviación de minerales.	13
Figura 2. Esquema de un lugar donde se realiza la lixiviación in situ.	14
Figura 3. Esquema mostrando el mecanismo de la lixiviación en pilas.	15
Figura 4. Vista de una lixiviación en pilas en la mina.	15
Figura 5. Bateas en serie construidas en un campo minero.	16
Figura 6. Estructura de una batea de lixiviación.	16
Figura 7. Esquema de principio de la lixiviación dinámica.	17
Figura 8. Tanque agitado de agitación mecánica.	18
Figura 9. Tanques agitados en serie empleados en la lixiviación dinámica.	19
Figura 10. Planta de lixiviación dinámica para la recuperación de metales.	19
Figura 11. Chancadora de quijada de laboratorio.	21
Figura 12. Molino de bolas de laboratorio.	22
Figura 13. Esquema de principio de un tanque Pachuca.	24
Figura 14. Tanque agitado comúnmente empleado en las pruebas experimentales de lixiviación dinámica.	25

RESUMEN

Esta tesis titulada **Estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023** es una investigación de tipo teórico experimental, cuyo objetivo es determinar la eficiencia de la recuperación del oro por lixiviación empleando dos reactivos diferentes pero pertenecientes al grupo de los tiosulfatos los cuales son: el tiosulfato de sodio y el tiosulfato de amonio, ambos reactivos no tóxicos ni contaminantes, lo que presupone una gran ventaja con relación al cianuro de sodio o de potasio. La investigación es de diseño experimental en la cual se ha desarrollado una serie de ensayos de laboratorio por separado, primeramente con tiosulfato de sodio en presencia de amoníaco y de sulfato de cobre pentahidratado, estos ensayos permitieron establecer los parámetros de la lixiviación con un pH superior a 10,5, con 250mL de hidróxido de amonio y 24 gramos de sulfato de cobre, los resultados indican un 90% de recuperación del oro, mientras que con el tiosulfato de amonio se recuperó un 93% de oro de una muestra usada en ambos casos y que tenía una concentración de 476 mg del metal.

PALABRAS CLAVES: Lixiviación, mineral aurífero, tiosulfato de sodio, tiosulfato de amonio.



ABSTRACT

This thesis entitled Comparative study to determine the efficiency of gold recovery by leaching with sodium thiosulfate and ammonium thiosulfate, Nasca 2023 is a theoretical experimental research, whose objective is to determine the efficiency of gold recovery by leaching using two different reagents but belonging to the group of thiosulfates which are: sodium thiosulfate and ammonium thiosulfate, both non-toxic and non-polluting reagents, which presupposes a great advantage in relation to sodium or potassium cyanide. The research is of an experimental design, in which a series of separate laboratory tests were conducted, initially with sodium thiosulfate in the presence of ammonia and copper sulfate pentahydrate. These tests allowed the leaching parameters to be established at a pH greater than 10.5, with 250 mL of ammonium hydroxide and 24 grams of copper sulfate. The results indicate a 90% gold recovery. Ammonium thiosulfate recovered 93% of the gold from a sample used in both cases, which had a concentration of 476 mg of the metal.

KEY WORDS: Leaching, gold ore, sodium thiosulfate, ammonium thiosulfate



INTRODUCCIÓN

En la recuperación del oro a partir de minerales oxidados, la lixiviación con tiosulfato, tanto con tiosulfato de sodio como de amonio, es una alternativa al método tradicional de cianuración para la extracción de este metal precioso, ofreciendo ventajas como menor toxicidad y menor impacto ambiental. El tiosulfato de sodio y el tiosulfato de amonio se utilizan en soluciones acuosas para disolver el oro del mineral, y aunque el proceso es similar a la cianuración, presenta diferencias en cuanto a la eficiencia y las condiciones de operación. Así por ejemplo, la lixiviación con Tiosulfato de Sodio ofrece la ventaja de tener menor toxicidad que el cianuro, menor impacto ambiental y mayor selectividad en la disolución de oro en presencia de otros metales como el cobre y por otro lado las desventajas que ofrece durante el proceso es que puede requerir condiciones de lixiviación más severas (mayores concentraciones de reactivos, tiempos de lixiviación prolongados) en comparación con la cianuración, y la recuperación de oro de las soluciones de tiosulfato puede ser más compleja. Por ello en torno al tiosulfato de sodio se están investigando métodos para mejorar la eficiencia de la lixiviación con este reactivo, incluyendo la oxidación in situ de minerales sulfurados y el uso de técnicas de recuperación de oro como la cementación, las resinas y el carbón activado.

En cuanto a la lixiviación con Tiosulfato de Amonio, a nivel laboratorio y a nivel industrial se ha comprobado que presenta varias ventajas, como por ejemplo: ofrece una alternativa menos tóxica al cianuro y se ha investigado como una opción viable para la extracción de oro de minerales refractarios y también ofrece ciertas desventajas como la complejidad de la recuperación del oro de las soluciones de tiosulfato de amonio en relación con la cianuración y puede requerir el uso de otras técnicas de recuperación como la flotación iónica o la electrólisis.

Las investigaciones sobre lixiviación con soluciones amoniacaes de tiosulfato para la recuperación de oro de minerales polimetálicos sulfurados han permitido obtener resultados prometedores en cuanto a la recuperación de oro en comparación con la Cianuración, entre estos podemos citar los siguientes:

- La lixiviación con tiosulfato se considera una alternativa más segura y ecológica a la cianuración, que ha sido el método dominante para la extracción de oro durante décadas.
- La cianuración utiliza soluciones de cianuro de sodio para disolver el oro del mineral, pero presenta riesgos de toxicidad y contaminación ambiental.
- La lixiviación con tiosulfato, aunque requiere más investigación para optimizar la recuperación de oro, ofrece una opción prometedora para reducir el impacto ambiental de la minería de oro.

Resumiendo, se puede afirmar que tanto el tiosulfato de sodio como el de amonio son alternativas viables a la cianuración para la extracción de oro, con ventajas en términos de menor toxicidad y menor impacto ambiental. Sin embargo, la investigación continua es necesaria para optimizar la eficiencia de la recuperación de oro de las soluciones de tiosulfato. En esta tesis se hace un estudio experimental

comparativo para establecer la eficiencia de la lixiviación del oro empleando tiosulfato de sodio y de amonio.

Situación problemática.

El empleo del cianuro de sodio o de potasio por su toxicidad y su efecto negativo con la naturaleza es un problema latente en la industria hidrometalúrgica cuando se trata de lixiviar mineral aurífero, debido a ello se han realizado diversas investigaciones las cuales buscan el reemplazo de estos reactivos por otros que tengan la misma capacidad de disolución del oro y que sean totalmente inocuos y amigables para la naturaleza, o en su defecto sustancias que no afecten tan gravemente la salud de los operarios y que no tengan un efecto contaminante devastador. En este sentido en la presente investigación se plantea el uso de dos reactivos casi similares como son los tiosulfatos de sodio y de amonio, pero que previamente se harán los ensayos correspondientes para determinar cuál de ellos es el que mejor comportamiento tiene en el proceso de lixiviación del oro.

Problema de investigación.

Problema General

¿Se puede desarrollar un estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023?

Problemas específicos.

- ¿Cuál es la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación?
- ¿Cuál es la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación?

Justificación e importancia de la investigación.

Justificación teórica:

Teóricamente la presente investigación se justifica porque en ella se aborda el estudio del empleo de reactivos diferentes al cianuro para extraer el oro presente en el mineral, buscando que establezca parámetros y concentraciones de dichos reactivos.

Justificación metodológica:

Desde el punto de vista metodológico, esta investigación se justifica porque emplea las técnicas analíticas para caracterizar las muestras y procesarlas mediante lixiviación empleando el tiosulfato de sodio y el tiosulfato de amonio.

Justificación social:

Desde el punto de vista social la presente investigación se justifica porque se buscará un procedimiento adecuado para la recuperación del oro de baja ley mediante flotación empleando reactivos menos peligrosos para la salud.

Justificación práctica:

Desde el punto de vista práctico esta investigación se justifica porque demostrará a nivel laboratorio las posibilidades de trabajar con el tiosulfato de sodio y de amonio.

Objetivos de la investigación:**Objetivo General.**

Hacer un estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023

Objetivos específicos.

- Determinar la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación.
- Determinar la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación.

Hipótesis y variables de la investigación.**Hipótesis.****Hipótesis general.**

Un estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023 se puede desarrollar experimentalmente.

Hipótesis específicas.

- La concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación es significativa
- La concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación es alta

Variables:**Variable independiente:**

Estudio comparativo

Variable dependiente.

Tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Antecedentes.

A nivel internacional:

I. García y colaboradores (2015) presentaron su tesis titulada: Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar, Colombia) para la selección de los procesos de extracción con tiosulfato de sodio, a la Universidad industrial de Santander, Colombia. El objetivo de la investigación es lograr un mayor porcentaje de solubilidad del metal oro en los procesos de lixiviación de minerales complejos conteniendo una cierta carga de sulfuros empleando para ello el tiosulfato de sodio. Las pruebas llevadas a cabo por los autores permitieron alcanzar un 85 % de solubilidad en relación al 45% que normalmente alcanzan los que realizan la cianuración de este tipo de mineral. Este resultado le permitió concluir a los autores que el procedimiento seguido es el más conveniente para recuperar el oro de las muestras estudiadas.

J. López (2017) presentó su tesis titulada: Estudio comparativo de la lixiviación de una mena aurífera mediante el uso de cianuro de potasio contra el uso de tiosulfato de sodio, a la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo objetivo fue estudiar el comportamiento de un mineral aurífero de la sierra de Oaxaca durante su cianuración y lixiviación con tiosulfato de sodio pentahidratado. Las pruebas realizadas demuestran que la presencia de sulfuros dificulta la cianuración, no alcanzándose los resultados esperados. El autor concluye que la muestra al no estar completamente oxidada y presentar un porcentaje de sulfuros, pudo haber generado degradación tanto del cianuro como por parte del tiosulfato.

A nivel nacional:

H. Ferrer (2020) presentó su tesis titulada: Caracterización y tratamiento por tiosulfato de sodio para la recuperación de oro en plantas hidrometalúrgicas del Centro del Perú, a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión de Huacho, cuyo objetivo fue caracterizar el mineral sulfurado para procesarlo por cianuración y con tiosulfato de sodio. La investigación es aplicada de diseño experimental, que se llevó a cabo en cuatro etapas, que se pueden resumir en la explotación, tratamiento físico, pruebas de cianuración y con tiosulfato de sodio y análisis de resultados. Las pruebas llevadas a cabo en el laboratorio son para determinar cómo actúan ambos reactivos en la recuperación del oro. Según lo reportado en la tesis la concentración de oro en pruebas con tiosulfato es muy similar a las alcanzadas en las pruebas con cianuro.

F. Hernández (2018) presentó su tesis titulada: Optimización del proceso de lixiviación de minerales auríferos de baja ley, empleando como lixivante tiosulfato de amonio, a la Universidad Nacional del Altiplano, Puno, cuyo objetivo fue establecer los parámetros

adecuados para la cianuración de minerales auríferos con una cierta concentración de sulfuros. Las pruebas realizadas arrojaron los siguientes resultados de la cianuración por agitación, en la que se recupera hasta un 86,6% del metal presente en la muestra, en un tiempo de procesamiento de 24 horas.

A nivel local.

No se ha encontrado información pertinente sobre el tema de investigación.

2.2. Marco teórico.

2.2.1. Lixiviación.

En metalurgia para recuperar metales a partir de minerales, la lixiviación es un proceso químico en el que se emplea un reactivo en solución que reacciona con uno de los componentes del mineral, extrayéndolo poco a poco en forma de un compuesto soluble. Una vez terminada la lixiviación, el extracto que contiene el compuesto químico del metal a recuperar se separa de los sólidos agotados mediante decantación primero y luego por filtración, con el fin de eliminar del extracto obtenido las partículas sólidas que constituyen el relave.

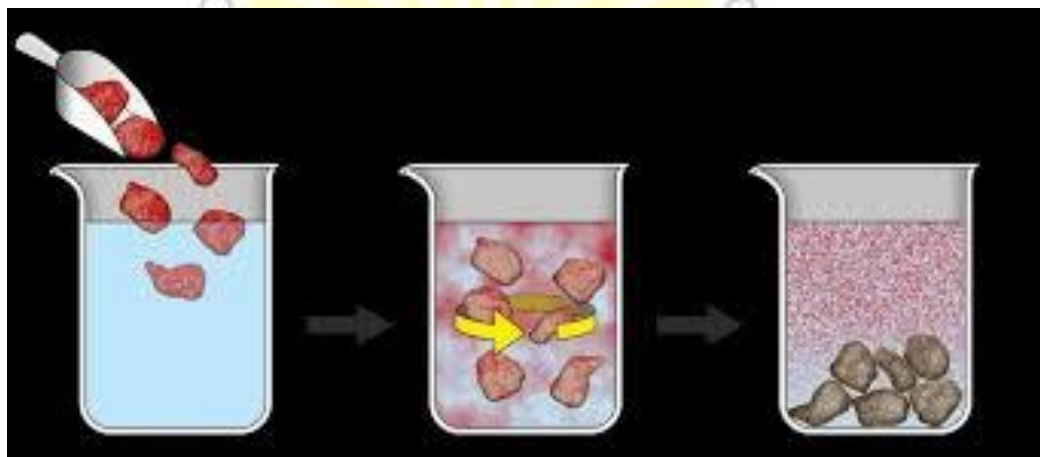


Figura 1. Mecanismo elemental de la lixiviación de minerales.

En metalurgia es común el uso de cuatro tipos de lixiviación, estos son los que a continuación se citan:

1. Lixiviación in-situ
2. Lixiviación en pilas o terreros
3. Lixiviación en tanques o por inundación
4. Lixiviación por agitación

LIXIVIACIÓN IN-SITU

Se lleva a cabo en el mismo yacimiento mediante operaciones que permiten alimentar la solución que va a lixiviar y para recuperarla después de la lixiviación y recuperar los valores

metálicos. Hay que tener en cuenta que, para realizar este tipo de lixiviación con éxito, es necesario que el mineral sea lo suficientemente poroso para que el reactivo pueda penetrar por los poros de la roca, reaccionar con el compuesto del metal y ser retirado en la solución empleada en la lixiviación. En este caso el reactivo empleado para lixiviar que es el ácido sulfúrico tiene contacto con el mineral ya sea por gravedad o a presión a través de diversos ductos y la solución cargada se regresa a la superficie, donde se almacena en pozas o tanques. El material agotado queda en el mismo sitio y no requiere llevarlo a una relavera, lo que hace de este tipo de lixiviación un método muy barato.



Figura 2. Esquema de un lugar donde se realiza la lixiviación in situ.

LIXIVIACIÓN EN PILAS O PERCOLACIÓN.

La lixiviación en pilas requiere una preparación previa del terreno que consiste en aplanarlo, compactarlo dándole una pequeña inclinación de 10° como máximo y sobre el poner una capa de arcilla compactada que actúa como una capa impermeable. Luego de preparar el terreno sobre la arcilla se coloca la geomembrana que se sella y extiende hasta cubrir todo el terreno preparado y la poza donde se va a recibir la solución rica. Posteriormente se va amontonando el mineral chancado conformando terraplenes de 4 metros de espesor, de 50 metros de ancho y 450 metros de largo, pudiéndose poner uno encima de otro hasta completar 4 o 5 y finalmente se instalan las mangueras que llevaran la solución lixivante a la superficie más alta del terraplén para regarlo por goteo o con aspersores. Se prepara de acuerdo con los requerimientos de concentración la solución de ácido sulfúrico que al regarla penetra en las capas sucesivas del

mineral disolviendo a su paso el compuesto que contiene cobre y arrastrándolo hacia el fondo hasta llegar a la geomembrana donde están los canales que lo llevaran a la poza. Conforme penetra en los terraplenes la solución se va enriqueciendo. La duración de este proceso puede ser de más de 6 meses y se da por concluido cuando la solución que llega a la poza es transparente o de un color azul muy tenue. El extracto obtenido (solución rica) es recuperado mediante conductos colocados bajo las pilas de mineral, que la dirigen a un canal primario, este a su vez la descarga en un tanque receptor. Este tipo de lixiviación se emplea en minerales que tienen baja ley y son grandes volúmenes de mineral a tratar, el proceso es muy lento.

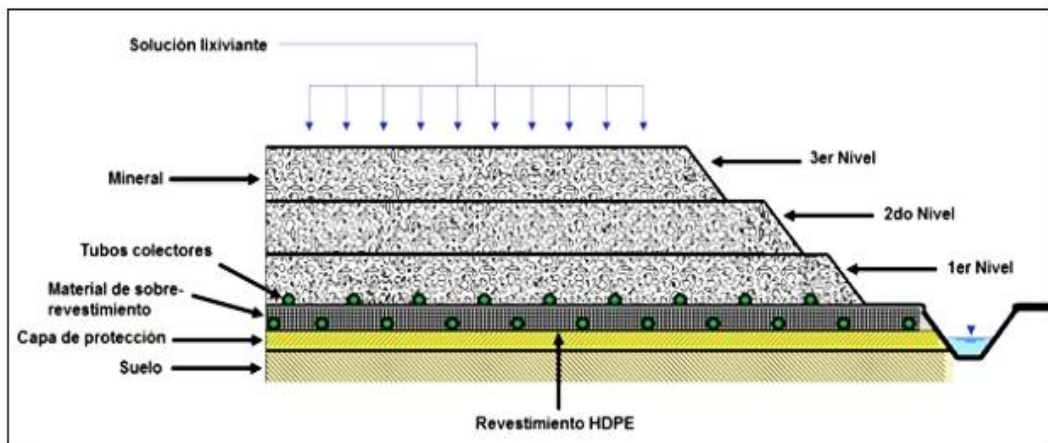


Figura 3. Esquema mostrando el mecanismo de la lixiviación en pilas.



Figura 4. Vista de una lixiviación en pilas en la mina.

LIXIVIACIÓN EN TANQUES O POR INUNDACIÓN.

Llamada también lixiviación en batea se hace con minerales de ley más alta, con una granulometría del mineral mínima de media pulgada, esto para que la solución empleada en la lixiviación no tenga problemas en penetrar en todo el mineral y cubra todo el volumen de la batea. Las bateas empleadas para este tipo de lixiviación son tanques de concretos revestidos con plomo o asfalto para resistir agentes ácidos, equipados con fondos filtrantes para retirar la solución rica y el agua de lavado. Se busca un flujo en contracorriente: la lixiviación inicial del mineral fresco se realiza con una solución débil, que se carga gradualmente con minerales parcialmente lixiviados. La solución cargada se prepara para la precipitación posterior. La lixiviación final del mineral emplea una solución más concentrada. La solución agotada regresa al circuito de lixiviación tras ajustar la concentración del reactivo. El tiempo de residencia es de cinco a ocho días, con una recuperación metálica del 87 al 93 %. Este método se utiliza con éxito en la industria, requiriendo usualmente purificar la solución con buenos resultados.



Figura 5. Bateas en serie construidas en un campo minero.

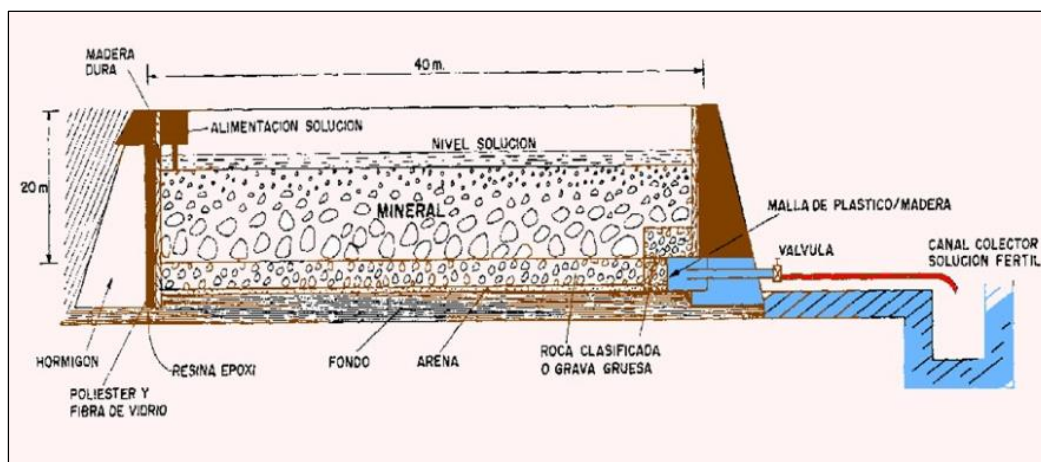


Figura 6. Estructura de una batea de lixiviación.

LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN

Llamada también lixiviación dinámica, se lleva a cabo en reactores o tanques agitados en los cuales el mineral que se alimenta es pulverizado a malla # 270 hasta malla # 400, para formar con la solución ácida una masa homogénea que durante la agitación se comporta como una sola fase, lo que permite el contacto más íntimo entre las partículas del mineral y la solución lixivante, optimizándose las reacciones entre el ácido y los compuestos oxidados, lo que permite que la lixiviación se lleve a cabo con una mayor velocidad. Al interior del tanque la agitación que se realiza puede ser mecánica o neumática, siendo la agitación mecánica la de mayor uso, La elevada cinética de lixiviación de cobre es el resultado de la granulometría más pequeña, lo cual permite que el compuesto que contiene cobre oxidado quede expuesto y entre en contacto directo con ácido sulfúrico produciéndose rápidamente la reacción química que da como resultado sulfato de cobre.



Figura 7. Esquema de principio de la lixiviación dinámica.

La eficiencia de la lixiviación dinámica requiere regular algunos de los parámetros del proceso, tales como la granulometría del mineral la cual debe ser lo más pequeña posible, dentro de un rango que permita la formación de una emulsión perfecta donde no se separa el mineral de la mezcla que constituye la pulpa; la velocidad de agitación, que debe ser la adecuada para mantener la emulsión de manera compacta (una emulsión compacta durante la agitación no debe de permitir que las partículas sólidas se decanten al fondo del tanque agitado); la densidad es otro de los parámetros fundamentales la cual debe ser regulada a valores no menores de 1,2 g/mL y no mayores de 1,3g/mL, lo cual permite tener una masa fluida en donde el solvente (solución ácida) fluya de manera libre por todo el volumen de la pulpa renovando el flujo y

permitiendo reacción directa entre las sustancias que intervienen directamente en el proceso de lixiviación (la sustancia oxidada de cobre y el ácido sulfúrico).

La lixiviación dinámica se emplea para tratar minerales de alta ley o concentrados que con urgencia deben de ser procesados. Este tipo de lixiviación se desarrolla de dos maneras: continua e intermitente, la continua emplea varios tanques provistos de agitadores mecánicos, en ellos se puede lixiviar, separar sólidos de líquidos y lavar los residuos sólidos estériles. Una vez que se ha concluido con la lixiviación el lixiviado que es la solución cargada con el producto llamada también solución rica, se filtra, clarifica y envía a la precipitación. Los reactores empleados en este tipo de lixiviación que poseen agitadores mecánicos son recipientes con impulsores colocados en el interior los cuales rotan a velocidad controlada gracias a la presencia de un motor y un reductor; mientras que, los tanques con agitadores neumáticos son a menudo recipientes equipados con un tubo central que funciona como tiro de aire.

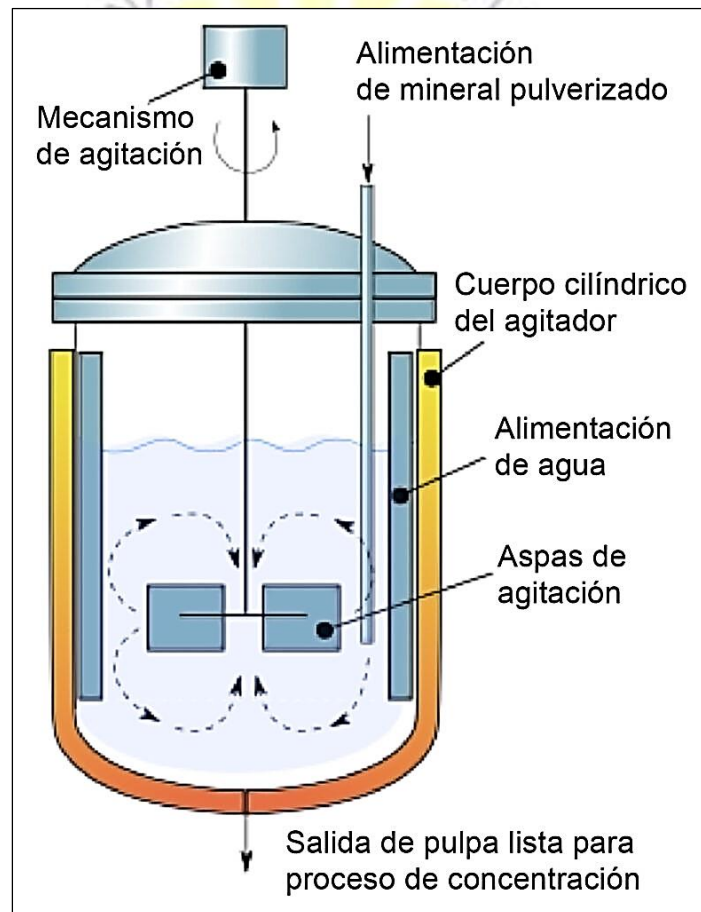


Figura 8. Tanque agitado de agitación mecánica.

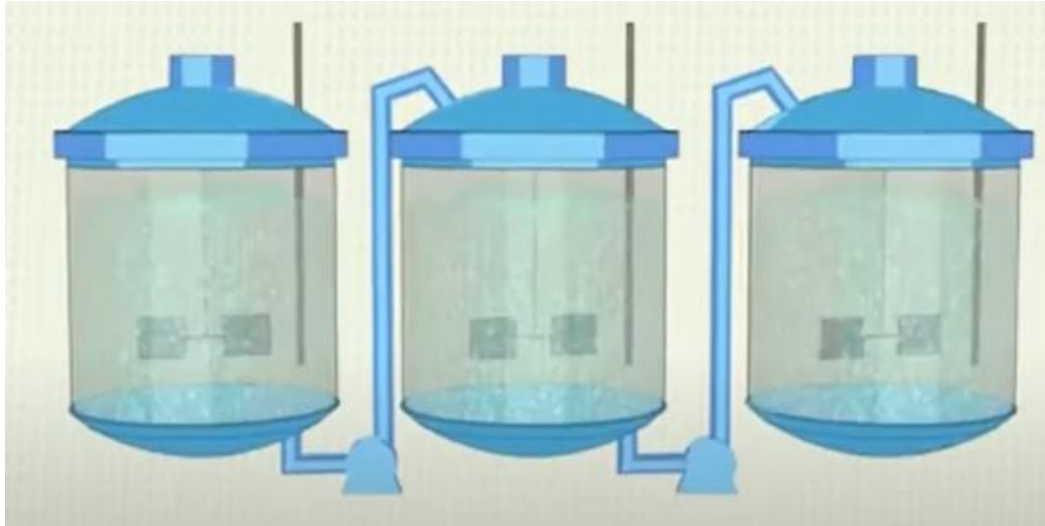


Figura 9. Tanques agitados en serie empleados en la lixiviación dinámica.

Una forma de optimizar el proceso en la planta de lixiviación dinámica consiste en colocar los tanques agitados en serie unidos uno a continuación del otro, para permitir una lixiviación continua después de agotar el contenido de cobre en el mineral tratado, el lixiviado se dirige hacia el espesador en donde las partículas sólidas en gran parte son separadas de un líquido sobrenadante, por decantación. La fase líquida que contiene el componente rico se dirige entonces hacia un filtro rotatorio en el cual se separan las partículas sólidas que están suspendidas en el lixiviado, para dejarlo libre de partículas sólidas

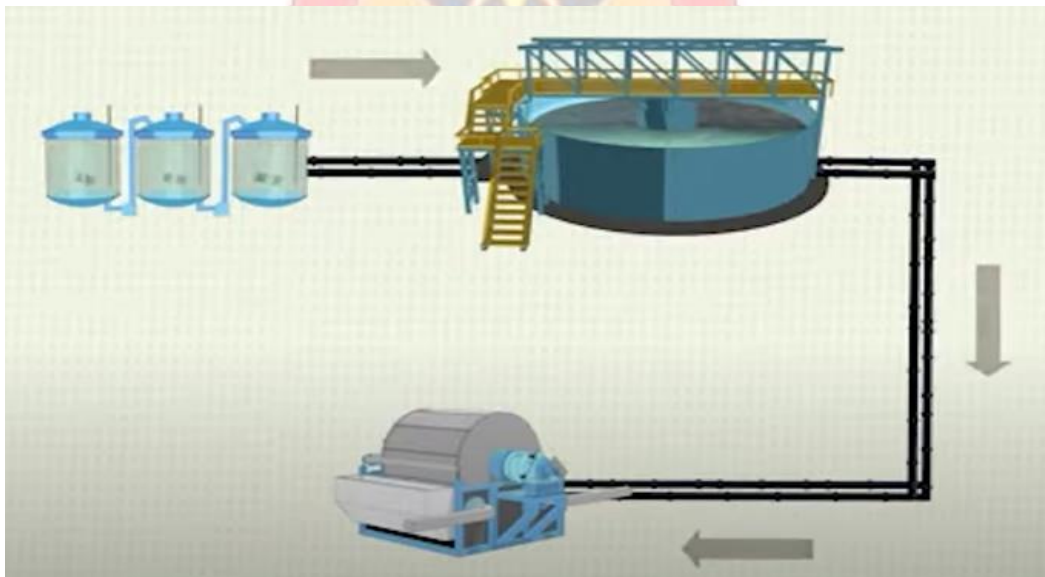
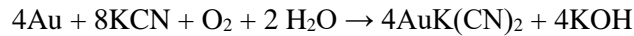


Figura 10. Planta de lixiviación dinámica para la recuperación de metales.

2.2.2. Lixiviación del mineral aurífero.

La lixiviación de minerales auríferos se realiza empleando como reactivo lixivante el cianuro de sodio o de potasio, los cuales se disuelven en soluciones alcalinas que presentan una acción disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. Químicamente se expresa dicho proceso mediante la reacción formulada por Elsher que es la siguiente:



De acuerdo con esta reacción la cianuración del oro se da en presencia de oxígeno, el cual cataliza la reacción permitiendo la formación del complejo cianuro de potasio y oro. El catalizador fundamental que permite la disolución del oro y plata es el oxígeno introducido en la solución de cianuro mediante la inyección directa de aire al tanque solución de cabeza, por irrigación en forma de lluvia y por bombeo de la solución recirculante.

La velocidad de disolución del oro y de la plata en las soluciones de cianuro depende del área superficial del metal en contacto con la fase líquida, lo que hace que el proceso de disolución sea un proceso heterogéneo; la velocidad de disolución depende también de la velocidad de agitación lo que indica que el proceso sufre la presión de un fenómeno físico. En la velocidad de disolución del oro en las soluciones cianuradas influyen una serie de factores entre los que destacan

a. Granulometría del mineral.

La lixiviación dinámica del mineral aurífero requiere de partículas de granulometría entre las mallas # 325 a malla #400 por dos razones a esa granulometría se libera todo el oro encapsulado en el cuarzo y en la magnetita y porque una granulometría fina permite hacer que el mineral se desplace durante la agitación como un fluido y tiene un contacto directo con el solvente reduciendo el tiempo de lixiviación.

b. Existencia de una sustancia oxidante.

Durante la lixiviación con cianuro para que se produzca la disolución del oro es necesario la presencia del oxígeno que lo aporta el aire atmosférico.

c. Concentración adecuada de cianuro.

Debe existir una concentración adecuada del reactivo cianurado que se está empleando, hay datos que la solubilidad del oro en una solución de CN aumenta conforme aumenta la concentración de este reactivo, mientras que es muy baja con menos de 0.005% NaCN, pero crece rápidamente cuando contiene 0.01% NaCN y después lentamente, llegando al máximo cuando contiene 0.25% NaCN. La práctica industrial sostiene que la proporción más eficaz es de 0.05 a 0.07% NaCN.

d. Efecto de la temperatura.

La temperatura cataliza la velocidad de la reacción, haciendo que el metal se disuelva con mayor rapidez hasta los 85°C, una mayor temperatura descompone el reactivo.

e. Presencia de un reactivo alcalino.

La presencia del hidróxido de calcio durante la cianuración permite:

- Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.
- Prevenir pérdidas de cianuro por acción del CO₂ del aire.
- Neutralizar los componentes ácidos.
- Facilitar el asentamiento de las partículas finas de modo que pueda separarse la solución rica clara de la mena cianurada.

f) Presencia de finos.

Durante la lixiviación dinámica se requiere de una granulometría muy fina la cual actúa favorablemente durante el proceso ya que ella por efecto de la agitación van a permanecer en movimiento en contacto con la solución cianurada.

Secuencia del proceso de cianuración

- a) Conminución: Se reduce el tamaño de las partículas del mineral hasta malla 200, para ello el mineral se chanca y luego se somete a molienda en molinos de bolas para obtener esta dimensión de partícula.
- b) Cianuración: Se lleva a cabo en un tanque agitado donde se vierte la solución cianurada y luego se agrega de manera progresiva el mineral pulverizado poniendo en movimiento el agitador a una determinada velocidad, y mantener así la pulpa hasta el término de la cianuración, la cual en dos horas ha concluido. La solución después de habersele eliminado los finos y el oxígeno pasa un tanque de agitación herméticamente cerrado en donde se le adiciona zinc en polvo y acetato de plomo.

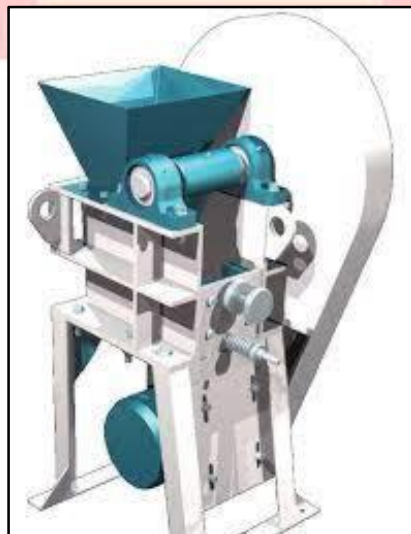


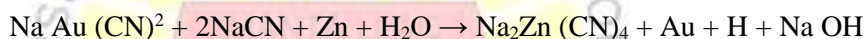
Figura 11. Chancadora de quijada de laboratorio.



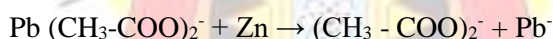
Figura 12. Molino de bolas de laboratorio.

c) Precipitación:

La precipitación del oro y la plata es posible empleando un metal activo como el zinc el cual reemplaza al oro en el compuesto cianurado, tal como lo podemos observar en la siguiente reacción:



Sin embargo, hay que tener en cuenta que tanto el CN con el álcali libre en la solución tienden a atacar al Zn disolviéndolo, lo que exige un exceso de Zn. Las reacciones son más eficientes con la adición de acetato de plomo:



Cianuración dinámica.

Definición.

Una definición técnica concreta es aquella que considera la cianuración dinámica como aquel proceso en el cual tanto el mineral como la solución cianurada se encuentran durante todo el proceso en agitación constante y en ciertos casos a una determinada temperatura superior a la temperatura ambiente.

Esta lixiviación exige una granulometría fina que permita que tanto la solución lixivante como el mineral se muevan dentro del reactor (tanque agitado) como un solo fluido, a velocidades tales que permiten que el sólido no se separe de la fase líquida. Se considera que la agitación es adecuada para minerales con tamaños inferiores a 150 μm , u mejor todavía con dimensiones como 45 μm . Tamaños mayores incrementan el desgaste de las paletas de agitación por efecto de la abrasión y existe mayor dificultad de mantenerlos en suspensión. Por otro lado, la densidad de pulpa utilizada varía entre 35–50% de sólidos, dependiendo del tamaño de las partículas, la gravedad específica y la presencia de minerales que incrementan la viscosidad de la pulpa, como las arcillas. La regulación del pH de trabajo entre 9,5 – 11,5, mediante la adición de la cal, previa

a la adición de cianuro, que se puede hacer en el tanque de cianuración o previamente en el molino.

Características de la cianuración.

El fino tamaño de la partícula mineral hace que la cinética de la operación sea rápida, debido al desarrollo superficial de la materia prima, y que normalmente, si se emplean las soluciones adecuadas, los rendimientos de extracción del oro sean muy elevados. La rápida cinética de reacción se relaciona con el tamaño de partícula del mineral, pero también con las condiciones favorables de transferencia de masa que se genera en un sistema agitado. La lixiviación dinámica se realiza con minerales de alta ley o concentrados pues se garantiza la recuperación prácticamente total del metal contenido (casi siempre superior al 95%). Esto permite que el alto valor económico del metal que se recupera sea capaz de pagar tanto la energía utilizada en la agitación como el uso de reactivos concentrados de ataque que, a su vez, garantizan los rendimientos elevados a que antes se aducía. Finalmente, en estas condiciones de lixiviación, con minerales ricos, cinética rápida y rendimientos elevados de extracción, las disoluciones fértiles son muy concentradas y aptas para realizar, sin concentración previa, una precipitación del metal, si fuese necesario, por electrólisis.

El proceso tiene lugar, casi siempre, continuo en series de 3 – 4 tanques con volúmenes muy variables (del orden de 50 a 500 m³ en cada reactor). Adicionalmente, y a diferencia de lo que ocurre en la lixiviación por percolación, es posible calentar el medio de reacción hasta temperaturas cercanas a 60° C con lo que todavía la productividad de estos sistemas de lixiviación aumenta.

Si la lixiviación dinámica se lleva a cabo a elevada temperatura, debe realizarse en reactores a presión (autoclaves) para evitar una excesiva evaporación, ya que estos equipos permiten trabajar en condiciones extremas aumentando, además de la temperatura, la presión y haciendo posible, con cinéticas aceptables, el uso de reactivos gaseosos, como por ejemplo el oxígeno, que son poco solubles en las disoluciones acuosas. Este método es el más caro de los que se utilizan en lixiviación en condiciones extremas y por lo sofisticado de los reactores, lo que hace aumentar los gastos de instalación de forma significativa. En este proceso la agitación puede hacerse a presión atmosférica que es el procedimiento más utilizado a escala industrial y que puede realizarse por medio mecánicos o bien a través de medio neumáticos con inyección de aire como en los denominados TANQUES PACHUCA en los cuales se establece una circulación ascendente- descendente de la pulpa lo que facilita la reacción de lixiviación.

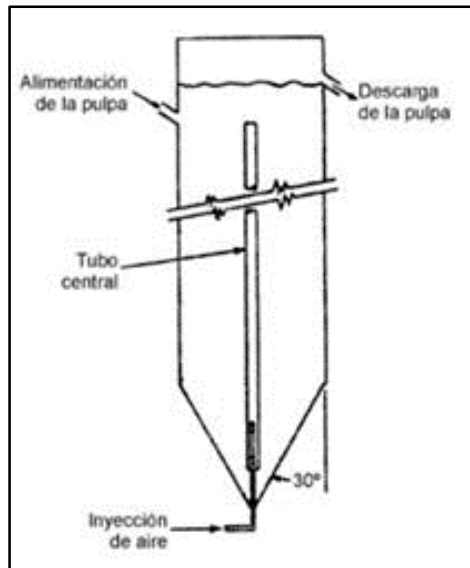


Figura 13. Esquema de principio de un tanque Pachuca.

Los tanques Pachuca a los que hacemos referencia son tanques cilíndricos con fondo cónico. Incorporan en su interior un tubo coaxial con el propio tanque el cual está abierto en sus extremos, que poseen un inyector de aire que penetra a través de dicho tubo central haciendo que la densidad de la pulpa en el interior del tubo sea inferior a la que se tienen en el exterior del mismo, lo que provoca una diferencia de presión de fuerza a la pulpa a ascender dentro de dicho tubo, y rebosar en su parte superior, haciendo circular toda la carga del reactor. Además, la calefacción del sistema, hasta un máximo de unos 60-70°C, es muy sencilla utilizando aportes adecuados de vapor de agua. El diseño de este reactor es muy simple y no tiene partes móviles. Este tipo de lixiviación, de manera general, puede realizarse de forma discontinua o en reactores con flujo continuo.

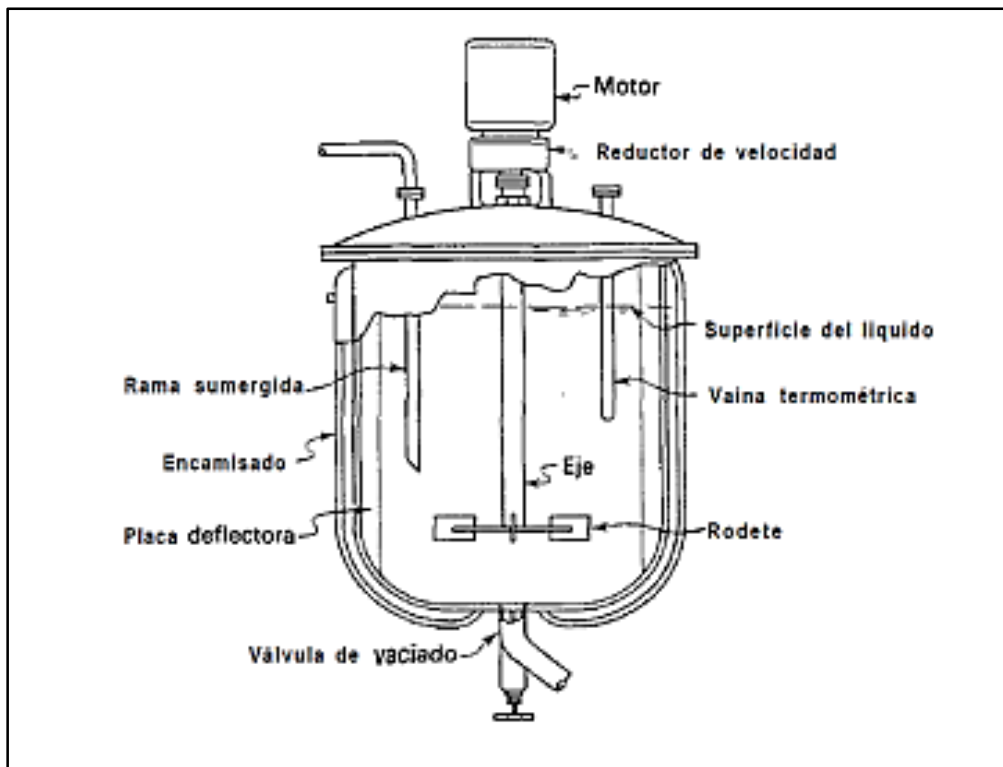
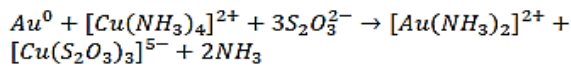


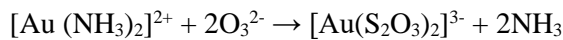
Figura 14. Tanque agitado comúnmente empleado en las pruebas experimentales de lixiviación dinámica.

Lixiviación del oro con tiosulfato.

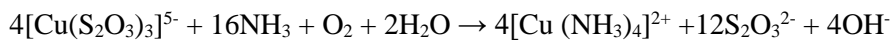
El uso del cianuro usado en la lixiviación del oro ha sido siempre cuestionado por su toxicidad y por su actividad contaminante, por lo que se ha propuesto el uso de tiosulfatos para reemplazarlo en estas operaciones. El empleo del tiosulfato de sodio se considera una técnica no tóxica que permite manejar minerales refractarios, a pesar de que este compuesto no puede disolver el oro tan rápido como lo hace el cianuro, por esta razón se requiere la presencia de amoníaco acuoso y iones cúprico que hacen las veces de catalizador en el proceso de lixiviación. En este caso se sabe que la disolución de oro se desarrolla a través de un conjunto de reacciones redox que permiten transformar el oro metálico en el complejo oro-tiosulfato. El hidróxido de amonio y los iones cúprico forman el complejo cuprotetramina el cual es el responsable de acelerar la disolución del oro. La cuprotetramina oxida el oro metálico contenido dentro del mineral y forma el complejo diaminoauroso, además el ion cúprico es reducido a ion cuproso el cual es re-oxidado con la ayuda del oxígeno disuelto en solución. Mientras tanto el complejo diaminoauroso reacciona con el tiosulfato y produce el complejo oro tiosulfato. Las reacciones químicas que se suceden durante la lixiviación de oro en el sistema amoníaco-tiosulfato son las siguientes.



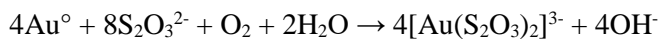
El compuesto diaminoauroso formado en la reacción anterior, reacciona con el tiosulfato de sodio formando el complejo oro-tiosulfato de la siguiente manera:



Por último, el ion cuproso vuelve a oxidarse debido a la presencia del oxígeno disuelto para formar nuevamente la cuprotetramina y de esa forma continuar con la lixiviación:



Siendo la reacción global:



Hay varios factores que afectan el desarrollo de la lixiviación con soluciones amoniacales de tiosulfato, en función a las características del mineral a tratar, uno o varios factores son decisivos al momento desarrollar un buen proceso de lixiviación. La presencia de amoníaco acuoso está relacionada con el pH de la solución. Para una adecuada lixiviación con tiosulfato es necesario establecer el pH de la solución en un rango comprendido entre 9,6 y 11. A ese pH la formación de la cuprotetramina se ve. Si el pH de la solución se encuentra por debajo de 9,6 o arriba de 11, la concentración de la cuprotetramina se ve reducida y otros complejos aminos aparecen en la solución los cuales no intervienen en la disolución del oro.

Los iones cúpricos permiten formar junto al amoníaco el complejo cuprotetramina. Por esta razón, un incremento en la concentración de iones cúprico permite conseguir una rápida disolución de oro. Sin embargo, un incremento excesivo en la cantidad de iones cúprico provoca la oxidación del tiosulfato en politionatos (compuestos formados al oxidarse el ion tiosulfato). La presencia de politionatos causa una disminución en la concentración de tiosulfato lo que va en detrimento de la disolución del oro.

Un incremento en la cantidad del agente lixivante permite aumentar la recuperación de oro en el lixiviado. No obstante, se debe tener en cuenta que un excesivo aumento en la cantidad de tiosulfato añadida a la solución puede derivar en la oxidación de este en politionatos que perjudican la disolución de oro. Otro aspecto a tener en cuenta es que una excesiva cantidad de la sal de tiosulfato puede favorecer la reacción entre el ion tiosulfato y el oro metálico la cual transcurre más lento que la reacción entre el complejo diaminoauroso y el ion tiosulfato. Una elevada concentración de tiosulfato de sodio puede minimizar el efecto de la cuprotetramina y la disolución de oro progresará más despacio.

2.3. Marco conceptual.

Lixiviación dinámica:

Proceso de extracción de metales que se realiza con movimiento continuo del mineral, generalmente en columnas o tanques agitados, a diferencia de la lixiviación estática.

Tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$):

Agente lixiviante alternativo al cianuro, que forma complejos solubles con el oro sin los riesgos ambientales del cianuro.

Amonio (NH_4^+):

Ion derivado del amoníaco que actúa como agente estabilizante del complejo de oro con tiosulfato, mejorando la eficiencia del proceso.

Complejo aurotiosulfato:

Compuesto soluble que se forma cuando el oro reacciona con el tiosulfato en presencia de amonio, permitiendo su disolución.

Agente lixiviante:

Sustancia química capaz de disolver selectivamente el metal valioso presente en el mineral.

Mineral refractario:

Mineral que contiene oro encapsulado o asociado con compuestos que dificultan su extracción mediante lixiviación convencional.

Oxidación:

Reacción química en la que un elemento pierde electrones; en lixiviación, puede referirse a la preparación del mineral para mejorar la recuperación del oro.

Reducción:

Reacción complementaria a la oxidación, donde un elemento gana electrones. En el contexto del oro, se refiere a su precipitación desde solución.

Agitación:

Movimiento mecánico aplicado en sistemas de lixiviación dinámica para asegurar la mezcla uniforme del mineral con el agente lixiviante.

Tiempo de residencia:

Tiempo que el mineral permanece en contacto con la solución lixiviante, afectando la eficiencia de extracción.

Recuperación de oro:

Porcentaje del oro total presente en el mineral que se logra extraer mediante el proceso de lixiviación.

Selectividad:

Capacidad del agente lixiviante para disolver preferentemente el oro sobre otros metales presentes.

Adsorción en resinas:

Técnica utilizada para recuperar el oro disuelto en tiosulfato, ya que el carbón activado no es efectivo en este sistema.

pH:

Medida de acidez o basicidad de la solución; en la lixiviación con tiosulfato-amonio se requiere un pH alcalino (usualmente entre 8 y 10).

Estabilidad del complejo:

Facilidad con la que el complejo aurotiosulfato permanece en solución sin descomponerse ni liberar el oro prematuramente.

2.4. Estrategia metodológica.

Según el tipo esta investigación es aplicada, ya que busca que solucionar un problema técnico, la cuantificación máxima de oro empleando reactivos no tóxicos como el tiosulfato de sodio y el tiosulfato de amonio. Por su nivel es una investigación explicativa, ya que busca que relacionar la variable estudio comparativo con la variable tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio. Por su diseño la presente investigación es experimental ya que se manipula la variable independiente para demostrar la hipótesis, es decir, la variable estudio comparativo. La población del estudio está conformada por el mineral oxidado de oro, que se almacenan en las canchas de minerales de las plantas de beneficio de minerales. La muestra está conformada por 20 kg de mineral oxidado de oro con cierta carga de sulfuros que se analizó y se utilizó para las pruebas experimentales de lixiviación con el tiosulfato de sodio y el tiosulfato de amonio. Las técnicas empleadas son las analíticas y los instrumentos los ensayos de laboratorio. Los datos obtenidos fueron seleccionados, tabulados, interpretados y discutidos de acuerdo con los resultados obtenidos.

2.5. Desarrollo experimental.

Recolección de muestras.

Se hizo en la cancha de minerales de la planta “Mercurio”, localizada a 41 Km de la ciudad de Nasca en el distrito de Vista Alegre, Provincia de Nasca, Departamento de Ica. Las muestras recolectadas contenían óxidos de hierro especialmente magnetita y hematita, cuarzo, óxidos de cobre y una mínima cantidad de sulfuros. Se tomó un total de 40 kg de mineral de las características descritas y se colocaron en sacos de yute de 10 kg cada uno para trasladar el mineral al laboratorio metalúrgico de la Facultad.

Tratamiento físico de las muestras.

El mineral recolectado ya en el laboratorio metalúrgico fue primeramente tamizado para separar el material que tenía una granulometría igual o inferior a $\frac{1}{2}$ ” con el fin de no saturarla chancadora y hacer más rápida la operación de chancado. Después de chancar todo el mineral hasta la malla #1/2” se procedió a la molienda del mineral, una porción de 3 kilogramos se sometió a chancado seco y el resto del mineral fue sometido a chancado húmedo. La molienda se hizo hasta malla # 325 (0,044 mm)

Selección de la muestra representativa.

La muestra molida en seco se colocó en una manta plástica para realizar en ella la homogenización de todo el material y proceder a la selección de la muestra representativa mediante el método del cuarteo. El material se mezcla para posteriormente apilarlo a la forma de un cono. Este se aplasta y se divide con una pala o espátula en forma de cruz (4 partes iguales). Se retiran 2 cuartos opuestos y los otros 2 restantes, que forman la nueva muestra, se vuelven a mezclar y el proceso se repite varias veces hasta obtener el tamaño apropiado de muestra que fue aproximadamente de 300 g lo necesario para los ensayos cuantitativos.

Análisis químico cuantitativo del mineral.

Primeramente, tomando como muestra el material pulverizado se realizaron los análisis para determinar la composición química del mineral, que básicamente consiste en determinar los principales metales que lo componen tales como el cobre, hierro, níquel, zinc, aluminio, plomo, oro, plata y además sílice y azufre.

Ensayos de lixiviación con tiosulfatos.

El diseño de las pruebas de campo incluyó:

a. Determinación del tamaño de partícula:

Se hicieron ensayos con mineral pulverizado hasta malla # 325.

b. Lixiviación dinámica:

En las pruebas realizadas se evaluaron la velocidad de agitación, la concentración del reactivo lixivante, el tiempo de residencia y la recuperación del oro bajo dichas condiciones.

III. RESULTADOS

3.1. Resultados del análisis del mineral.

Tabla 1

Análisis químico de la muestra mineral

Componente	Unidad	Concentración
Cobre soluble, (CuO)	%	4,91
Cobre insoluble (CuS)	%	1,07
Hierro, (Fe)	%	2,84
Zinc, (Zn)	%	0,32
Plomo, (Pb)	%	0,18
Aluminio, (Al)	%	0,15
Níquel, (Ni)	%	0,21
Sílice (Si)	%	4,15
Azufre (S)	%	2,31
Oro, (Au)	g/t	476
Plata, (Ag)	g/t	92

Fuente: Reporte de laboratorio.

La tabla 1 muestra los resultados del análisis químico cuantitativo de la muestra mineral la que según el reporte de laboratorio esta contiene 4,91% de cobre oxidado, 2,84% de hierro, 4,15% de sílice, 0,32% de zinc, 0,18% de plomo, 0,15% de aluminio, 476 g/t de oro y 92 g/t de plata.

Tabla 2

Composición mineralógica cualitativa del mineral

Especie mineralógica	Observación
Calcopirita	+
Pirita	-
Covelina	-
Galena	+
Esfalerita	+
Magnetita	++
Azurita	+
Hematita	++
Cuarzo	+++
Oro	++
Plata	+

Fuente: Datos de laboratorio.

La tabla 2 muestra los resultados del análisis mineralógico cualitativo del mineral empleado en los estudios experimentales para determinar la eficiencia de la recuperación del oro por lixiviación con tiosulfatos de sodio y de amonio, como se observa la muestra contiene una mayor cantidad de óxidos y de cuarzo entre los que está contenido el oro.



3.2. Resultado de los ensayos para determinar las condiciones óptimas de lixiviación con los tiosulfatos.

Tabla 3
pH de la solución

NH ₄ OH, mL	pH
25	7,8
50	8,2
75	8,6
100	9,1
125	9,6
150	10,1
175	10,5
200	11,2
225	11,7
250	12,2

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos realizados para establecer el pH de las soluciones con hidróxido de amonio, considerando un litro de solución, el pH alcanzado con cada volumen de hidróxido de amonio es aproximado ya que el amoníaco disuelto rápidamente escapa de la solución disminuyendo su concentración.

Tabla 4

Tiempo de molienda del mineral hasta malla # 325

Malla #	Tiempo, min	Porcentaje, %
325	8	24
325	9	29
325	10	35
325	11	39
325	12	44
325	13	49
325	14	55
325	15	61
325	16	67
325	17	74
325	18	80
325	19	86
325	20	94
325	21	100

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 4 muestra los resultados de las pruebas de molienda con respecto al tiempo que se requiere para moler la totalidad del mineral hasta malla # 325, los resultados indican que se requirió de 21 minutos para lograr tal objetivo, esto debido a que el mineral contiene cuarzo un mineral de dureza 7 en la escala de Mohs.

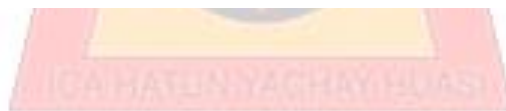


Tabla 5

Concentración de sulfato de cobre en la solución de lixiviación

Volumen de la solución, mL	Concentración del $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, g
1000	10
1000	11
1000	12
1000	13
1000	14
1000	16
1000	17
1000	18
1000	19
1000	20
1000	21
1000	22
1000	23
1000	24

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 5 muestra los resultados de la disolución de sulfato de cobre pentahidratado en una concentración menor a 0,2M (32g) con cuyos valores se harán los ensayos de lixiviación del oro con tiosulfato de sodio y de amonio.

Tabla 6

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 01)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	80	18
50	80	23
75	80	31
100	80	38
125	80	46
150	80	53
175	80	61
200	80	69
225	80	76
250	80	85

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 6 muestra los resultados de los ensayos del grupo 01, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 80 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 85 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 7

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 02)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	120	28
50	120	37
75	120	48
100	120	59
125	120	70
150	120	84
175	120	102
200	120	124
225	120	141
250	120	163

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 7 muestra los resultados de los ensayos del grupo 02, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 120 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 163 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 8

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 03)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	160	40
50	160	57
75	160	71
100	160	88
125	160	105
150	160	123
175	160	145
200	160	168
225	160	191
250	160	216

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 8 muestra los resultados de los ensayos del grupo 03, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 160 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 216 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 9

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 04)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	200	55
50	200	73
75	200	91
100	200	115
125	200	137
150	200	154
175	200	178
200	200	203
225	200	234
250	200	255

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 9 muestra los resultados de los ensayos del grupo 04, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 200 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 255 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 10

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 05)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	240	67
50	240	89
75	240	105
100	240	124
125	240	142
150	240	161
175	240	183
200	240	213
225	240	245
250	240	289

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 10 muestra los resultados de los ensayos del grupo 05, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 240 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 289 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 11

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 06)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	280	83
50	280	107
75	280	130
100	280	156
125	280	181
150	280	214
175	280	243
200	280	275
225	280	304
250	280	341

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 11 muestra los resultados de los ensayos del grupo 06, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 280 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 341 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 12

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 07)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	320	98
50	320	121
75	320	145
100	320	164
125	320	187
150	320	203
175	320	244
200	320	287
225	320	326
250	320	389

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 12 muestra los resultados de los ensayos del grupo 07, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 320 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 389 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 13

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 08)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	360	115
50	360	133
75	360	152
100	360	184
125	360	207
150	360	243
175	360	286
200	360	327
225	360	365
250	360	428

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 13 muestra los resultados de los ensayos del grupo 08, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación, Como se puede observar con 360 gramos de tiosulfato de sodio y 250mL de amoníaco se recupera 428 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada.

Tabla 14

Concentración de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y Au recuperado (Ensayos grupo 09)

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
25	360	115
50	360	133
75	360	152
100	360	184
125	360	207
150	360	243
175	360	286
200	360	327
225	360	365
250	360	428
275	360	411
300	360	379

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre: 24 g

La tabla 14 muestra los resultados de los ensayos del grupo 09, realizados para determinar la concentración del amoníaco y del tiosulfato de sodio, necesarios para lograr la máxima cantidad de oro presente en la muestra tratada, mediante lixiviación. Como se puede observar con 360 gramos de tiosulfato de sodio y 275mL de amoníaco se recupera 411 mg de oro de los 476 mg que hay en la muestra tratada y con 300mL de amoníaco la recuperación del oro disminuye a 379mg.

Tabla 15

Concentración del $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y la recuperación del oro

NH_4OH , mL	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
250	80	85
250	120	163
250	160	216
250	200	255
250	240	289
250	280	341
250	320	389
250	360	428
275	360	411
300	360	379

Fuente: Datos de las tablas 6 – 14

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

La tabla 15 muestra los resultados de los ensayos realizados con diferentes concentraciones de tiosulfato de sodio, como se observa con una dosis de 250mL de hidróxido de amonio hasta un 90% de recuperación del oro que equivale a 379 mg de oro. Se ha podido determinar que cuando el volumen de hidróxido de amonio supera los 250mL la recuperación de oro disminuye.

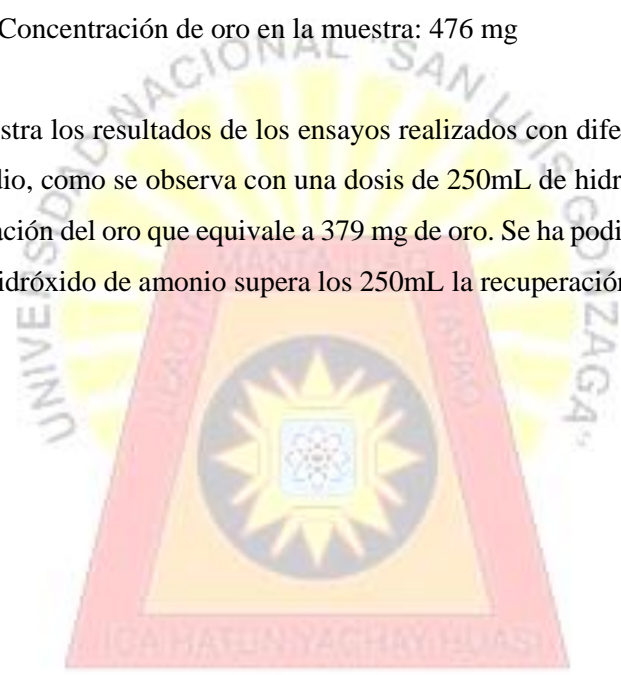


Tabla 16

Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (75g/Kg)

pH	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
10,5	75	136
10,5	75	138
10,5	75	135
10,5	75	137
10,5	75	138
Promedio		136

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre pentahidratado: 24 g

La tabla 16 muestra los resultados de la lixiviación de mineral de oro a un pH 10,5 con tiosulfato de amonio el cual ha sido agregado en una concentración de 75 g, como se observa en la tabla la recuperación promedio de oro bajo estas condiciones fue de 136 mg, de los 476 mg que contenía la muestra.



Tabla 17

Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (150g/Kg)

pH	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
10,5	150	241
10,5	150	240
10,5	150	245
10,5	150	243
10,5	150	245
Promedio		243

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre pentahidratado: 24 g

La tabla 17 muestra los resultados de la lixiviación de mineral de oro a un pH 10,5 con tiosulfato de amonio el cual ha sido agregado en una concentración de 150 g, como se observa en la tabla la recuperación promedio de oro bajo estas condiciones fue de 243 mg, de los 476 mg que contenía la muestra.



Tabla 18

Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (225g/Kg)

pH	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
10,5	225	326
10,5	225	321
10,5	225	324
10,5	225	325
10,5	225	323
Promedio		324

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre pentahidratado: 24 g

La tabla 18 muestra los resultados de la lixiviación de mineral de oro a un pH 10,5 con tiosulfato de amonio el cual ha sido agregado en una concentración de 225 g, como se observa en la tabla la recuperación promedio de oro bajo estas condiciones fue de 324 mg, de los 476 mg que contenía la muestra.



Tabla 19

Lixiviación de mineral aurífero con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ (300g/Kg)

pH	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
10,5	300	441
10,5	300	444
10,5	300	442
10,5	300	445
10,5	300	441
Promedio		443

Fuente: Datos experimentales.

Concentración de oro en la muestra: 476 mg

Concentración de sulfato de cobre pentahidratado: 24 g

La tabla 19 muestra los resultados de la lixiviación de mineral de oro a un pH 10,5 con tiosulfato de amonio el cual ha sido agregado en una concentración de 300 g, como se observa en la tabla la recuperación promedio de oro bajo estas condiciones fue de 443 mg, de los 476 mg que contenía la muestra.



Tabla 20

Datos comparativos de la recuperación del oro con $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$

$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, g	Au recuperado, mg
75	136
150	243
225	324
300	443

Fuente: Datos de las tablas 16-19

La tabla 20 muestra los datos comparativos del uso del tiosulfato de amonio en la lixiviación de mineral aurífero, como se observa con este reactivo se logra recuperar 443 mg de oro del total de 476mg que contiene la muestra lo que corresponde a un 93%.



IV. DISCUSIÓN

El desarrollo de la parte experimental de esta tesis tiene como objetivo comparar cuantitativamente el rendimiento de los métodos de lixiviación de minerales auríferos con tiosulfato de sodio y el tiosulfato de amonio los cuales si bien es cierto aún no tienen una aplicación amplia en la industria ya se muestra como un método más amigable con la naturaleza, menos tóxico y menos contaminante, pero que su aplicación aun no es viable en las plantas hidrometalúrgicas.

Los resultados obtenidos en esta tesis muestran que la recuperación del oro es casi similar al alcanzado en la cianuración, ya que con el tiosulfato de sodio y con el tiosulfato de amonio se recupera un porcentaje mayor al 90%. Con el tiosulfato de sodio en las pruebas experimentales se ha empleado como catalizador el sulfato de cobre pentahidratado y como modificador de pH el hidróxido de amonio, el cual interviene en la formación del complejo aurífero. La concentración de reactivos se ha realizado en función a su fórmula molecular, traducido a gramos con el fin de manejar con mayor eficiencia las cantidades al momento de preparar las soluciones.

Las soluciones de hidróxido de amonio son las que más dificultades presentan al momento de su manipulación, debido al desprendimiento de amoníaco instantáneo que rápidamente se esparce en el aire, creando dificultad para su manejo y para la medición del pH ya que al evaporarse disminuye gradualmente su PH, por ello se optó por trabajar en mililitros de este reactivo. Todos estos inconvenientes se eliminaron al emplear el tiosulfato de amonio directamente al cual se le adiciona sulfato de cobre pentahidratado y como modificador de pH se emplea el óxido de calcio el que además deprime el poco sulfuro que hay en el mineral y la lixiviación se lleva a cabo en un medio oxidado por excelencia.

Otra particularidad de esta lixiviación es que se ha llevado a cabo empleando mineral pulverizado a malla # 325 (0,044 mm) lo que quiere decir que el mineral esta micro pulverizado y forma con el agua una pulpa que es fácil de manejar durante la agitación, lo que con una densidad adecuada se logra una emulsión homogénea y la extracción es más efectiva alcanzando el 93% como máxima recuperación.

V. CONCLUSIONES

1. Experimentalmente se ha establecido que la lixiviación del mineral de oro con tiosulfato de amonio es más eficiente que el método del tiosulfato de sodio en la recuperación del oro, tanto por la capacidad de recuperación del metal como por su manejabilidad operativa, lo cual lo hace más factible para una aplicación industrial.
2. La concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación fue de 90%
3. La concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación fue de 93%.



VI. RECOMENDACIONES

1. Por seguridad se recomienda el uso del hidróxido de amonio en vez del amoníaco líquido comprimido ya que es más fácil manejarlo con las respectivas medidas de seguridad, esto permitirá además una correcta dosificación del reactivo durante la preparación de la pulpa.
2. Se recomienda mantener durante todo el proceso de lixiviación una velocidad de agitación uniforme de 1 500 rpm con lo que se logrará una pulpa adecuada que impida la separación del sólido durante su permanencia en el tanque agitado, lo que permitirá una mayor eficiencia.



VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- Rodríguez, F. (2019) "Introducción a la lixiviación de minerales de cobre". Lima-Perú. revista del instituto de investigaciones - Fgmmcg – UNMSM volumen 2, N°3, pág. 50 – 79.
- Ballester, A. (2015) "Metalurgia Extractiva" Editorial Síntesis, S.A. Madrid-España.
- Bueno, H. (2019) "Procesamiento de Minerales" Impreso en Jauja-Perú.
- Castro, S. (2018) Curso Panamericano de Metalurgia Extractiva, Programa Regional de la OEA, Departamento de Ingeniería Metalúrgica Universidad de Concepción, Fundamentos Físico Químicos de la Flotación.
- Douglas, M. (2017) "Diseño y Análisis de Experimentos", Editorial Iberoamérica, Capítulos 9, 10, 11. Páginas 270, 319 y 335.
- Gutiérrez, H. (2017) "Análisis y Diseño de Experimentos" Editorial Caz prensa Digital, S.A.México.
- Henley, K. (2019) Gold ore mineralogy and its relation metallurgical treatment minerals sc. Enc volumen 4 USA
- Linares, N. (2019) "Procesamiento de minerales" Tacna. Perú
- MC Donald, H. (2018) Alluvial mining. Editorial Chapman & hall, London
- Ojeda, M. (2016) "Recuperación de metales preciosos provenientes de presa de jales" Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Rivera, J. (2019) "Compendio de Conminución" Editorial UNMSM, Lima – Perú.
- Tobón, C. (2020) "Estudio de la Hidrofobicidad de Oro Nativo y su Efecto en la Flotación Espumante Directa" Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Materiales Medellín, Colombia
- Ventura, H. (2017) "Metalurgia del cobre" segunda edición. Editorial San Marcos. Lima-Perú.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Título					Metodología				
Estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023									
Línea de investigación									
Autor (a)									
Problema principal	Hipótesis principal	Objetivo principal	Variable independiente.	Indicadores	Método de investigación	Población	Tipo de investigación	Técnicas de recolección de datos	Técnica estadística para tratamiento de datos
¿Se puede desarrollar un estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023?	Un estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023 se puede desarrollar experimentalmente.	Hacer un estudio comparativo para determinar la eficiencia de la recuperación de oro por lixiviación con tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio, Nasca 2023	Estudio comparativo	1. Cantidad de oro recuperado 2. Reactivos empleados	El método empleado en la presente investigación es el método científico, ya que para su desarrollo se ha planteado el problema, la hipótesis que se tiene que validar mediante la comprobación experimental	La población estará conformada por mineral oxidado con contenido de oro que se encuentran en las canchas de minerales de las plantas hidrometalúrgicas de Nasca	Aplicada	Técnicas analíticas	Los datos obtenidos se seleccionarán, se tabularán, interpretarán y discutirán.
						Muestra	Diseño de investigación	Instrumentos de recolección de datos	
- ¿Cuál es la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación? - ¿Cuál es la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación?	- La concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación es significativa - La concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación es alta	- Determinar la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de sodio durante el proceso de lixiviación. - Determinar la concentración promedio de oro recuperado con tiosulfato de amonio durante el proceso de lixiviación.	Tiosulfato de sodio y tiosulfato de amonio	% de recuperación de los reactivos.		50 kilogramos de mineral aurífero sulfuroso con contenido de cuarzo.	El diseño de la investigación es experimental puro con dos grupos pre y post test, con el siguiente esquema: E A O1 x O2 C A O3 O4 Donde: A Sujetos X Experimento O1 y O3 Pre Test O2 y O4 Post Test E Grupo experimental C Grupo control	Pruebas experimentales	

Anexo 2: Análisis del cobre

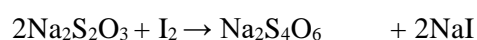
Método yodométrico para determinar cobre.

Aplicación.

El método de ioduro es uno de los métodos más exactos que se conoce para la determinación del cobre en minerales.

Fundamento y calculo.

El método se basa en que si se trata una solución de sal cúprica neutra o débilmente ácida, con yoduro de potasio en exceso, se precipita todo el cobre en estado de yoduro cuproso y queda libre un átomo de cobre. El yodo liberado se valora con solución de tiosulfato de sodio, según las reacciones.



Para cálculos:

1Litro de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1N = $\text{Cu}/10 = 6,357$ g para un litro.

Para solución 0.1N de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ tomar 24,8105 g para un litro.

$$1\text{mL} = 0,006357 \text{ g de Cu}$$

La determinación del porcentaje de cobre en un mineral constituye un ejemplo de un análisis que emplea el ion yoduro como agente reductor, y yodo como agente oxidante.

Preparación y estandarización de soluciones.

Las soluciones que se necesitan son: agua de bromo, suspensión de almidón y solución estándar de tiosulfato de sodio.

SUSPENSIÓN DE ALMIDÓN.

Esta suspensión debe de ser recientemente preparada. Con 1 g de almidón soluble al cual se le agrega agua, poco a poco, se prepara una pasta delgada. Se vacía ésta en 100mL de agua hirviendo, al tiempo que se agita vigorosamente. Se enfría, se agregan 2 g de KI sólido y se agita hasta disolverlos.

SOLUCIÓN ESTÁNDAR DE TIOSULFATO DE SODIO.

Es mejor utilizar esta solución unos días después de haberla preparado. La estandarización de la solución debe hacerse simultáneamente con las titulaciones de las muestras problemas, si se desea resultados de la más alta precisión:

- Se disuelve 20 g de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ en unos 500mL de agua destilada fría, que se ha hervido para eliminarle el CO_2 .
- Se agregan unos 0,5 g de NaOH y se diluye a un litro.
- Se limpian 2 g de cobre electrolítico puro, primeramente, con fibra de acero y seguidamente con solución de HCl.
- En un matraz Erlenmeyer de 250mL se pesa el cobre con exactitud.

- e. Se añaden 10mL de ácido nítrico concentrado.
- f. Cuando la reacción cesa, se agrega 5mL de agua de bromo saturada y se hierve por 2 minutos.
- g. Se diluye a 50mL y se enfría.
- h. Se agrega gota a gota hidróxido de amonio, hasta que el hidróxido de cobre de color celeste que se forma al principio comienza a disolverse, indicación de lo cual es que la solución empiece a tomar un color azul más oscuro. No se debe añadir tanto amoniaco que la solución vaya a adquirir un color azul oscuro.
- i. Se agregan unos 5mL de ácido acético glacial.
- j. Se pasa a un matraz volumétrico de 500mL, se enfría y se diluye hasta la marca de aforo.
- k. Se pipetea 50mL de esta solución dentro de un matraz Erlenmeyer de 250mL
- l. Se diluye a 100mL y se adicionan 3 g de KI previamente disueltos en unos 10mL de agua destilada.
- m. Se titula con solución de tiosulfato hasta que el color café del yodo haya desaparecido totalmente.
- n. Se agrega 1mL de solución de almidón y se titula hasta que el color azul comienza a decolorarse.
- o. Se agrega 1mL más de solución de almidón y 2 g de NH₄SCN (Sulfocianuro de amonio), disueltos en agua. El ion sulfocianuro desplaza al I₂ adsorbido sobre el Cu₂I₂ (yoduro cuproso) que se formó como un precipitado durante la titulación.
- p. Se titula hasta que el color cambia a un tanino muy ligero.
- q. Se calcula el título en cobre de la solución de tiosulfato:

Título en Cu = Peso del Cu/mL de titulante.

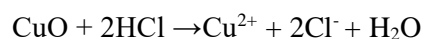
Análisis del mineral.

El tratamiento que se describe sirve para disolver minerales que contienen sulfuros, óxidos o cobre metálico.

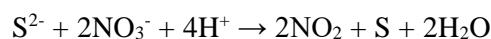
REACCIONES DURANTE EL ANÁLISIS.

Las siguientes reacciones pueden ocurrir durante el análisis:

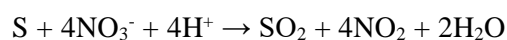
- a. En la solución de HCl se disolverá el óxido de cobre, así:



- b. El sulfuro de cobre se disolverá solamente si se agrega ácido nítrico. El nitrato oxida el S²⁻ a azufre libre.



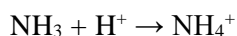
El azufre puede ser oxidado ulteriormente a SO₂



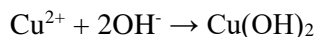
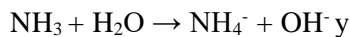
Estas dos reacciones reducen la concentración del ion sulfuro por debajo de la concentración en la

constante de producto de solubilidad para el CuS. La concentración de Cu^{2+} aumenta grandemente y el CuS se disuelve.

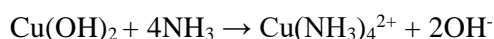
c. La adición de hidróxido de amonio neutraliza el exceso de ácido.



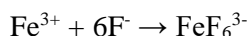
Aumenta también la concentración de OH^- , de manera que el hidróxido de cobre precipita.



Si se agrega demasiado amoníaco, se redisolverá el hidróxido de cobre formando un ion complejo de color azul oscuro:



d. Se agrega bifluoruro de amonio para formar un ion complejo muy estable con los iones férricos. De otra manera los iones férricos reaccionarían con el ion yoduro para dar yodo libre.

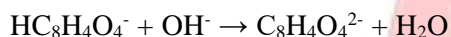


Esta reacción reduce la concentración de Fe^{3+} por debajo de la que se necesita para oxidar los iones yoduro.

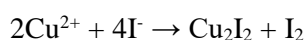
e. El ftalato ácido de potasio contiene el ion biftalato que puede reaccionar indistintamente con un exceso de H^+ o de OH^- manteniendo el pH entre 3,5 y 4,5. Por consiguiente el ion biftalato es un buffer:



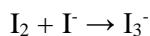
Esta reacción se verifica si en la solución hay un exceso de ácido. De haber un exceso de iones oxhidrilo la reacción que se efectúa es la siguiente:



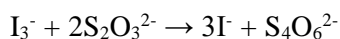
f. Los iones cúpricos oxidan el ion yoduro a yodo libre.



El yoduro cuproso es insoluble y precipita adsorbiendo I_2 considerablemente, a menos que estén presentes bastantes iones sulfocianuro para desplazar el yodo. Las moléculas de yodo reaccionan con los iones yoduro para formar un ion complejo débil, el ion triyoduro:



g. El ion triyoduro es reducido a yoduro por los iones tiosulfato de la solución estándar.



PROCEDIMIENTO.

El mineral se disuelve y analiza de acuerdo con los siguientes pasos:

a. Se seca el mineral por una hora a 105-110°C. Un sobre secado puede ocasionar que el oxígeno del aire oxide los sulfuros del mineral.

- b. En matraces Erlenmeyer de 500mL, si es que no hay disponibles matraces de cobre, se pesan muestras de 1 g de mineral.
- c. Se agregan 10mL de HCl concentrado.
- d. Se hierve hasta reducir el volumen hasta 5mL.
- e. Se adicionan 10mL de HNO₃ concentrado.
- f. Se hierven hasta reducir el volumen a unos 10mL.
- g. Se agrega 10mL de HCl concentrado y se hierve hasta reducir el volumen a unos 10mL.
- h. Se enfrían y se agregan con mucho cuidado 10mL de H₂SO₄ concentrado.
- i. Se hierve para expulsar por lo menos 5mL de líquido del matraz. Se continúa la ebullición hasta que por la boca del matraz escapen vapores blancos de ácido sulfúrico, por lo menos por 30 segundos. Todo el HCl debe ser volatilizado.
- j. Se enfría, se añaden 20mL de agua y se calienta hasta que los humos blancos, densos, vuelvan a aparecer por la boca del matraz.
- k. Se enfría y se diluye a 25 – 30mL.
- l. Se adiciona hidróxido de amonio hasta que el color verde comience a volverse azul.
- m. Se agregan 2 g de bifluoruro de amonio (NH₄HF₂) y se agita hasta disolverlo completamente.
- n. Se agregan 3 gramos de yoduro de potasio y se disuelve.
- o. En este punto para actuar como buffer se puede adicionar y disolver un gramo de ftalato ácido de potasio. Sin embargo, rara vez se necesita.
- p. Utilizando almidón como indicador se titula con tiosulfato de sodio hasta que el color café del yodo haya desaparecido.
- q. Se calcula el porcentaje de cobre en el mineral.

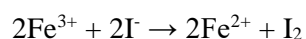
Título x volumen de titulación = g de Cu

Errores del método

Existen muchas posibles causas de error en este análisis, pero, con precauciones apropiadas se pueden obtener excelentes resultados.

IONES FÉRRICOS.

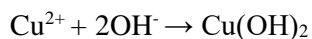
El Fe³⁺ al igual que el Cu²⁺, oxida al I⁻, a menos que el ion férrico sea separado de la solución:



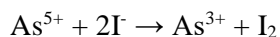
Para evitar esta reacción con el NH₄HF se agregan iones fluoruro, los cuales forman un ion complejo estable.

CONTROL DEL pH.

Con un pH superior a 4,5 el Cu²⁺ reacciona con el OH⁻, precipitando de la solución y originando una oxidación incompleta del I⁻.



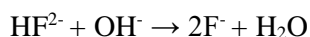
Con un pH inferior a 3,5 tanto el As^{5+} como el Sb^{5+} , de estar presentes pueden oxidar el I^- :



El antimonio reacciona de forma similar. Por consiguiente, la solución que se va a analizar debe bufferizarse a un pH entre 3,5 y 4,5. El ion bifluoruro del NH_4HF_2 por lo general es un agente regulador suficiente, aunque el ftalato ácido de potasio con frecuencia se agrega como agente bufferizante adicional. El ion bifluoruro bufferiza del mismo modo que el ion biftalato, con exceso de H^+ :



Y con exceso de OH^- :



ADSORCIÓN DEL I_2 SOBRE EL Cu_2I_2 .

El precipitado de yoduro cuproso adsorbe I_2 fuertemente, a menos que cantidades relativamente grandes de SCN^- estén presentes para ser adsorbidos, desplazando así al I_2 de las superficies de los cristales de yoduro cuproso.

INESTABILIDAD DE LA SOLUCIÓN DE TIOSULFATO.

El tiosulfato se descompone en soluciones ácidas o neutras y con el O_2 del aire, produciendo azufre y sulfatos o sulfitos. La adición de NaOH ó Na_2CO_3 estabiliza algo la solución, pero es mejor que las titulaciones y estandarizaciones se complementen el mismo día.

SODIO TIOSULFATO 10%
SECCION 1: IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO Y DE LA EMPRESA

Identificación del producto químico	Tiosulfato de Sodio 10%
Concentración	10%
Código	S07650
Nombre del proveedor	WINKLER LTDA.
Dirección del proveedor	El Quilay 466, Parque Industrial Valle Grande, Lampa, Santiago / Chile.
Número de teléfono del proveedor	224826500
Número de teléfono de emergencia en Chile	224826500
Número de teléfono de información toxicológica en Chile (CITUC)	226353800
Dirección electrónica del proveedor	www.winkler.cl

SECCION 2: IDENTIFICACION DE LOS PELIGRO

Clasificación según NCH382 / NCH2156	Clasificación según GHS
NO CLASIFICADO	NO CLASIFICADO
NO CLASIFICADO	NO CLASIFICADO
Señal de seguridad según NCH14114	Clasificación específica
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 10px;"> CLASIFICACION DE RIESGOS 0 = No específico 1 = Ligero 2 = Moderado 3 = Severo 4 = Extremo NORMA NPPA 1-0-0 </div>	Código Almacenaje Winkler Verde: Normal <div style="background-color: green; width: 50px; height: 15px; margin-left: 10px;"></div>
Descripción de peligros y sus efectos	
Inhalación	Causa irritaciones leves en la nariz y tracto respiratorio.
Contacto con la piel	Irritaciones leves por contacto prolongado.
Contacto con los ojos	Irritación y conjuntivitis temporal.
Ingestión	Irritación gastrointestinal leve. Náusea leve. Hinchazón y posible dolor abdominal. Baja toxicidad.

SECCION 3: COMPOSICION / INFORMACION DE LOS COMPONENTES

Sinónimos	Sodio Tiosulfato 5-hidratado en solución, Tiosulfato de Sodio Pentahidratado en Solución, Hiposulfito de Sodio Pentahidratado en solución	
Nombre común o genérico	Sodio Tiosulfato 5-hidratado	Sodio Carbonato (como estabilizador de pH)
Fórmula química	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Na_2CO_3
Peso molecular	248,18 g/mol	105,99 g/mol
Número CAS	10102-17-7	497-13-3
Número UN	No especificado	

SECCION 4: PRIMEROS AUXILIOS

En caso de contacto accidental con el producto proceder de acuerdo con:	
Inhalación	Transferir a la persona donde exista aire fresco. En caso de paro respiratorio, emplear método de reanimación según aplique. Si respira difícilmente se debe suministrar Oxígeno. Conseguir asistencia médica de inmediato.
Contacto con la piel	Lavar con abundante Agua, a lo menos por 10 minutos. Utilizar una ducha de emergencia en caso de ser necesario. Sacarse la ropa contaminada y luego lavarla. De continuar la irritación, solicitar ayuda médica.
Contacto con los ojos	Lavarlos con abundante Agua en un lavadero de ojos, de 10 a 15 minutos como mínimo, separando los párpados. De mantenerse la lesión, derivar a un servicio médico.
Ingestión	Lavar la boca con Agua. Dar a beber Agua. Derivar a un centro de atención médica de inmediato.
Principales síntomas y efectos agudos y retardados	Irritación, tos, insuficiencia respiratoria, dolor, espasmos, conjuntivitis.
Protección de quienes brindan los primeros auxilios	Usar equipo de protección personal adecuado
Notas especiales para un médico tratante	No hay información disponible.



**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(NCH 2245. Of 2015)**

SODIO TIOSULFATO 10%
S07650

SECCION 5: MEDIDAS PARA LUCHA CONTRA INCENDIO

Agentes de extinción	En general, uso de extintores de Espuma Química, Anhídrido Carbónico y/o Polvo Químico Seco, de acuerdo a características del fuego circundante. Aplicación de Agua en forma de neblina.
Agentes de extinción inadecuados	No existen limitaciones de agentes extinguidores para este sustanciamezcla.
Productos que se forman en la combustión y degradación térmica	Óxidos de Azufre, Óxido de Sodio, Sulfuro de Hidrógeno
Peligros específicos asociados	El fuego puede provocar emanaciones de gases tóxicos.
Métodos específicos de extinción	En general, uso de extintores de Polvo Químico Seco, Espuma Química y/o Anhídrido Carbónico, de acuerdo a características del fuego circundante. Aplicar Agua solo en forma de neblina para enfriar contenedores.
Precauciones para el personal de emergencia y/o los bomberos	En caso de fuego, protéjase con un equipo respiratorio autónomo.

SECCION 6: MEDIDAS QUE SE DEBEN TOMAR EN CASO DE DERRAME ACCIDENTAL

Precauciones personales	Evitar la inhalación de los vapores aerosoles.
Equipo de protección	Usar ropa adecuada, equipo de protección personal.
Procedimientos de emergencia	Evacue el área de peligro, respetar los procedimientos de emergencia, consultar con expertos.
Precauciones medioambientales	No lavar los residuos al desagüe.
Métodos y materiales de contención, confinamiento y/o abastecimiento	Contener el derrame o fuga. Ventilar el área. Aislar la zona crítica. Utilizar elementos de protección personal. Absorber por medio de un material o producto inerte. Recoger el producto a través de una alternativa segura. Disponer el producto recogido como residuos químicos. Lavar la zona contaminada con Agua. Solicitar ayuda especializada si es necesario.
Métodos y materiales de limpieza	
Recuperación	Recoger con material absorbente de líquidos
Neutralización	No hay información disponible.
Disposición final	No hay información disponible.
Medidas adicionales de prevención de desastres	No hay información disponible.

SECCION 7: MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

Manipulación	
Precauciones para la manipulación segura	Observar las indicaciones de la etiqueta.
Medidas operacionales y técnicas	Proteger contra el daño físico.
Otras precauciones	Sustituir ropa contaminada. Lavar manos al término del trabajo.
Prevención del contacto	Mantener los envases cerrados y debidamente etiquetados.
Almacenamiento	
Condiciones para el almacenamiento seguro	Zona general de almacenaje de reactivos y soluciones químicas. Almacenamiento en bodegas, cabinas o estanterías, diseñadas con resistencia para contener sustancias químicas. Lugar fresco, seco y con buena ventilación. Proteger de la luz solar. Contar con medios de contención de derrames. Acceso controlado y señalización del riesgo.
Medidas técnicas	Mantener alejado de condiciones y sustancias incompatibles. Proteger contra el daño físico. Tener los envases cerrados y debidamente etiquetados.
Sustancias y mezclas incompatibles	Almacenar alejado de condiciones y productos incompatibles.
Materiales de envase y embalaje	Se recomienda contener en recipiente de vidrio o plástico apropiado con cierre hermético.

SECCION 8: CONTROL DE EXPOSICION / PROTECCION ESPECIAL

Concentración máxima permisible	Datos no disponibles
Elementos de protección personal	Como medida general, trabajar en un lugar con buena ventilación. Utilizar campanas de laboratorio de ser necesario. Aplicar procedimientos de trabajo seguro. Capacitar respecto a los riesgos químicos y su prevención. Contar con ficha de seguridad química del producto y conocer su contenido. Mantener los envases con sus respectivas etiquetas. Respetar prohibiciones de no fumar, comer y beber bebidas en el lugar de trabajo. No plotear con la boca. Usar proppeta. Utilizar elementos de protección personal asignados.
Protección respiratoria	Aplicación de protección respiratoria solo en caso de presencia de vapores o de sobrepasarse los límites permisibles correspondientes. En caso de presencia de altas concentraciones ambientales, existencia de cantidades desconocidas o situaciones de emergencias, se deben utilizar equipos de respiración autónomos o de suministro de aire, ambos de presión positiva.
Protección de manos	Utilización de guantes de Goma Natural, PVC y/o Neopreno, Nitrilo.
Protección de ojos	Se deben usar lentes de seguridad adecuados contra proyecciones de la sustancia química.
Protección de la piel y el cuerpo	Ropa adecuada. Utilizar calzado cerrado, no absorbente, con resistencia química y de planta baja.
Medidas de ingeniería	Esta información no está disponible.

SECCION 9: PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Estado físico	Líquido
Apariencia	Incoloro
Olor	Inodoro
pH	9.0 - 10.0
Temperatura de ebullición	No reportado.
Temperatura de fusión	No reportado.
Densidad (agua = 1)	1.00 g/ml
Presión de vapor	No reportado.
Densidad de vapor (aire = 1)	No reportado.
Solubilidad	Miscible en agua
Condición de inflamabilidad	No combustible.
Temperatura de inflamación	No aplicable.
Temperatura de auto ignición	No aplicable.
Límites de inflamabilidad	No aplicable.

SECCION 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad Química	Normalmente estable.
Condiciones que se deben evitar	Altas temperaturas.
Incompatibilidades Químicas	Ácidos (se genera gas Dióxido de Azufre), Agentes Oxidantes (reacción vigorosa exotérmica), Nitratos Metálicos, Sodio Nitro (reacción violenta), Halógenos, Iodo, Plomo y Mercurio, Sales de Plata, Fluor, Lito.
Polimerización peligrosa	No ocurre.
Productos peligrosos de la descomposición	Oxidos de Azufre, Sodio Óxido y Sulfuro de Hidrógeno.

SECCION 11: INFORMACION TOXICOLOGICA

Toxicidad aguda (LD50 y LC50)	Esta información no está disponible
Iritación/Corrosión cutánea	Dermatitis en piel expuesta.
Lesiones oculares graves/irritación ocular	Esta información no está disponible
Mutagenicidad de células reproductoras/in vitro	Esta información no está disponible
Carcinogenicidad	Esta información no está disponible
Toxicidad reproductiva	Esta información no está disponible
Toxicidad específica en órganos particulares exposición única	Esta información no está disponible
Toxicidad específica en órganos particulares exposiciones repetidas	Esta información no está disponible
Peligro de inhalación	Esta información no está disponible
Toxicocinética	Esta información no está disponible
Metabolismo	Esta información no está disponible
Distribución	Esta información no está disponible
Peligrosidad e infecciosidad aguda (oral, dérmica e inhalatoria)	Esta información no está disponible
Alteración endocrina	Esta información no está disponible
Neurotoxicidad	Afecta al sistema nervioso central.
Inmunotoxicidad	Esta información no está disponible
"Síntomas relacionados"	Sensibilidad con manifestaciones alérgicas

SECCION 12: INFORMACION ECOLOGICA

Ecotoxicidad (EC, IC y LC)	Esta información no está disponible
Persistencia y degradabilidad	Esta información no está disponible
Potencial bioacumulativo	Esta información no está disponible
Movilidad en suelo	Esta información no está disponible

SECCION 13: INFORMACIÓN SOBRE DISPOSICION FINAL

Residuos	En general, los residuos químicos se pueden eliminar a través de las aguas residuales o por el desagüe, una vez que se acondicionan de forma tal de ser inocuos para el medio ambiente. Alternativa: Diluir con Agua en una proporción mínima de 1:20 u otra relación necesaria y luego eliminar en las aguas residuales o por el desagüe. Es importante considerar para la eliminación de residuos, que se realice conforme a lo que disponga la autoridad competente respectiva, solicitándose previamente la autorización correspondiente.
Envasado y empaque contaminados	Maneje los recipientes como el propio producto
Material contaminado	Maneje el material contaminado como el propio producto



**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(NCH 2245. OF 2015)**

SOBIO TIOSULFATO 10%
507650

SECCION 14: INFORMACION SOBRE EL TRANSPORTE

	Modalidad de transporte		
	Terrestre	Marítima	Aérea
Número NU	No regulado	No regulado	No regulado
Designación oficial de transporte	No regulado	No regulado	No regulado
Clasificación de peligro primario NU	No regulado	No regulado	No regulado
Clasificación de peligro secundario NU	No regulado	No regulado	No regulado
Grupo de embalaje/envase	No regulado	No regulado	No regulado
Peligros ambientales	Producto no peligroso según los criterios de reglamentación del transporte	Producto no peligroso según los criterios de reglamentación del transporte	Producto no peligroso según los criterios de reglamentación del transporte
Precauciones especiales	No regulado	No regulado	No regulado
Transporte a granel de acuerdo con MARPOL 73/78, Anexo II, y con IBC Code	No relevante		

SECCION 15: INFORMACION REGLAMENTARIA

Regulaciones nacionales	<p>NCH2245 - Hoja de datos de seguridad para productos químicos. NCH382 - Transporte terrestre de sustancias peligrosas - Clasificación general. NCH2190 - Transporte de sustancias peligrosas - Distintivos para la identificación de riesgos. NCH1411/4 - Señales de seguridad para la identificación de riesgos. D.S. 554 - Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales básicas en los lugares de trabajo. D.S. 298 - Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. D.S. 148 - Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. D.S. 43 - Almacenamiento de sustancias peligrosas.</p>
El receptor debería verificar la posible existencia de regulaciones locales aplicables al producto químico	

SECCION 16: OTRAS INFORMACIONES

Considerando que el uso de esta información y de los productos está fuera del control del proveedor, Winkler Ltda. No asume responsabilidad alguna por este concepto. Determinar las condiciones de uso seguro del producto es obligación del usuario.	
Control de cambios	Esta versión de HDS corresponde a la versión 03 de 09/2018. Se han incorporado cambios según NCH2245-02/2015 en las secciones 1 a la 16 con respecto a versión anterior (NCH245 OF 2003).
Abreviaturas y acrónimos	<p>CAS: Chemical Abstract Service Registration Number (Número de registro no Chemical Abstract Service) ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales) TWA: Time Weighted Average (Promedio ponderado en el tiempo) STEL: Short Term Exposure Limit (Límite de exposición Corto Plazo) LD50: Lethal Dose, 50% (Dosis letal, 50%) LC50: Lethal Concentration, 50% (Concentración letal, 50%) EC50: Effect Concentration, 50% (Concentración Efecto, 50%) NOEL: No Observed Effect Level (Nivel Sin Efecto Observado) COD: Chemical Oxygen Demand (Demanda Química de Oxígeno) BOD: Biochemical Oxygen Demand (Demanda bioquímica de oxígeno) TOC: Total Organic Carbon (Carbono orgánico total) IATA: International Air Transport Association (Asociación Internacional de Transporte Aéreo) IMDG: International Maritime Dangerous Goods Code (Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas)</p>
Referencias	Hoja de datos de seguridad de las materias.

