



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



OBTENCIÓN DE PLATA REFINADA A PARTIR DE
ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE
LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE PLATA EN LA ESCUELA
PROFESIONAL INGENIERÍA METALÚRGICA UNA PUNO 2018

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JAVIER CALLOPAZA CANAZA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

A mis padres Eduardo Calloapaza Canaza y Elvira Canaza Cari, por darme la vida, por sus consejos, por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional en mi formación profesional. También a mis hermanos, Fredy Bruno, Edwin Silvio, Eliana Lizhet, por su comprensión y afecto.

A la compañera de mi vida, Rosalia Laura Charca, por su apoyo incondicional y a mi linda princesa, Liliam Romina, por ser motivo constante de inspiración para seguir adelante; mis docentes, compañeros de estudios y amigos por compartir conocimientos y experiencias.

Javier Calloapaza Canaza



AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento, a Dios por darme la vida, salud, fortaleza, sabiduría y capacidad para lograr mis metas propuestos. Eres quien guía el destino de mi vida y de toda mi familia todos los días.

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno (UNAP), a la Facultad de Ingeniería Geológica e Ingeniería Metalúrgica y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por haber contribuido en mi formación profesional.

A Msc. Hipólito Córdova Gutierrez, docente de la Escuela Profesional Ingeniería Metalúrgica, por su permanente apoyo incondicional, por compartir todos sus conocimientos y experiencias; por permitir y abrir la puerta para realizar las pruebas experimentales en el laboratorio de electrometalurgia.

A mis docentes, miembros del jurado de mi tesis; a mi director/asesor Dr. Héctor Clemente Herrera Córdova, por guiarme en el proceso de la elaboración del presente trabajo de investigación y por compartir todos sus conocimientos en mi formación profesional.

Javier Calloapaza Canaza



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN10

ABSTRACT.....11

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....14

1.2. FORMULACIÓN DE PROBLEMA.15

1.2.1. Problema general15

1.2.2. Problemas específicos.....15

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....15

1.3.1. Hipótesis general15

1.3.2. Hipótesis específicas.....15

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....16

1.4.1. Justificación tecnológica.....17

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.17

1.5.1. Objetivo general.17

1.5.2. Objetivos específicos.17

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES18

2.2. MARCO TEÓRICO22

2.2.1. Plata22

2.2.2. Electroquímica.....27



2.2.3. Electrodeposición28

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.52

3.2. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.....53

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.53

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.54

 3.4.1. Tipo de diseño de investigación experimental puro.54

3.5. VARIABLES.....54

3.6. PROCEDIMIENTO.....55

 3.6.1. Soluciones cianuradas.....55

 3.6.2. Cátodo.....55

 3.6.3. Ánodo.....56

 3.6.4. Cuba o celda de electrodeposición.57

 3.6.5. Rectificador de corriente.....57

 3.6.6. Agitación.....58

3.7. DENSIDAD DE CORRIENTE.....58

3.8. TIEMPO.....59

3.9. REFINACIÓN DE PLATA.60

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**4.1. EVALUAR CÓMO INFLUYE LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN LA
OBTENCIÓN DE PLATA REFINADA A PARTIR DE
ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES CIANURADAS DE
LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE PLATA.64**

**4.2. EVALUAR EL EFECTO DE TIEMPO EN LA OBTENCIÓN DE PLATA
REFINADA A PARTIR DE ELECTRODEPOSICIÓN DE SOLUCIONES
CIANURADAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE PLATA.66**

4.3. OBTENCIÓN DE PLATA REFINADA.67

V. CONCLUSIONES.69



VI. RECOMENDACIONES	70
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXOS.....	74

Área : Metalurgia Extractiva.

Tema : Obtención de plata refinada.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 30 de setiembre de 2020



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de electrodeposición catódica.	30
Figura 2. Celda galvánica	33
Figura 3. Celda electrolítica.....	35
Figura 4. La segunda ley de faraday	40
Figura 5. Mapa urbanístico de la ciudad de Puno.....	52
Figura 6. Solución cianurada.	55
Figura 7. Cátodo.....	56
Figura 8. Ánodo	56
Figura 9. Cuba o celda de electrodeposición	57
Figura 10. Rectificador de corriente.....	57
Figura 11. Agitador.	58
Figura 12. Reacción de lana de acero.....	60
Figura 13. Precipitación con cloruro de plata	61
Figura 14. Densidad de corriente (A/dm^2).....	65
Figura 15. Tiempo (Min.).....	67
Figura 16. Plata refinada (Ag)	68



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas de la plata.....	24
Tabla 2. Serie galvánica.....	32
Tabla 3. Metales que se recuperan por precipitación electrolítica reductiva (EW)	36
Tabla 4. Ejemplo de electrolitos y no electrolitos.....	38
Tabla 5. Distribución de densidad de corriente A/dm^2	59
Tabla 6. Distribución de tiempo (Minutos)	59
Tabla 7. Resultados del parámetro tiempo.....	62
Tabla 8. Resultados del parámetro densidad de corriente	63
Tabla 9. Resultados de Ley de cabeza.....	63
Tabla 10. Resultados de porcentaje de plata (Ag).....	63
Tabla 11. Densidad de corriente.....	64
Tabla 12. El efecto de tiempo	66
Tabla 13. Obtención de la plata refinada	68



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

dm²	: Decímetro cuadrado.
Ag	: Plata.
HNO₃	: Ácido nítrico.
NaCl	: Cloruro de sodio.
AgNO₃	: Nitrato de plata.
A	: Amperios.
V	: Voltios.
%	: Porcentaje.
Ag₂S	: Sulfuro de plata.
AgCl	: Cloruro de plata.
Kg	: Kilógramo.
Oz	: Onzas.
g	: Gramos.
t	: Toneladas.
µm	: Micrómetro.
m	: Metros.
EW	: Electro obtención.
ER	: Electro refinación.
pH	: Potencial de hidrógeno.
ppm	: Partes por millón.
°C	: Grados centígrados.
cm²	: Centímetro cuadrado.
cm	: Centímetro.
Hz	: Hertz.
Zn	: Zinc.
mg	: Milígramo.
L	: Litros.
Min.	: Minutos.



RESUMEN

La presente investigación titulada “Obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno”, se realizó con el objetivo de determinar la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata, la hipótesis general de la investigación plantea que es posible obtener plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata. La investigación es cuantitativa, con tipo de investigación experimental puro. La población está constituida por 20 litros de solución cianurada y la muestra fue de 5 litros de solución cianurada para realizar las pruebas de electrodeposición. Se efectuó, 5 pruebas experimentales de electrodeposición con distintos amperajes de densidad de corriente por un tiempo de 40 minutos para cada prueba, de la misma forma se ejecutó 5 pruebas experimentales con la variable del tiempo con densidad de corriente para cada prueba de 0.6 A/dm^2 , para el manejo de resultados de los datos estadísticos se aplicó los programas SPSS y Excel. También de la solución madre se toma una muestra para tener la ley de plata como ley de cabeza. Finalmente se obtuvo las siguientes conclusiones: se llegó a determinar la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas, aplicando los parámetros de refinación y logrando un grado de pureza de 99.565% de plata pura. Se llevó el control de parámetros en el proceso de la electrodeposición como la densidad de corriente 3.2 A/dm^2 y se logró un excelente porcentaje de recuperación de 93.57%, en un tiempo de 40 minutos; también se evaluó, el efecto de tiempo obteniendo una excelente recuperación de 92.11% en un tiempo de 130 minutos, con amperaje para todas las pruebas experimentales de 0.6 A/dm^2 .

Palabras claves: Densidad de corriente, electrodeposición, refinación, tiempo.



ABSTRACT

The present investigation entitled "Obtaining refined silver from the electrodeposition of cyanide solutions from the leaching of silver minerals at the Professional School of Metallurgical Engineering UNA - Puno", was carried out with the objective of determining the obtaining of refined silver from the electrodeposition of cyanide solutions from silver ores leaching, the general hypothesis of the investigation is that it is possible to obtain refined silver from the electrodeposition of cyanide leaching solutions from silver ores. The research is quantitative, with a pure experimental type of research. The population consists of 20 liters of cyanide solution and the sample was 5 liters of cyanide solution to perform the electrodeposition tests. 5 experimental electrodeposition tests were carried out with different current density amperages for a time of 40 minutes for each test, in the same way, 5 experimental tests were carried out with the time variable with current density for each test of 0.6 A / dm², the SPSS and Excel programs were applied to manage the results of the statistical data. Also from the stock solution a sample is taken to have the silver grade as the head grade. Finally, the following conclusions were obtained: the obtaining of refined silver was determined from the electrodeposition of cyanide solutions, applying the refining parameters and achieving a purity degree of 99.565% of pure silver. The control of parameters in the electrodeposition process was carried out, such as the current density 3.2 A / dm² and an excellent recovery percentage of 93.57% was achieved, in a time of 40 minutes; The time effect was also evaluated, obtaining an excellent recovery of 92.11% in a time of 130 minutes, with amperage for all the experimental tests of 0.6 A / dm².

Key words: current density, electrodeposición, refining, time.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda de plata es muy alta debido a la producción industrial de materiales fabricados con plata. Por ello realizamos los experimentos para la obtención de la plata.

La presente investigación denominada “Obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata, se desarrolló en las instalaciones de la Escuela Profesional Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno”, en el laboratorio de electrometalurgia, que tiene por objetivo determinar la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata, mediante el ataque químico con ácido nítrico y luego la precipitación utilizando cloruro de sodio, en la electrodeposición se encontró los parámetros óptimos de la densidad de corriente y el tiempo, la evaluación de parámetros óptimos de tiempo de electrodeposición cuantificados en minutos y la densidad de corriente medido en A/dm^2 , para la obtención de plata en el electrolito.

La electrodeposición de metales se puede definir como un proceso en el que se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en una disolución (electrolito) que contiene primordialmente los iones metálicos que se van a depositar en la superficie de uno de los electrodos (cátodo). El proceso de electrodeposición involucra la formación de una nueva fase sobre el sustrato, lo que implica la participación de una serie de etapas relacionadas con el transporte de materia, la transferencia de carga y la formación de nuevas estructuras cristalinas. (Imaz, 2013).

La electrodeposición es el proceso que nos permite depositar el metal de una solución rica, por el uso de la electricidad, el equipo básico para realizar este proceso es



la fuente de corriente continua, rectificador de corriente, una cuba o celda, cátodos, ánodos, solución rica de plata (solución cianurada), los equipos de medición son amperímetro y cronómetro.

Para ello, se utilizó como materia prima la solución cianurada de plata, para establecer variables significativas. La plata se recuperó por electrodeposición y se refinó por un método para lograr el alto grado de pureza. Para refinar la plata las grandes refineries en otros países utilizan diferentes métodos, por lo que en este trabajo se evaluó la constante de equilibrio y el grado de complicidad para escoger el reactivo precipitante que de una mayor eficiencia al método y sea más rentable económicamente para quien lo utiliza.

En el proceso hidrometalúrgico siempre se concluye con la obtención del metal a partir de las disoluciones que contienen, los mismos que fueron previamente tratadas, dependiendo del proceso al que hayan sido sometidos. En la investigación se aborda la recuperación mediante la electrodeposición, reducción electroquímica utilizando metales (Ag), se lleva a cabo una precipitación en donde se forma un producto sólido, a partir de una determinada disolución como resultado de las reacciones químicas.

Los procesos de la electrodeposición son usados en una variedad de condiciones y un amplio rango de sistemas, lo que determina la imposibilidad de formular las pautas precisas para la recuperación. Sin embargo, los problemas de difusión iónica son funciones de la concentración del tiempo y la densidad de corriente de operaciones en procesos de electrodeposición de metales. Finalmente se propone a las empresas a realizar el proceso de cementación por el proceso de purificación y electrodeposición para obtener plata con mayor pureza para su comercialización, según el precio del mercado internacional y así lograr la mejor rentabilidad de las empresas.



1.1. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.

La electrodeposición de plata ha sido abordada por varios autores quienes han planteado diversas alternativas para mejorar de forma trascendente el desempeño de la electrodeposición como proceso; sin embargo, existen pocas implementaciones de este proceso convencional a una escala industrial, ya que a pesar de las mejoras que presentan en cuanto al desempeño energético no han logrado superar ciertas limitaciones prácticas.

La idea básica de la investigación es determinar la obtención de la plata refinada y las pruebas experimentales en una celda de electrodeposición a partir de un proceso de lixiviación de minerales de plata. La electrodeposición es uno de los procedimientos más sencillos para recuperar metales como la plata (Ag) en forma pura y selectiva, respecto a las impurezas existentes en solución. Su característica importante radica en que el metal ya está en solución y solamente se trata de obtenerlo depositándolo en el cátodo, donde el ánodo es esencialmente insoluble.

En la actualidad, la recuperación de la plata es por medio de la amalgamación donde este método es referentemente contaminante, sabiendo que el mercurio es uno de los elementos que contamina cuando se realiza el refogado y puede causar diferentes enfermedades. Otro de los métodos que se emplea es con polvo de zinc en solución cianurada y esto es contaminante directamente a la solución, entonces la solución no puede ser recirculado.

Se plantea este método del proceso electrodeposición para que sea reutilizada la solución en la lixiviación del mineral, como también disminuir la contaminación para el medio ambiente, lo propio para el ser humano y seres vivos. Asimismo, se disminuye el costo, tiempo de operación y se logra la obtención de plata refinada con mayor grado de pureza.



1.2. FORMULACIÓN DE PROBLEMA.

1.2.1. Problema general

¿Será posible obtener plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Cuál es el efecto de la densidad de corriente en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO?

¿Qué efecto tiene el tiempo en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.3.1. Hipótesis general

Es posible obtener plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata, en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO.

1.3.2. Hipótesis específicas.

La densidad de corriente contribuye directamente en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO.



El efecto del tiempo determina mejor la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

La minería ha formado parte de la historia y del desarrollo económico de Perú, teniendo gran importancia al ser actualmente una de las primeras fuentes generadoras de ingreso para el país.

Existen en el país un sin número de empresas mineras, por eso planteamos para mejorar la recuperación de la plata, aplicando la electrodeposición, es decir el uso de la corriente eléctrica, siguiendo los parámetros y procedimientos adecuados; con ello, evitamos grandes pérdidas de materia prima y de insumos, también afectaciones a la salud humana y grandes perjuicios ambientales, como la contaminación de ríos, suelos y otros, debido a que los residuos químicos son arrojados sin ningún tratamiento, peor aún los gases de óxidos nitrosos son emitidos a la atmosfera. El contenido de este trabajo plantea alternativas para el mejoramiento técnico del proceso de refinación de plata con ácido nítrico (HNO_3) y precipitación con cloruro de sodio (NaCl), se sabe que el método de ácido nítrico, puede que no sea el mejor, pero es muy adecuado para las pequeñas porciones y las necesidades en las empresas mineras.

Este es un método que se basa en la separación por la precipitación de uno de los componentes en la mezcla, y esto permite que la separación sea visible teniendo así mayor eficiencia en el método. Además, es el más adecuado para una refinación a pequeña como gran escala. (Ortega y Valdivia, 2014).



1.4.1. Justificación tecnológica.

Empleando equipos de electrodeposición, previo al proceso ataque con ácido y posteriormente con el precipitado de plata, aplicando de esta manera procesos tecnológicos apropiados para la refinación de plata.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.5.1. Objetivo general.

Determinar la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO.

1.5.2. Objetivos específicos.

Evaluar cómo influye la densidad de corriente en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO.

Evaluar el efecto de tiempo en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – PUNO.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

El Perú, históricamente tuvo y tiene una riqueza mineral más grande del mundo, no solo por cantidad, sino también por la gran variedad de recursos mineros, que permiten a las empresas compensar con otro producto cuando baja de precio en un determinado metal.

Por lo tanto, la plata es uno de los metales preciosos que se extrae en la actualidad, es un elemento que se encuentra en rocas mineralizadas asociadas con otros elementos. El proceso de recuperación comprende en triturar las rocas mineralizadas y pulverizar hasta una malla necesaria para la cianuración, a través de cual se obtiene la solución rica y se recircula la solución por la celda de electrodeposición y posteriormente se ejecuta la refinación para obtener plata refinada.

Medina y Mejía (2016) en su investigación señala que, a largo de la historia la plata ha sido un activo multifacético; es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad, se menciona en el libro del Génesis. Se constató como un metal libre y fácilmente trabajado en forma útil, ampliamente utilizado por el hombre desde sus principios; los montones de escoria hallados en Asia Menor e islas del mar Egeo, indican que el metal comenzó a separarse del plomo al menos cuatro milenios antes de nuestra era. La plata es un metal bastante reactivo. Hay numerosas sustancias químicas de plata y la reducción de recintos de plata a plata metálica se puede hacer de varias maneras. Considerando la necesidad de dar calidad al desperdicio sin refinar y su condición física y química, la disposición de productos secundarios (problemas de



contaminación), conveniencia para la serie o la operación continua, todos tienen que ver con aspectos de costo, tiempo y tamaño.

Navarro y Salermo (1994) en su investigación, define que la electrodeposición es una forma de recuperar la plata de soluciones cianuradas por medio de electroquímica aprovechando la nobleza de este elemento para una reducción fácil. La celda para la electrodeposición tendrá una celda rectangular para que fluya la solución en paralelo al flujo de la corriente. La electrodeposición es práctica conveniente para la recuperación de los metales preciosos contenidos en la solución cianurada proveniente de la etapa de desorción. El diseño usado generalmente en este circuito es el de celdas rectangulares. Estas consisten en uno o varios tanques en serie de acero inoxidable (el cual actúa como ánodo) o de fibra de vidrio o polipropileno (que son más usadas). En ella están suspendidos verticalmente varios pares de ánodos-cátodos de acero inoxidable y lana de acero. Los metales electrodepositados en los cátodos de lana de acero son retirados (cosechados) y llevados a refinar.

Chamorro y Jimenez (2011) en su investigación titulado “Purificación y electrodeposición de cobre a partir del lixiviado de la empresa Ferro química S.R.L.” para obtener cobre electrolítico a nivel laboratorio, plantea como objetivo determinar los parámetros operativos óptimos para la purificación (temperatura y pH) y electrodeposición (densidad de corriente y tiempo de operación), y llega a la siguiente conclusión en la electrodeposición se trabajó con 1 litro del electrolito 11 de pH para mejorar la conductividad eléctrica y a un voltaje constante de 2,5 v, variando el número de cátodos y ánodos para encontrar una mejor densidad catódica. Determinando así los parámetros operativos óptimos para la electrodeposición a una densidad catódica de 141,34 a/m² (1,4 a/dm²), con un tiempo de 2 horas en donde se ve que la deposición del



metal es mayor logrando alcanzar 10,690 g de plata en comparación a los demás parámetros establecidos.

Panchi (2009) en su investigación titulado “Estudio del proceso de electrodeposición de metales sobre una base polimérica”, se plantea como objetivo, determinar los parámetros importantes en el proceso de metalizado y optimizarlos, llegando a una conclusión que el brillo del depósito está directamente relacionado con el voltaje utilizado, el tiempo de exposición al baño, el tipo de baño usado y el estado de la superficie a ser depositada. Si el voltaje es elevado se obtendrá un depósito absorbente y sin adhesión

Cruz (2016) en su investigación “Evaluación de los parámetros para el diseño y construcción de una celda de electro obtención para recuperar oro”, se plantea el objetivo de determinar los parámetros operativos óptimos para la recuperación del oro mediante la electrodeposición y llega a una conclusión e indica que aplicando los parámetros de las pruebas se determina las mejores condiciones obtenidas de los ensayos una excelente recuperación de 99.04% de recuperación, cuando aplicamos un amperaje de 25A y un voltaje de 2.6 V sin embargo, por efectos de consumo excesivo de corriente se sugiere no exagerar con el incremento de amperaje, para alcanzar una buena recuperación, que llega a un resultado muy bueno y eficiente.

Ortega y Valdivia (2014) en tesis titulada, “Refinación de oro por disolución y precipitación selectiva a nivel de laboratorio en la empresa Desminic S.A., mina La Libertad Chontales”, tiene como objetivo determinar la ley de un mineral respecto al contenido de oro y plata, llegando a concluir que la precipitación es el proceso más simple y efectivo para la recuperación de oro, sobre todo de disoluciones en las que el oro es el metal predominante en la disolución. La extracción con disolventes está



favorecida cuando el proceso intenta, a su vez, recuperar otros metales preciosos mediante este mismo procedimiento. Se logró 93.86% de pureza en la plata final, algo muy bueno para la recuperación rápida de un pequeño producto secundario.

Barrientos (2003) en su investigación “Evaluación de dos métodos de recuperación y refinación de los metales preciosos a nivel laboratorio a partir de los desperdicios con alto contenido de oro”, tiene como objetivo determinar mediante técnica analítica instrumental el porcentaje de plata obtenido y su pureza, llegando a una conclusión de que el método utilizado para recuperar la plata como subproducto de la refinación del oro que dio un mejor refino es el de encuarte tanto en la cantidad recuperada como en la pureza.

Ponce (2005), en su trabajo de investigación indica que el ácido nítrico es un ácido cuyo color varía de incoloro a amarillo pálido, de olor sofocante. Se utiliza en la síntesis de otros productos químicos como colorantes, fertilizantes, fibras, plásticos y explosivos. Es soluble en agua generándose calor. No es combustible, pero puede acelerar el proceso de combustión de materiales combustibles y causar ignición. También indica que el ácido clorhídrico disuelve a todos los metales (excepto a los metales nobles) y óxidos metálicos. Reacciona con los metales que están por encima del hidrogeno en la serie de potencial eléctrico formando cloruros y con los óxidos e hidróxidos metálicos. Disuelve al plomo cuando está concentrado, clora los hidrocarburos saturados y no saturados por adición y por sustitución.

Mindiola y Escalante (2008), señala que la elaboración de joyas requiere de oro y plata con bajo contenido de impurezas, por tal razón el artesano joyero realiza a la materia prima un Proceso de Refinación Química con Ácido Nítrico (PROPAN); conocido comúnmente en el sector de la joyería como purificación.



2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Plata

Debido a su valor económico, su belleza inherente y que es el único elemento de la tabla periódica con género femenino, bien se justifica el título que se le ha dado a esta reseña. La plata se puede encontrar en la naturaleza en estado nativo, formando sulfuros (Ag_2S) en minerales como la argentita o la acantatita, mezclada con oro, o asociada a otros sulfuros como los de plomo, cobre, zinc y antimonio.

Precisamente la producción actual de plata procede de su extracción como producto secundario en la obtención de otros metales, fundamentalmente el cobre, el zinc y el plomo. Los primeros procesos de obtención de plata se pueden situar en torno al año 2000 a. C., e implicaban un tratamiento en horno de mufla de las mezclas de plata con plomo. Durante la etapa colonial española en América, el principal método implicaba la amalgamación con mercurio (en este sentido las minas de mercurio de Almadén jugaron un papel fundamental), aunque posteriormente, durante el siglo XIX, la amalgamación fue superada por la cianuración y por el electro refinado. (Sánchez, 2019).

2.2.1.1. Características.

La plata pura es un sólido blanco, brillante con lustre metálico. Es un poco más dura que el oro. Es muy dúctil y maleable, siendo superada sólo por el oro y quizás por el platino. Es soluble en ácido nítrico, ácido sulfúrico concentrado y caliente y en disoluciones de cianuro. La plata coloidal tiene color gris oscuro o negro. La plata líquida toma hasta veinte veces su volumen de oxígeno y al solidificarse lo desprende. (Barrientos, 2003).

La plata es un elemento escaso en la naturaleza, de la que representa una parte en 10 millones en la corteza terrestre. Se puede encontrar en estado nativo, aunque



generalmente se encuentra en minerales que contienen compuestos de plata, como con azufre (argentita, Ag_2S), arsénico (proustita, Ag_3AsS_3), antimonio (pirargirita, Ag_3SbS_3) o cloro (plata córnea, AgCl) siendo sulfuros y sulfosales su forma principal, la mayor parte de su producción aproximadamente las tres cuartas partes se obtiene como un subproducto, sobre todo del cobre y plomo.

La plata pura es un metal moderadamente suave, un poco más duro que el oro; cuando se pule adquiere un lustre brillante y refleja el 95% de la luz que incide sobre ella. Su densidad es 10.5 veces la del agua. La calidad de la plata, así como su pureza, se expresa como partes de plata pura por cada 1000 partes del metal total. La plata comercial tiene una pureza del 999 (ley 0.999). Es más pesado que el cobre y menos que el plomo.

Aunque la plata es el metal noble más activo químicamente, no es muy activa comparada con la mayor parte de los otros metales. No se oxida fácilmente (como el hierro), pero reacciona con el azufre o el sulfuro de hidrógeno para formar la conocida plata deslustrada. La plata no reacciona con ácidos diluidos no oxidantes (ácidos clorhídrico o sulfúrico) ni con bases fuertes (hidróxido de sodio); sin embargo, los ácidos oxidantes (ácido nítrico o ácido sulfúrico concentrado) la disuelven. Aunque la plata no se oxida cuando se calienta, puede ser oxidada química o electrolíticamente para formar óxido o peróxido de plata, un agente oxidante poderoso.

Las unidades utilizadas para medir la plata son: Millones de onzas troy (Moz) = 31.103 toneladas métricas (ton), tonelada métrica (ton) = 32,151 onzas troy (oz) = 1,000 Kilogramos (kg), onza troy (oz) = 31.1 gramos (gr). (Medina & Mejía, 2016).

2.2.1.2. Propiedades físicas y químicas.

Las propiedades físicas, químicas, mecánicas y usos interesantes de la plata.



2.2.1.2.1. *Propiedades físicas.*

Metal de color blanco brillante, más duro que el oro y menos que el cobre, fundida al aire absorbe oxígeno que al solidificar lo expulsa violentamente arrojando parte de la masa fundida, este fenómeno se llama galleo y sólo ocurre cuando la plata es muy pura.

Tabla 1
Propiedades físicas de la plata

Propiedades	Plata
Símbolo químico	Ag.
Color	Blanco
Peso Atómico	108
Número Atómico	47
Estado de oxidación	1
Densidad Específica	10.5
Temp. de Fusión °C	961
Temp. de Ebullición °C	1955
Temp. de Vaporización °C	2212
Calor de fusión, cal/gr.	24,3
Dureza (Mohs)	2,7
Radio atómico	1,44
Potencial normal, voltios	0,799
Electronegatividad	1,9

FUENTE: ARIAS, V. Tecnología de Refinación de los Metales Preciosos. 1ra. Edición, Editorial San Marcos, Lima 1996. p. 168.



2.2.1.2.2 Propiedades químicas.

Entre las principales propiedades están:

- A temperatura y presión ambiente no se oxida.
- Los álcalis lo atacan muy poco.
- Lo disuelve fácilmente el ácido nítrico diluido o concentrado y el ácido sulfúrico concentrado.
- Lo ataca el ácido sulfhídrico con formación de sulfuro y ciertos cloruros.
- No lo atacan los ácidos orgánicos.
- Forma aleaciones con la mayor parte de metales menos con el hierro y el cobalto y difícilmente con el níquel.

2.2.1.2.3. Propiedades mecánicas.

Después del oro es el más dúctil y maleable de todos los metales, puede laminarse a panes de hasta 0,25 μm de espesor y con 0.1 gramo de plata puede obtenerse un hilo de 180 m.

2.2.1.3. Usos interesantes.

En las siguientes aplicaciones:

- Fabricación de monedas, alhajas, relojes, utensilios, domésticos y objetos artísticos.
- Plateado galvánico de objetos, especialmente sobre cobre o latón.
- Aleación con otros metales y de estos especialmente el cobre y el oro.



- Aleaciones importantes son las utilizadas en odontología.
- En la fotografía donde se consume en un 30%, se ha utilizado pintura con plata para la realización de circuitos impresos.
- En la producción de espejos, depositándola por varios métodos: deposición química, electrolítica o evaporación.
- Acuñación, cuchillería, medicina, maquinaria química y de procesado de alimentos.

La plata es un metal bastante reactivo. Hay numerosas sustancias químicas de plata y la reducción de recintos de plata a plata metálica se puede hacer de varias maneras. Considerando la necesidad de dar calidad al desperdicio sin refinar y su condición física y química, la disposición de productos secundarios (problemas de contaminación), conveniencia para la serie o la operación continua, todos tienen que ver con aspectos de costo, tiempo y tamaño. (Alejandro, 2015).

2.2.1.4. Efectos de la plata sobre la salud.

Las sales solubles de plata, especialmente el nitrato de plata (AgNO_3), son letales en concentraciones de hasta 2g. Los compuestos de plata pueden ser absorbidos lentamente por los tejidos corporales, con la consecuente pigmentación azulada o negruzca de la piel (argiria). Al contacto con los ojos puede causar graves daños en la córnea. En la piel puede causar irritación. El contacto repetido y prolongado con la piel puede causar dermatitis alérgica. Exposición de inhalación en altas concentraciones del vapor puede causar mareos, dificultades para respirar, dolores de cabeza o irritación respiratoria. Concentraciones extremadamente altas pueden causar somnolencia, espasmos, confusión, inconsciencia, coma o muerte. El líquido o el vapor pueden irritar



la piel, los ojos, la garganta o los pulmones. El mal uso intencionado consistente en la concentración deliberada de este producto e inhalación de su contenido puede ser dañino o mortal.

La ingestión es moderadamente tóxica. Puede causar molestias estomacales, náuseas, vómitos, diarrea y narcosis. Si el material se traga y es aspirado en los pulmones o si se produce el vómito, puede causar neumonitis química, que puede ser mortal.

La sobreexposición crónica a un componente o varios componentes de la plata en los animales de laboratorio tienen los siguientes efectos: daños renales, oculares, pulmonares, hepáticos y cerebrales, así como anemia.

La sobreexposición crónica a un componente o varios componentes de la plata en los humanos supone el efecto de anomalías cardíacas. Se ha informado de la relación entre sobreexposiciones repetidas y prolongadas a disolventes con daños cerebrales y del sistema nervioso permanentes.

La respiración repetida o el contacto con la piel de la metil-etil-cetona pueden aumentar la potencia de las neurotoxinas tales como el hexano si la exposición tiene lugar al mismo tiempo. (Medina & Mejía, 2016).

2.2.2. Electroquímica.

Es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación - reducción), en donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química. En las reacciones redox se transfieren electrones de una sustancia a otra. (Chang, 2002).



2.2.3. Electrodeposición

La electrodeposición es el método de cubrir objetos con una película fina de otro metal. El principio que rige este fenómeno es la electrólisis, cuyo nombre procede de dos radicales, electro que hace referencia a electricidad y lisis que significa ruptura.

La electrodeposición implica la reducción (disminución del estado de oxidación; ganancia de electrones) de un compuesto metálico disuelto en agua y una deposición del metal resultante sobre una superficie conductora. Probablemente esta técnica es uno de los procesos más complejos conocidos, debido a que hay un gran número de fenómenos y variables que intervienen en el proceso total, mismos que son llevados a cabo en la superficie de los materiales involucrados. (Del Castillo, 2008).

La electrodeposición es una rama de la electrometalurgia. Se define como el arte de depositar metales mediante el uso de la corriente eléctrica. Esto involucra usualmente la reducción de un compuesto metálico disuelto en agua, y a la deposición del metal resultante sobre una superficie conductora, químicamente pura.

Antes de examinar los efectos producidos por la aplicación de una corriente eléctrica, se deberá considerar lo que sucede cuando una sal, ácido o base se disuelve en agua. En la mayoría de los casos, sucede una acción no visible, la cual es disociación reversible. Esto se denomina disociación iónica o ionización, en la cual, el material se disocia en iones.

La disociación tiene una relación directa con la electrodeposición. La conductividad de una solución depende de la concentración de iones presentes. El grado de ionización se incrementa con mayor dilución, y manteniéndose inactivas las moléculas no disociadas.



La solución se somete a cambios electroquímicos o electrólisis cuando se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos. Los objetos que van a recibir un depósito metálico, constituyen los electrodos negativos o cátodos, mientras que las barras, laminas u hojas del metal a ser depositado se denominan ánodos. Tanto cátodo como ánodo deben ser metálicos.

Los cambios químicos se hacen notar en forma inmediata, la actividad creada se evidencia por la deposición de metal, y a menudo por el desprendimiento de gas en forma de pequeñas burbujas. Este efecto es el resultado del movimiento iónico, inducido por la corriente eléctrica aplicada.

La corriente aplicada a los electrodos es suministrada por una fuente de corriente continua.

La diferencia de potencial sobre los electrodos del baño, o voltaje, expresado en voltios, es importante para que se produzca en el electrolito una circulación de corriente, expresada en amperes. (Panchi, 2009).

2.2.3.1. Tipos de electrodeposición.

2.2.3.1.1. Electrodeposición catódica.

En este tipo de electrodeposición la pieza de trabajo es el cátodo y las partículas deben llevar carga positiva; en general, los grupos catiónicos provienen de la disolución intrínseca del ánodo, o, por la disolución previa en el electrolito. Muchos investigadores afirman que no hay disolución del substrato durante la electrodeposición catódica, sin embargo, Murphy y Anderson, citado por Gómez et al (2005) demostraron que la disolución sí ocurre, pero en una proporción mucho menor que en la anódica. (Gómez & et al, 2005).

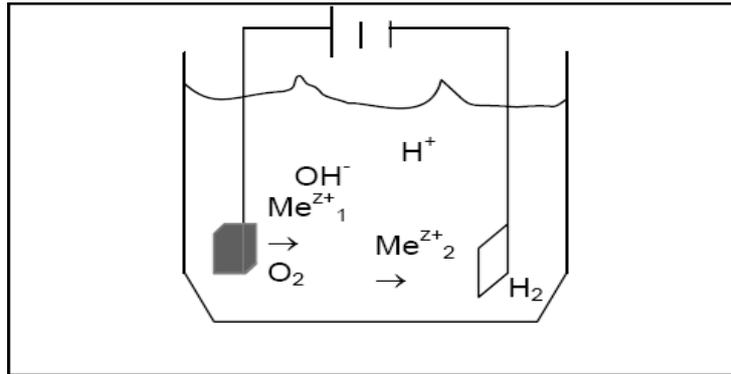


Figura 1: Diagrama de electrodeposición catódica.

Fuente: Gómez & et al., 2005.

Por la naturaleza de los fenómenos electroquímicos la tensión es la medida característica de la sustancia, mientras que la cantidad de corriente solo regula la amplitud de la descomposición. Por lo tanto, el trabajo necesario para una electrolisis está definido por la tensión. Cuando esta no alcanza el valor mínimo necesario para un determinado proceso electroquímico, este no puede realizarse; pero si posiblemente para el cual, la tensión disponible sea adecuada. Esta circunstancia es muy importante, especialmente para la deposición simultánea de varios elementos como en las aleaciones o metal e hidrógeno. Además, la corriente debe poner en movimiento la cantidad de iones necesarios del proceso que se trate y vencer la resistencia que se opone al movimiento de estos.

2.2.3.1.2. Electrodeposición de aleaciones.

La electrodeposición de aleaciones supone la deposición electroquímica simultánea de dos o más metales sobre un mismo cátodo, a partir de una solución electrolítica que contiene a sus iones. La electrodeposición de aleaciones esta poco extendida, aunque muestran un firme avance; la obtención de nuevas posibilidades de aplicación en la técnica depende de una exacta investigación de las relaciones, a menudo complicadas, de los depósitos galvánicos de ciertas aleaciones. La escasa difusión de los depósitos de aleaciones se debe a las grandes dificultades para establecer las condiciones de

funcionamiento de los baños, así como la estabilidad de la composición constante del baño y de los depósitos galvánicos; está claro que si para los recubrimientos de un solo metal las dificultades ya existen, estas serán mucho mayores cuando se trate de depositar simultáneamente dos, pero siempre y cuando se disponga de instrucciones correctas de trabajo, establecidas con los resultados de series repetidas de experiencias y seguidas con exactitud, las dificultades ofrecidas serán menores.

Las reacciones básicas en los electrodos en el caso de la electrodeposición de aleaciones son: (Gómez & et al, 2005).

Reacciones primarias: $Me \rightarrow Me^{z+} + ze^{-}$

Sobre el ánodo: $Me_1^{z+} + ze^{-} \rightarrow Me_1$

Sobre el cátodo: $Me_2^{z+} + ze^{-} \rightarrow Me_2$

2.2.3.2. Proceso de electro-obtención (Ew).

La precipitación por reducción eléctrica comúnmente conocida como electro-obtención (EW), es actualmente uno de los procedimientos más sencillos para recuperar metales, en forma pura y selectiva, respecto a las impurezas existentes en soluciones. Su característica principal radica en que el metal ya está en la solución y solamente se trata de recuperarlo depositándolo en cátodos, mientras el ánodo es esencialmente insoluble. Una celda de electrodeposición está constituida por: (Chamorro & Jimenez, 2011).

2.2.3.2.1. Celdas electroquímicas.

Una celda es un dispositivo en el cual se producen reacciones químicas de oxidación y reducción. El aparato se integra de las siguientes partes: sustancia que contiene iones (electrolito), dos electrodos (cátodo y ánodo) y una conexión eléctrica entre ambos electrodos.



Existen dos tipos de celdas: las electrolíticas, que requieren un voltaje externo (fuente de poder) y, las electroquímicas o galvánicas que solamente necesitan un instrumento para registrar voltaje.

a. Celda galvánica.

Una celda galvánica es aquella en la cual la energía química es convertida en energía eléctrica por medio de una reacción química espontánea. Esto se debe a que un metal es más activo y otro más noble, ánodo y cátodo respectivamente, según la serie galvánica; por lo que al ser conectados eléctricamente producen un flujo de electrones desde el cátodo al ánodo. Dicho flujo genera un potencial eléctrico que puede ser medido experimentalmente. (Campo, 2015).

Tabla 2
Serie galvánica

EXTREMO ANÓDICO (Más susceptible a la corrosión)	
Grupo I	1. Magnesio y sus aleaciones 2. Zinc
Grupo II	3. Acero galvanizado 4. Aluminio 2S 5. Cadmio 6. Acero 7. Hierro
Grupo III	8. Acero inoxidable 9. Pb/Sn para soldar 10. Plomo 11. Estaño 12. Níquel 13. Latón 14. Cobre
Grupo IV	15. Bronce 16. Aleación Cu-Ni 17. Monel 18. Plata para soldar 19. Níquel
Grupo V	20. Plata 21. Grafito 22. Oro 23. Platino

EXTREMO CATÓDICO (Menos susceptible a la corrosión)

FUENTE: Campo (2015).

Los requisitos para que se produzca un proceso de corrosión en una pila galvánica son los siguientes:

Dos superficies con distinto potencial electrónico:

- Una de ellas, que constituye al ánodo de la reacción, al ceder electrones sufrirá la corrosión. Es decir, aquí se lleva a cabo la reacción de oxidación. Es el polo negativo.
- La otra, que constituye el cátodo, ganará los electrones cedidos por el ánodo. En esta zona ocurrirá la reacción de reducción. Es el polo positivo.
- Un electrolito, conductor iónico que contiene los elementos característicos del medio corrosivo. Es justo aquí, en el seno de la solución, donde ocurre el transporte de materia.

Una conexión eléctricamente conductora entre el ánodo y el cátodo, para que sea posible el transporte de carga. (Campo, 2015).

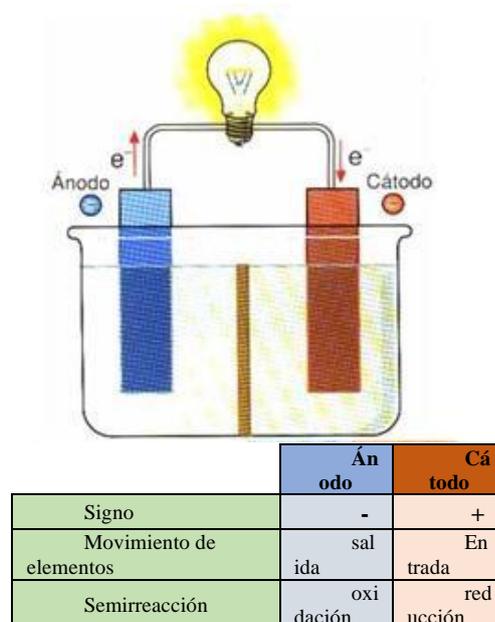


Figura 2: Celda galvánica

Fuente: Campo (2015).



Celda electrolítica.

Las celdas electrolíticas no son espontáneas, por lo que debe aplicarse externamente un potencial eléctrico para que funcionen. Al proveer dicha energía, se fuerza a que una corriente eléctrica pase por la celda con el fin de generar reacciones químicas de óxido-reducción en la superficie de los electrodos de dicha celda. Uno de los procesos más conocidos es el electro depósito de metales como cobre, níquel o zinc. Es importante puntualizar que aquí, el ánodo estará cargado positivamente y el cátodo negativamente, contrario a lo sucedido en las celdas galvánicas.

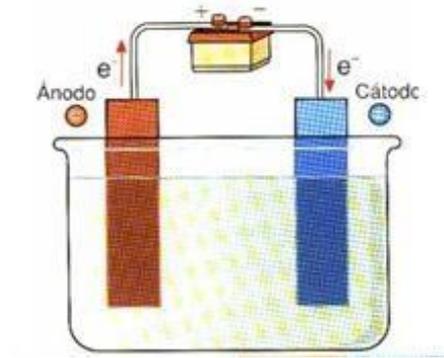
Las partes que conforman a la celda electrolítica son las siguientes:

- **Electrolito.** Al igual que en las celdas galvánicas, se necesita de un conductor iónico.

- **Ánodo.** En este tipo de celdas, el ánodo posee el polo positivo y aquí se lleva a cabo la oxidación de la especie electroquímica.

- **Cátodo.** Éste es el polo negativo y en él se produce la reducción de la especie electroquímica.

- **Fuente de energía.** Es quien aplica la energía necesaria para poder invertir el sentido natural de la corriente, dando lugar a una reacción química opuesta a la que se produce espontáneamente en la pila. (Campo, 2015).



	Ánodo	Cátodo
Signo	+	-
Movimiento de elementos	Salida	Entrada
Semirreacción	oxidación	reducción

Figura 3: Celda electrolítica

Fuente: Campo (2015).

En la actualidad tiene una gran importancia económica, al permitir el beneficio de recursos lixiviables, tanto el oro como de cobre, plata, etc., cuyo tratamiento por otras vías resultaría económicamente inviable, se presenta una lista de los metales que se recuperan comercialmente por EW, junto a las características del electrolito y del cátodo usado en cada caso.

Tabla 3
Metales que se recuperan por precipitación electrolítica reductiva (EW)

Metales	Electrolito	Cátodo	Comentario
Antimonio	Soda y sulfuro de sodio	Acero	*
Cadmio	Solución de Sulfato	Aluminio	Sub-producto de la recuperación de zinc
Cromo	Solución de sulfato	Hastelloy	*
Cobalto	Solución de sulfato	Acero inoxidable	producido junto al cobre en el Congo
Cobre	Solución de sulfato	Cobre o acero inoxidable	Soluciones de lixiviación de alta ley o bien después de SX
Galio	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable	*
Manganeso	Solución de sulfato	Acero inoxidable	*
Níquel	Solución de Sulfato	Níquel o acero Inoxidable	*
Oro	Solución de cianuro	Lana de acero	*
Plata	Solución de cianuro	Lana de acero	*
Teluro	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable	*
Zinc	Solución de sulfato	Aluminio	*
	Solución de soda (NaOH)	Acero inoxidable	Producción de zinc en polvo

FUENTE: Domic (2001).

2.2.3.3. Proceso de electro- refinación (ER).

La refinación electrolítica (ER) constituye un paso obligado de refinación para proceder a la comercialización final de numerosos metales, su 15 característica principal radica en que el metal lleva como ánodo (soluble) y se disuelve electrolíticamente, mientras en el cátodo se deposita el metal refinado en forma simultánea, las impurezas quedan disueltas en el electrolito y también precipitan en los residuos o barros anódicos



,sin duda que el caso que el cobre es el más notable, ya que prácticamente todo el cobre mundial que se utiliza industrialmente en la actualidad requiere del grado de pureza establecido por los estándares del cobre electrolítico. (Domic, 2001)

2.2.3.4. Principios electroquímicos.

2.2.3.4.1. Electrolitos.

Todos los solutos que se disuelven en agua se agrupan en dos categorías: electrolitos y no electrolitos. Un electrolito es una sustancia que, cuando se disuelve en agua, forma una disolución capaz de conducir la electricidad. Un no electrolito, por lo tanto, no conduce la corriente eléctrica cuando se disuelve en agua.

2.2.3.4.2. Tipos de electrolitos.

Los electrolitos se clasifican en fuertes y débiles. Los primeros son sustancias que están casi completamente dissociadas en la solución, e incluyen sólidos iónicos y ácidos fuertes. Los últimos, poseen enlaces tan fuertes que muy difícilmente se ionizan en solución permaneciendo la mayor parte en forma de moléculas, las cuales no tienen la capacidad de transportar carga eléctrica como lo hacen los iones. Es importante mencionar, que los electrolitos por buenos conductores de la electricidad que puedan ser, siempre tendrán menor capacidad para conducir la electricidad que los materiales sólidos. (Atkins & Jones, 2006).



Tabla 4
Ejemplo de electrolitos y no electrolitos

Electrolitos fuertes	Electrolitos débiles	No electrolitos
Ácido clorhídrico. HCl	Ácido acético. CH ₃ COOH	Metanol. CH ₃ OH
Ácido nítrico. HNO ₃	Ácido fluorhídrico. HF	Etanol. CH ₃ CH ₂ OH
Hidróxido de sodio. NaOH	Amoníaco. NH ₃	Glucosa. C ₆ H ₁₂ O ₆
Cloruro de sodio. NaCl	Agua. H ₂ O	Sucrosa. C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁

FUENTE: Atkins & Jones (2006).

2.2.3.4.3. Principios de electrólisis.

Cuando se aplica una diferencia de potencial a soluciones de ácidos, bases o sales, o a ciertas sustancias en estado de fusión, la conducción eléctrica se presenta acompañada por cambios de naturaleza química o física. El proceso se conoce con el nombre de electrólisis por el hecho de que los productos de la reacción química que lo acompañan aparecen separados uno del otro en láminas conductoras o electrodos, a través de las cuales la corriente entra o sale del líquido o electrolito. (Sand, 2013).

2.2.3.4.4. Naturaleza del electrolito.

Los procesos electrolíticos de la metalurgia extractiva se pueden clasificar en dos categorías principales, de acuerdo a la naturaleza del electrolito utilizado:

Los que usan electrolitos acuosos, que se lleva acabo a temperatura que rara vez exceden los 60 °C, como es el caso del proceso de EW y de ER de cobre, zinc, níquel, cobalto, oro y plata.



Los que se realizan con electrolitos de sales fundidas (en medios no acuosos), que se desarrollan a temperaturas bastante más altas como es el caso de la recuperación de aluminio, magnesio, litio y otros metales similares. (Domic, 2001).

2.2.3.5. Leyes de faraday.

La ley de Faraday constituye el principio fundamental de la electrólisis. Con la ecuación de esta ley se puede calcular la cantidad de metal que se ha corroído o depositado uniformemente sobre otro, mediante un proceso electroquímico durante cierto tiempo, y se expresa en los siguientes enunciados: (del Castillo, 2008).

“La cantidad de cualquier elemento (radical o grupo de elementos) liberada ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis, es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución”.

2.2.3.5.1. Primera ley de faraday.

La masa que se deposita o libera en un electrodo es directamente proporcional a la carga eléctrica que atraviesa la solución. (Salcedo, 1987).

$$W = KQ$$

W = Masa depositada o liberada

K = Constante de proporcionalidad

Q = Carga eléctrica

2.2.3.5.2. Segunda ley de faraday.

Para una misma cantidad de electricidad, la masa de diferentes sustancias liberadas o depositadas son proporcionales a sus masas equivalentes.

Podemos expresar esta ley indicando que en cada electrodo se deposita o libera el mismo número de equivalentes gramo. (Salcedo, 1987).

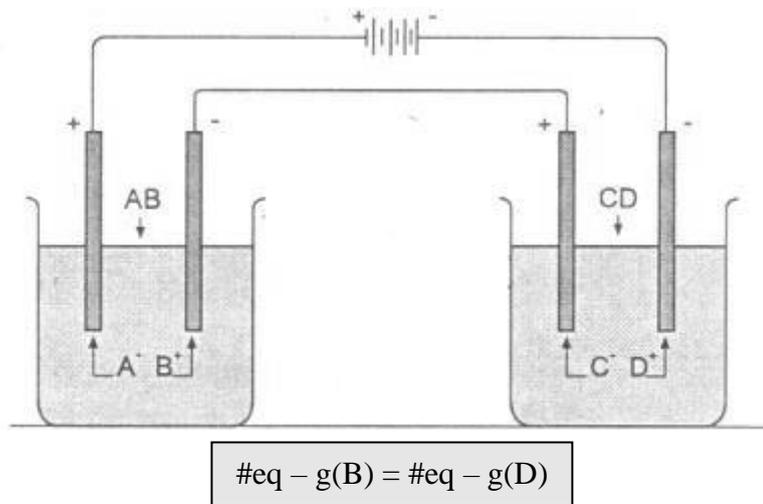


Figura 4: La segunda ley de faraday
Fuente: Salcedo (1987).

De estas dos leyes de faraday se indican dos definiciones básicas.

- **Equivalente electroquímico (Eq-Eq).**

Es la cantidad de sustancia que se deposita en el electrodo al paso de 1 coulomb (1C). (Salcedo, 1987).

$$1 \text{ eq} - \text{eq}(x) = \frac{W(x)}{Q}$$

- **Equivalente gramo (Eq-g).**

Es la cantidad de sustancia que se deposita en el electrodo debido al paso de 96500 coulomb (96500 C) o de 1 faraday (1F). (Salcedo, 1987).

$$1 \text{ eq} - g(x) = 96500 \text{ eq} - \text{eq}$$

Si se quiere determinar la masa que se deposita o libera en el electrodo utilizaremos la ecuación:

Donde:

$$W = \frac{I * t * PM}{F * n}$$



W : Peso del metal depositado, expresado en g.

I : Intensidad de corriente aplicada, expresada en A.

t : Tiempo en el cual se aplicó la corriente, expresado en s.

PM : Peso molecular de la sustancia que se está depositando g/mol.

n : Estado de valencia de la sustancia que se deposita, a dimensional.

F = constante de faraday = 96500 A*s/mol

2.2.3.6. Eficiencia de corriente.

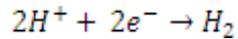
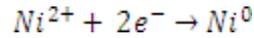
Las relaciones suponen la totalidad de la eficiencia en el uso de la corriente. Sin embargo, de la práctica se sabe que esta situación es ideal, y que es normal que un porcentaje de electrones se derive ya sea a la deposición de algunas otras sustancias o a la descomposición de agua y consecuente desprendimiento de gas hidrógeno, o bien que una fracción del metal depositado se re disuelva químicamente o se pierda de alguna otra, manera.

La eficiencia de corriente, es el peso de material efectivamente depositado versus el que teóricamente debía haberse precipitado. (Domic, 2001).

$$\text{Eficiencia de Corriente (\%)} = \frac{\text{masa real depositada}}{\text{masa teorica depositada}} * 100$$

- Las causas que provocan este rendimiento son:

Reacción de electrodo simultaneo: por ejemplo, en la deposición eléctrica del níquel que es un metal más electronegativo que el hidrógeno en la serie electroquímica de los metales, se produce la reacción simultanea de desprendimiento de gas hidrógeno, que también consumen corriente y que no se usa en níquel eléctrico. (Domic, 2001)



Interacción de productos anódicos y catódicos: Desde el momento que se realiza una electrolisis, en el ánodo se han producido reacciones del tipo reductor y en cátodo otro del tipo oxidante. Si por alguna razón existe interacción entre los productos de electrodo, obviamente que entre ellos reaccionara químicamente, disminuyendo la eficiencia del proceso. (Domic, 2001)

Reversibilidad eléctrica del proceso de electrodo: Si el producto de un electrodo en una celda difunde hacia el otro electrodo, puede ser parcial o total retornado a su condición original. Es decir, un producto anódico oxidado, si alcanza a llegar al cátodo, será inmediatamente reducido y viceversa. (Domic, 2001).

Interacción de componentes del ánodo con el electrolito: los ánodos de cobre usados para refinación (ER) suelen contener pequeñas porciones de Cu_2O . Este óxido se disuelve químicamente en el electrolito, y luego se deposita eléctricamente en el cátodo, llevando la eficiencia de corriente por encima de 100 %. (Domic, 2001).

2.2.3.6. Requerimientos energéticos.

Los requerimientos de energía para una operación de EW son importantes. (Chang, 2006).

$$Energia = \frac{1}{n} * \frac{(amperaje * segundo) * voltios}{3600 segundos} = (Wh)$$



- Voltaje de descomposición.

Para que una reacción electroquímica proceda bastaría con aplicar una fuerza electromotriz, FEM, equivalente a la suma de los voltajes requeridos por los ánodos y cátodos, respectivamente.

Este voltaje está relacionado con el voltaje de la celda o voltaje teórico mínimo necesario para electrolizar un electrolito dado.

En principio, tan pronto se alcanza este voltaje entre un ánodo y un cátodo tiene lugar la electrolisis. (Domic, 2001).

2.2.3.6.1. Medidores eléctricos.

- Amperímetro (A).

Se emplea para medir la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor o una resistencia. El amperímetro es conectado en serie y por ello se diseña con la menor resistencia posible. Cuando se dice que el amperímetro es ideal se considera que la resistencia interna es cero. La lectura del amperímetro es la intensidad (I).

- Voltímetro (V).

Se emplea para medir la diferencia de potenciales entre dos bordes del circuito y de una resistencia. Se conecta en paralelo y por ello se diseña con la mayor resistencia posible.

Voltímetros ideales: es aquella cuya resistencia interna es considerada infinita tal que por el voltímetro no pasa corriente.

Voltímetro real: es aquel cuya resistencia interna no es infinita, pero si es grande tal que por el voltímetro la corriente circulante es muy pequeña.



2.2.3.7. Reacción química.

Una reacción química es un proceso mediante el cual una o más sustancias (elementos o compuestos) denominadas reactivos, sufren una transformación para dar lugar a sustancias diferentes denominadas productos.

Las reacciones químicas conllevan generalmente la ruptura de los enlaces químicos de los reactivos y la formación de nuevos enlaces para obtener los productos. La ruptura de enlaces precisa generalmente la aportación de una cierta cantidad de energía, mientras que la formación de enlaces la libera; el resultado neto de dichos intercambios de energía puede ser positivo en cuyo caso la reacción es exotérmica (desprende calor) o negativo cuando la reacción es endotérmica (precisa la aportación de calor para producirse).

En algunos casos, para que la reacción comience, es necesaria la aportación de una cierta energía inicial que se denomina energía de activación, cuando ello no es necesario, y la reacción entre los productos comienza por sí sola a temperatura y presión ambiental, la reacción se denomina espontánea. Estos intercambios de calor son objeto de estudio de la termoquímica.

2.2.3.8. Reacción electroquímica.

Una reacción electroquímica la podemos definir como una reacción redox en la que el intercambio de electrones tiene lugar en un electrodo. El cambio químico es producido por el intercambio de electrones realizado entre un electrodo y un aceptor o donador de electrones en una disolución.

Se diferencia de una reacción química redox en que el donador o aceptor de electrones, es el electrodo (al que se comunica un potencial eléctrico) donde se realiza la



transferencia electroquímica, cambiando de un medio homogéneo (reacción química) a un medio heterogéneo (reacción electroquímica).

b. Beneficios purificación y electrodeposición:

- Es un proceso más rápido se realiza en horas.
- El producto que se obtiene es de mejor calidad alcanzando el 99,599 % de pureza del cobre en los cátodos.
- En el proceso se requiere menor mano de obra.
- Es un proceso más limpio, ya que la solución ácida que se produce después del proceso se puede llegar a recircular.

c. Parámetros de operación de un proceso de electrodeposición.

En un proceso de electrodeposición, cualquiera que sea el metal a depositar electrolíticamente deberá tenerse en cuenta los principales parámetros tales como:

2.2.3.9. La densidad de corriente.

Es la corriente medida sobre una superficie predeterminada, y es normalmente expresada en amperes/dm². Este dato es importante, ya que en función de la superficie de la pieza a electro depositar, se sabrá qué valor de corriente deberá aplicarse, en función al baño electrolítico del que se trate. Mediante estos datos, se puede obtener recurriendo a una tabla, información respecto a peso de la capa depositada y tiempo necesario para obtener un determinado depósito. (Panchi, 2009).

Todos estos cambios son consistentes con el hecho de que cuando se incrementa la densidad de corriente, la concentración de la solución disminuye, en tanto que la polarización aumenta. La densidad de corriente límite en una solución dada ha sido



empleada para calcular la composición y el espesor de la película catódica y viceversa. (Rivera & Ybañez, 2016).

$$i = I/A \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

i = Densidad de corriente, m^2/A

I = Corriente eléctrica, A

A = Área de la superficie, m^2

La densidad de corriente es esencial en la obtención de depósitos electrolíticos brillantes. Un aumento de la densidad de corriente, provoca un mayor brillo del depósito obtenido. Sin embargo, existe un máximo para esta densidad de corriente llamada corriente límite, la cual se llega a establecer después de varias pruebas de una cuba en especial, cuyos datos serán aplicables únicamente para esa cuba. (Panchi, 2009)

2.2.3.9.1. Depositación del metal.

La cinética de depositación de metales, de acuerdo a las leyes de Faraday, depende solamente de la corriente aplicada y no de otros factores tales como temperatura, concentración, u otros. Sin embargo, la calidad del depósito del metal está relacionada directamente con estos factores. Los depósitos eléctricos de metales son siempre cristalinos, pero pueden variar desde un depósito adherente, grueso, de granos grandes, hasta un depósito pulvurulento, de granos finos y poco adheridos. La forma del depósito depende de muchos factores. (Domic, 2001).

2.2.3.9.2. Agitación.

La agitación de la solución produce un suministro fresco de sales o de iones metálicos al cátodo reduciendo el espesor de la película catódica y facilitando así el



abastecimiento de iones metálicos a la superficie catódica. También permite remover parcialmente las burbujas de hidrógeno que se forman en la superficie catódica, mejorando las condiciones para operar con altas densidades de corriente. La agitación disminuye la polarización y puede reducir la potencia del depósito. (Rivera & Ybañez, 2016).

2.2.3.9.3. Temperatura.

Un incremento de la temperatura produce un aumento del tamaño de los cristales. Así también a temperaturas altas y densidades de corriente alta se producen depósitos tersos y de grano fino. La densidad de corriente elevada contrarresta el efecto de la temperatura alta. La influencia de la temperatura produce una solubilidad mayor y una disociación mayor de la sal metálica, lo que a su vez proporciona una conductividad más alta de la solución. Una alta temperatura incrementa la movilidad de los iones metálicos y disminuye la viscosidad de la solución y también aumenta la conductividad de la película líquida junto al cátodo.

2.2.3.9.4. pH.

El pH de una disolución se puede medir experimentalmente usando indicadores coloreados o bien mediante un medidor electrónico (pH metro) que proporciona una medida más precisa. En esta práctica vamos a usar dos indicadores, uno que cambia de color en la zona ácida (naranja de metilo) y otro que lo hace en la alcalina (fenolftaleína). La zona de cambio de color o zona de viraje depende del valor de la constante de acidez del indicador. Con un pH-metro mediremos de forma más exacta la concentración de protones de las soluciones. En esta práctica vamos a estudiar el comportamiento de diferentes disoluciones reguladoras frente a la adición de cantidades moderadas de ácidos y bases fuertes empleando como sistema de referencia el agua



destilada. Mediremos el pH de cada disolución y observaremos las diferencias entre lo estimado con los indicadores y lo realmente medido con el pH-metro. Compararemos estos valores con los calculados para cada caso empleando la ecuación de Henderson-Hasselbalch. (Peinado & Meléndez, 2017).

2.2.3.9.5. Rectificador de corriente.

Transforma la corriente alterna a corriente continua y normalmente se compone de:

a) Un transformador principal de corriente, que transforma la corriente eléctrica alterna de 110, 220 o 380 voltios de tensión en corriente alterna de baja tensión, 4, 6, 8, 12, ... voltios.

b) Células rectificadoras, que tienen por misión transformar la corriente alterna a baja tensión regulada, en corriente continua a baja tensión regulada. La calidad de la corriente continua dependerá del diseño del rectificador.

c) Los aparatos de medida: amperímetro y voltímetro. Es importante que estos elementos tengan una amplia escala de lectura, y una precisión tal que nos de seguridad de los datos obtenidos.

d) Los dispositivos de mando y protección. El mando se efectuará por medio de un botón pulsador de mando, que por intermedio de un fusible permita a la corriente eléctrica llegar al transformador.

e) Las pletinas y cableado.

Todos estos elementos deben estar correctamente aislados y conectados. (Panchi, 2009).

2.2.3.10. Tiempo (minutos).

El efecto de esta variable está relacionado principalmente con la densidad de



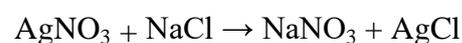
corriente, determina a que una solución por cuanto tiempo sea tratado para una concentración buena.

2.2.3.11. Refinación de plata.

La cementación de un metal a partir de una solución, depende de una reacción de desplazamiento en la cual un metal menos noble reduce a los iones del metal por precipitar al estado metálico. Entonces, éste sale de la solución, y los iones del metal menos noble entran en la solución para substituirlos.

El metal utilizado debe tener un potencial de electrodo inferior al potencial del metal que se desea precipitar. La reacción se produce a la superficie del metal, que se agrega a la solución impura. Para alcanzar velocidades de reacción aceptables con impurezas que se encuentran en bajas concentraciones, se tiene que agregar un exceso de metal, lo que conduce a la obtención de cementos impuros. Además, estos cementos contienen todos los metales de potencial superior al metal agregado.

La separación de la plata a partir de la solución acuosa que contiene el nitrato de plata proveniente del proceso de refinación de oro con ácido nítrico se logra precipitándola como cloruro de plata, mediante la adición de cloruro de sodio o cobre metálico; La reacción correspondiente es la siguiente:



El cloruro de plata es reducido a plata metálica en un medio ácido (una solución de H_2SO_4 al 10%) y con la adición de aluminio, cobre, hierro o zinc.

Frecuentemente, se usa el zinc, este es empleado en forma de viruta o en polvo, a fin de facilitar la disolución inmediata sin dar lugar a la oxidación. La reacción fundamental que tiene lugar es la siguiente:

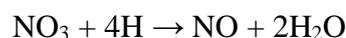


La plata generada es lavada para eliminar la acidez, a la que se retiran los residuos de otros metales disueltos (hierro, zinc), luego se filtra, se seca y se funde. (Ortega & Valdivia, 2014).

2.2.3.11.1. El ácido nítrico

El ácido nítrico es un ácido fuerte, corrosivo y de vapores sofocantes; su forma común en la naturaleza corresponde a sales del tipo $(\text{X}(\text{NO}_3)_n)$ y no a su forma ácida debido a la alta reactividad que exhibe frente a muchas sustancias. es un líquido incoloro o amarillento, pero puede llegar a tomar coloraciones rojizas si contiene suficiente cantidad de dióxido de nitrógeno disuelto. posee un olor irritante muy fuerte en concentraciones altas. es completamente soluble en el agua formando un azeótropo a 69,2% de contenido de ácido. el ácido nítrico se descompone por el calentamiento formando agua, oxígeno y dióxido de nitrógeno; este comportamiento hace difícil la determinación de muchas de sus propiedades a temperaturas arriba de los 50 °C. Se descompone también en presencia de alcoholes.

El ácido nítrico concentrado es un agente oxidante muy fuerte y ataca metales nobles como el cobre y la plata, aunque no el oro y ni el platino; no obstante, estas propiedades oxidantes desaparecen cuando se encuentra en forma diluida. De esta manera, el ácido nítrico interviene de dos formas diferentes en las reacciones dependiendo de su concentración: La primera de las semirreacciones corresponde a su forma concentrada y la segunda a la diluida.





Este ácido reacciona con metales de carácter básico liberando hidrógeno y dando lugar al correspondiente nitrato del metal; si los metales se encuentran en forma de polvo, la reacción se desarrolla con un violento desprendimiento de energía generando por lo regular explosiones. El ácido nítrico no ataca metales nobles como el oro, pero éste se puede disolver en una mezcla de tres partes de ácido nítrico concentrado y una de ácido clorhídrico concentrado conocida como agua regia. Cuando el ácido nítrico ataca metales como el aluminio y el cromo, se genera en la superficie de estos metales una capa de óxido que les impide seguir siendo atacados y los protege contra ataques posteriores de químicos de otra naturaleza, este fenómeno se conoce como pasivación (Elvers, 1989).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.

La investigación se realiza en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, en el laboratorio de Electrometalurgia, de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, ubicado en el distrito de Puno, provincia de Puno, región Puno.

Coordenadas geográficas de Puno, Perú, en grados decimales:

- Longitud: -70.0199000.
- Latitud: -15.8422000.

Coordenadas geográficas de Puno, Perú, en grados y minutos decimales:

- Longitud: 070° 1' 11.64".
- Latitud: S15° 50' 31.92".

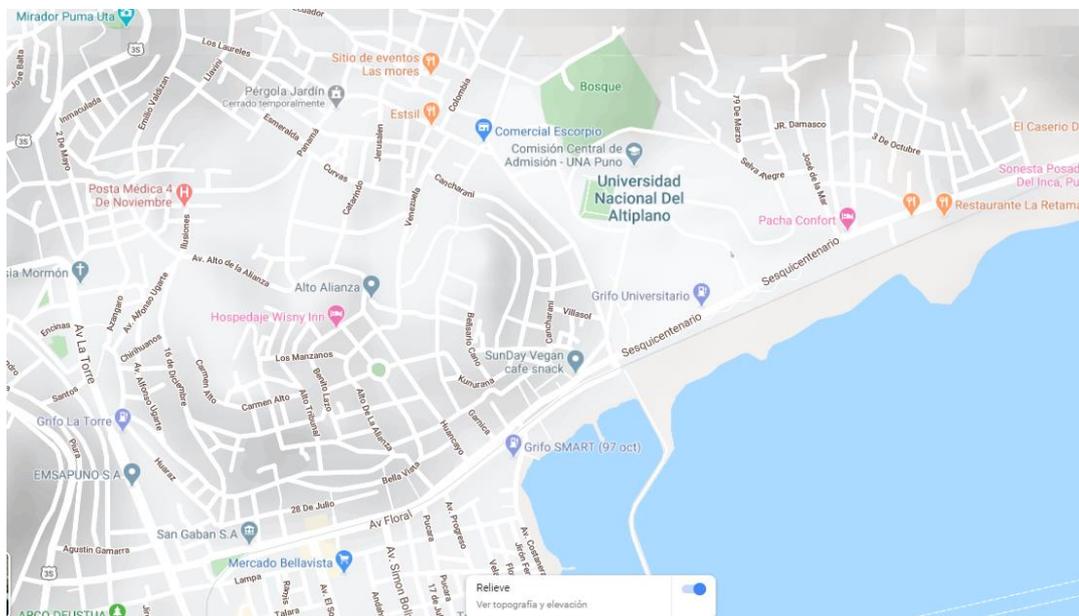


Figura 5: Mapa urbanístico de la ciudad de Puno.
Fuente: [Maps Google.com/maps/place/Puno](https://maps.google.com/maps/place/Puno).



3.2. PROCEDENCIA DEL MATERIAL UTILIZADO.

Equipos:

- Fuente de corriente continua
- Celda de electrodeposición
- Ánodos
- Cátodos
- Voltímetro
- Amperímetro
- Balanza
- Cocina
- Laptops

Materiales:

- Vasos de vidrio
- Lana de acero
- Ácido nítrico
- Ácido clorhídrico
- Cloruro de sodio
- Agua destilada
- Polvo de zinc
- Cuaderno de apuntes
- Lapiceros y/o Lápiz
- Memoria USB

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.

En la presente investigación experimental se considera población y muestra, los parámetros de la densidad de corriente y el efecto del tiempo en la celda de



electrodeposición, para una mejor concentración en la lana de acero y refinación con reactivos para la obtención de plata refinada.

Población:

20 litros de solución lixiviada de minerales de plata.

Muestra:

5 litros de solución lixiviada para realizar las pruebas de electrodeposición.

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.

Es una investigación de enfoque cuantitativa – experimental, aplicado a nivel de laboratorio. Tomamos en cuenta a uno de los autores más reconocidos de la Metodología de la Investigación Cuantitativa – Cualitativa y Redacción de la Tesis, quien señala lo siguiente; “es un nivel de la investigación científica, el más alto y el más complejo porque utiliza el experimento como método o técnica de investigación. El experimento es el método o técnica de investigación más refinado para recabar datos y verificar hipótesis. Se dice que es refinado porque utiliza sofisticadas técnicas que se basan en la matemática, en la estadística y en la lógica, como las técnicas estadísticas que se utilizan en el control de variables y en la medición de las diferencias estadísticas de los resultados” (Ñaupá, Mejía, Novoa, & Villagómez, 2013).

3.4.1. Tipo de diseño de investigación experimental puro.

Son los que reúnen las características control aleatorizada, manipulación, observación medición. (Ñaupá, Mejía, Novoa, & Villagómez, 2013).

3.5. VARIABLES.

Variable independiente.

Electrodeposición de soluciones cianuradas.

Variable dependiente.

Plata refinada.

3.6. PROCEDIMIENTO.

La ejecución el proyecto se inicia con la inspección e instalación de equipos, bajo las condiciones de seguridad.

3.6.1. Soluciones cianuradas.

La solución cianurada es obtenida a través de una lixiviación de minerales de plata, considerando los siguientes parámetros de operación fuerzas de cianuro (cianuro libre) de 1000 ppm a 1200 ppm, y con pH - 12, en una temperatura de 17 °C a 18°C.

Se utilizó 5 litros de solución lixiviada (solución rica de plata), con esto realizamos las corridas de pruebas en el laboratorio de Electrometalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.



Figura 6: Solución cianurada.
Fuente: Toma de imagen propio.

3.6.2. Cátodo.

Pieza en el que fue depositado la plata, se tomó en cuenta lo siguiente:

Limpieza

Se realizó correctamente la limpieza y se preparó los cátodos que se han utilizado en las pruebas de electrodeposición.

Se utilizó de cátodo una plancha de acero inoxidable para que nos facilite con los cálculos, de la misma forma para no tener problemas con el corto circuito que se puede producir utilizando la lana de acero, la medida del cátodo es $100\text{ cm}^2 = 1\text{ dm}^2$.

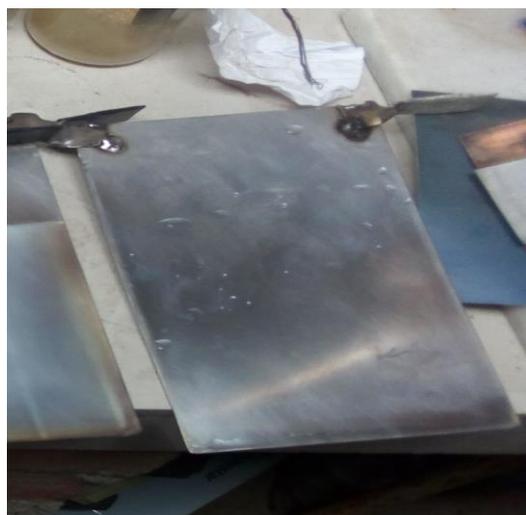


Figura 7: Cátodo

Fuente: Toma de imagen propio.

3.6.3. Ánodo.

El ánodo empleado para el experimento es de acero inoxidable, con medida $100\text{ cm}^2 = 1\text{ dm}^2$.



Figura 8: Ánodo

Fuente: Toma de imagen propio.

3.6.4. Cuba o celda de electrodeposición.

Las cubas utilizadas son de PVC, ya que, para las pruebas experimentales, resulta muy adecuado por su resistencia y además permite con mayor facilidad al proceso. Las medidas de las cubas son: 12,5 x 12,5 x 15,5 cm., que es la medida de las cubas encontradas en el mercado, que se adaptan perfectamente para el experimento.

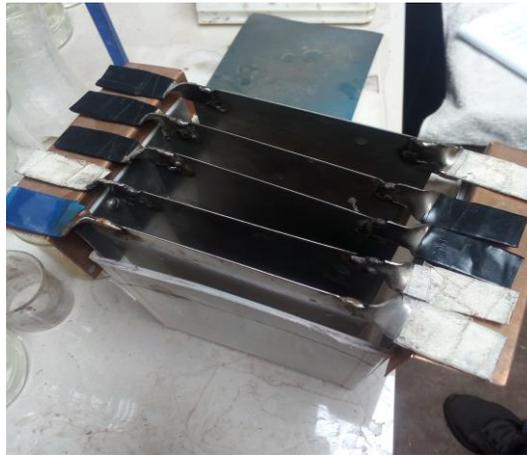


Figura 9: Cuba o celda de electrodeposición
Fuente: Toma de imagen propio.

3.6.5. Rectificador de corriente.

La fuente es alimentada con 220V y 60 Hz, el rectificador se encarga de transformar la corriente a 0.4A a 3.2A, el mismo que es el amperaje adecuado para el desarrollo de nuestro experimento y con la que se alimentará a la cuba para las diferentes pruebas.



Figura 10: Rectificador de corriente.
Fuente: Toma de imagen propio.

3.6.6. Agitación.

Facilita la difusión de los iones de la plata a través de la película catódica utilizando altas densidades de corriente sin que perturbe el aspecto exterior del depósito, la agitación para la recuperación es relativa al movimiento rotatorio, horizontal o vertical de cátodo, la idea de la agitación es mantener la homogeneidad de la solución para tener o ayudar en la concentración de iones de plata en el cátodo.

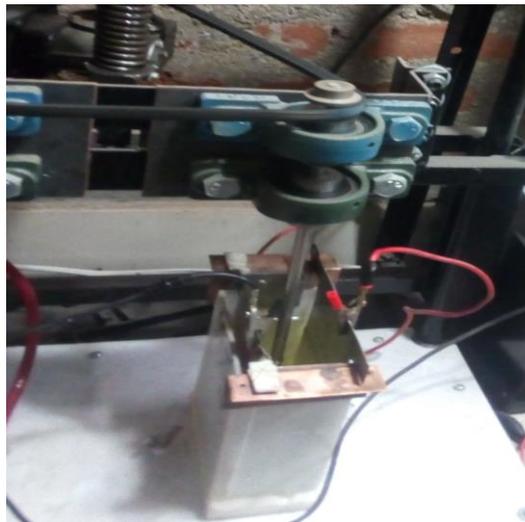


Figura 11: Agitador.
Fuente: Toma de imagen propio.

Al término de la preparación de los cátodos, ánodos y cuba, se inicia a desarrollar las pruebas de los experimentos:

3.7. DENSIDAD DE CORRIENTE.

Se desarrolla 05 pruebas de experimentos, para cada prueba de experimento se considera un tiempo de 40 minutos.



Tabla 5
Distribución de densidad de corriente A/dm²

Número de pruebas	Densidad de corriente (A/dm ²)
Prueba 06 densidad	0.4
Prueba 07 densidad	0.8
Prueba 08 densidad	1.4
Prueba 09 densidad	2.2
Prueba 10 densidad	3.2

FUENTE: Elaboración propia.

3.8. TIEMPO.

Se desarrolla 05 pruebas de experimentos, para cada prueba de experimento se considera una densidad de corriente 0.6 A/dm².

Tabla 6
Distribución de tiempo (Minutos)

Número de pruebas	Tiempo (minutos)
Prueba 01 tiempo	10
Prueba 02 tiempo	40
Prueba 03 tiempo	70
Prueba 04 tiempo	100
Prueba 05 tiempo	130

FUENTE: Elaboración propia.

3.9. REFINACIÓN DE PLATA.

Una vez obtenido la lana de acero de la electrodeposición que contiene plata y otros metales, el material es colocado en un vaso precipitado, adicionando suficiente cantidad de ácido nítrico concentrado, de tal manera que cubra el material. Colocar el recipiente en una cocina eléctrica para que caliente y se produzca una reacción atacando el ácido nítrico a la plata.



Figura 12: Reacción de lana de acero
Fuente: Toma de imagen propio.

Una vez terminado el ataque químico, se procede a realizar el filtrado de la solución rica en plata (Ag), teniendo una solución cristalina se le adicionó sal común para precipitar la plata, observándose inmediatamente la formación de un precipitado blanquecino, esto se debe a la reacción química producida y se formaron unos polvos espesos y blancos de cloruro de plata, se continuó añadiendo sal común a la solución hasta que ya no se forme más precipitado (reacción).

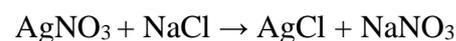
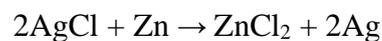




Figura 13: Precipitación con cloruro de plata

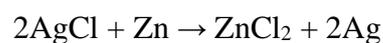
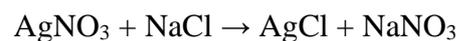
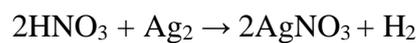
Fuente: Toma de imagen propio.

Una vez culminado el experimento, la precipitación obtenida es de color blanco, se decanta la solución luego se realizó el lavado con abundante agua potable hasta obtener un pH neutro. Alcanzada la neutralización se le adiciona el polvo de zinc, produciéndose la metalización de Ag.



La adición de polvo Zn se realizó con agitación continua y se detiene cuando ya no queda partículas blancas, el mismo que toma una coloración gris. El aumento de plata tomado es lavado con abundante agua, luego es secado y fundido con los fundentes respectivos. La fundición del lingote de plata es 99.565% pureza.

Reacciones químicas de la plata recuperada del proceso de refinación:





CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de análisis de soluciones cianuradas de plata, obtenidas durante la ejecución de pruebas de los experimentos, controlando los parámetros de la densidad de corriente (A/dm^2), tiempo para la recuperación de plata por electrodeposición y su posterior refinación de plata. Los resultados de análisis, fue emitido por el Laboratorio Analíticos del Sur, por método de ensayo para plata por Absorción Atómica. De la misma forma, los resultados y el análisis de la pureza de plata refinada, fue emitido y certificado por la empresa Minera Confianza SAC.

Tabla 7
Resultados del parámetro tiempo

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Descripción de Muestra	Resultado Ag (mg/L)
SS20000331	prueba 01 tiempo	Solución de Cianuro	45.4
SS20000332	prueba 02 tiempo	Solución de Cianuro	28.2
SS20000333	prueba 03 tiempo	Solución de Cianuro	13.1
SS20000334	prueba 04 tiempo	Solución de Cianuro	8.2
SS20000335	prueba 05 tiempo	Solución de Cianuro	4.3

FUENTE: Laboratorio Analíticos del Sur.



Tabla 8
Resultados del parámetro densidad de corriente

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Descripción de Muestra	Resultado Ag (mg/L)
SS20000336	Prueba 06 Densidad	Solución de Cianuro	39.3
SS20000337	Prueba 07 Densidad	Solución de Cianuro	31.4
SS20000338	Prueba 08 Densidad	Solución de Cianuro	22.8
SS20000339	Prueba 09 Densidad	Solución de Cianuro	13.7
SS20000340	Prueba 10 Densidad	Solución de Cianuro	3.5

FUENTE: Laboratorio Analíticos del Sur.

Tabla 9
Resultados de Ley de cabeza

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Descripción de Muestra	Resultado Ag (mg/L)
SS20000341	Prueba 11 Densidad	Solución de Cianuro	54.5

FUENTE: Laboratorio Analíticos del Sur.

Tabla 10
Resultados de porcentaje de plata (Ag).

ITEM	Código	% Ag	Método de Ensayo
1	R-1/J	99.565%	MC – LQM – ME-06

FUENTE: Laboratorio Químico Metalúrgico Minera Confianza SAC.



4.1. Evaluar cómo influye la densidad de corriente en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata.

Se realizó la evaluación de la densidad de corriente para cada uno de los experimentos con un tiempo de 40 minutos.

Tabla 11
Densidad de corriente

Número de Experimentos	Densidad de Corriente (A/dm ²)	Resultado Ag (mg/L) Laboratorio	Recuperación Ag (mg)	Porcentaje de Recuperación (%)
1	0.4	39.3	15.2	27.88
2	0.8	31.4	23.1	42.38
3	1.4	22.8	31.7	58.16
4	2.2	13.7	40.8	74.86
5	3.2	3.5	51.0	93.57

FUENTE: Elaboración propia.

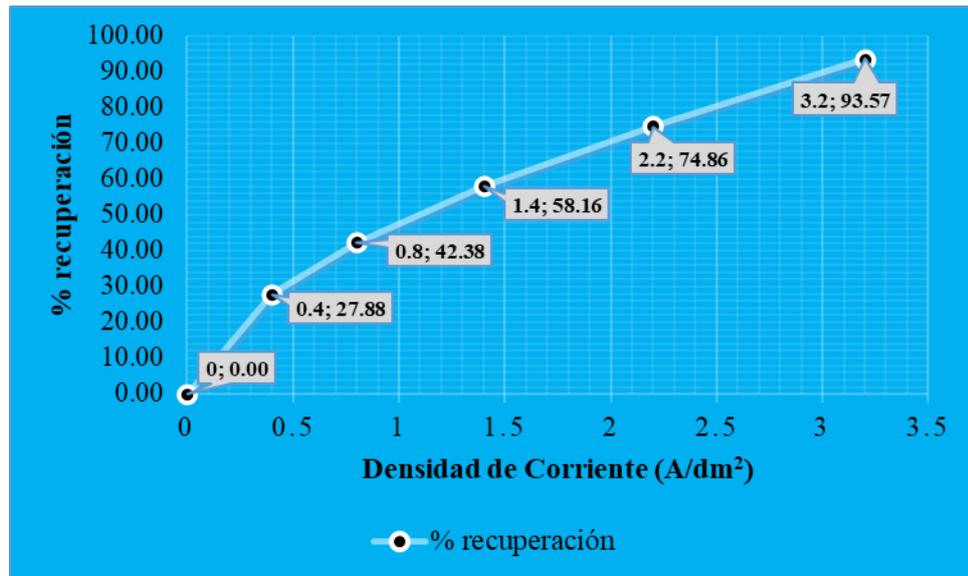


Figura 14: Densidad de corriente (A/dm²).

Fuente: Elaboración Propia.

Interpretación

En la tabla 11 y figura 14, se presenta los resultados obtenidos sobre la evaluación de cómo influye la densidad de corriente en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno y se obtiene que a un 0.4 A/dm², se obtuvo 27.88% de recuperación; a un 0.8 A/dm², se obtuvo 42.38% de recuperación; a un 1.4 A/dm², se obtuvo 58.16% de recuperación; 2.2 A/dm², se obtuvo 74.86% de recuperación; 3.2 A/dm², se obtuvo 93.57% de recuperación. Entonces de acuerdo a los resultados obtenidos, el porcentaje de recuperación óptimo con la densidad de corriente es de 3.2 A/dm², en un tiempo de 40 minutos.

Chamorro y Jimenez (2011), relata que en la electrodeposición se trabaja con 1 litro del electrolito 11 de pH para mejorar la conductividad eléctrica y a un voltaje constante de 2,5 V, variando el número de cátodos y ánodos para encontrar una mejor densidad catódica. Determinando así los parámetros operativos óptimos para la electrodeposición a una densidad catódica de 141,34 A/m² (1,4 A/dm²), con un tiempo de 2 horas en

donde se ve que la deposición del metal es mayor, logrando alcanzar 10,690 g de plata en comparación a los demás parámetros establecidos.

Por lo tanto, decimos que 3.2 A/dm^2 es la densidad de corriente que logra un mayor porcentaje de recuperación.

4.2. Evaluar el efecto de tiempo en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata.

Se realizó la evaluación del tiempo para todos los experimentos para el porcentaje de recuperación de plata, con densidad de corriente 0.6 A/dm^2 .

Tabla 12
El efecto de tiempo

Número de Experimentos	Tiempo (minutos)	Resultado Ag (mg/L) Laboratorio	Recuperación Ag (mg)	Porcentaje de Recuperación (%)
1	10	45.4	9.1	16.69
2	40	28.2	26.3	48.27
3	70	13.1	41.4	75.96
4	100	8.2	46.3	84.95
5	130	4.3	50.2	92.11

FUENTE: Elaboración propia.

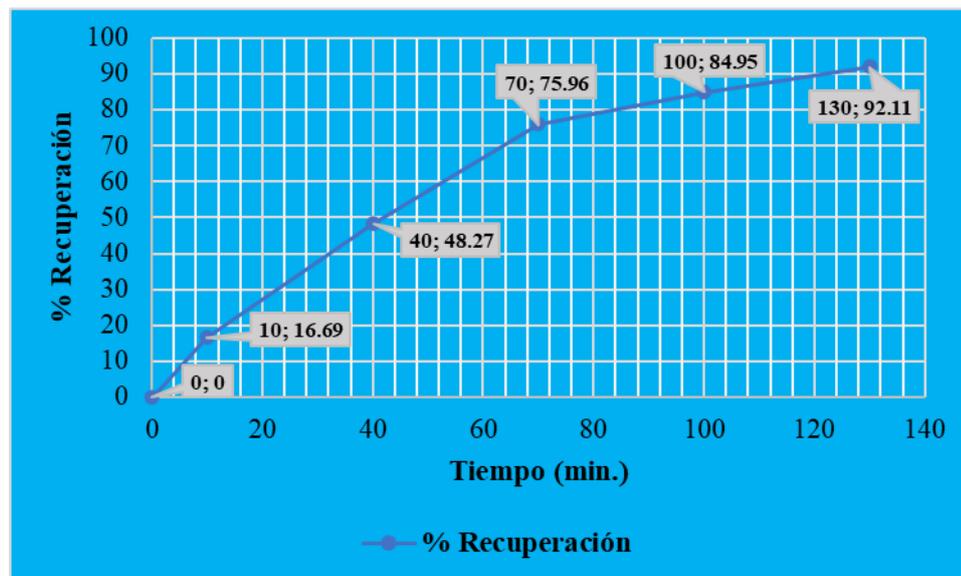


Figura 15: Tiempo (Min.).

Fuente: Elaboración propia.

Interpretación.

En la tabla 12 y figura 15 se presenta los resultados obtenidos sobre la evaluación del efecto de tiempo en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno, en el que en un tiempo de 10 minutos se obtuvo 16.69% de recuperación, en 40 minutos se obtuvo 48.27% de recuperación, 70 minutos se obtuvo 75.96% de recuperación, en 100 minutos se obtuvo 84.95% de recuperación, 130 minutos se obtuvo 92.11% de recuperación. Estos resultados, nos indica que el porcentaje mayor fue con tiempo de 130 minutos, con densidad de corriente 0.6 A/dm^2 .

Por lo tanto, se concluye que en 130 minutos se logra un mayor porcentaje de recuperación. El aumento en el tiempo de electrodeposición conduce a un aumento en la masa de plata electrodepositada.

4.3. Obtención de plata refinada.

Se obtiene el resultado de la pureza de la plata refinada por el laboratorio químico de Minera Confianza SAC.

Tabla 13
Obtención de la plata refinada

ITEM	Código	% Ag	Método de Ensayo
1	R-1/J	99.565%	MC – LQM – ME-06

FUENTE: Elaboración propia.

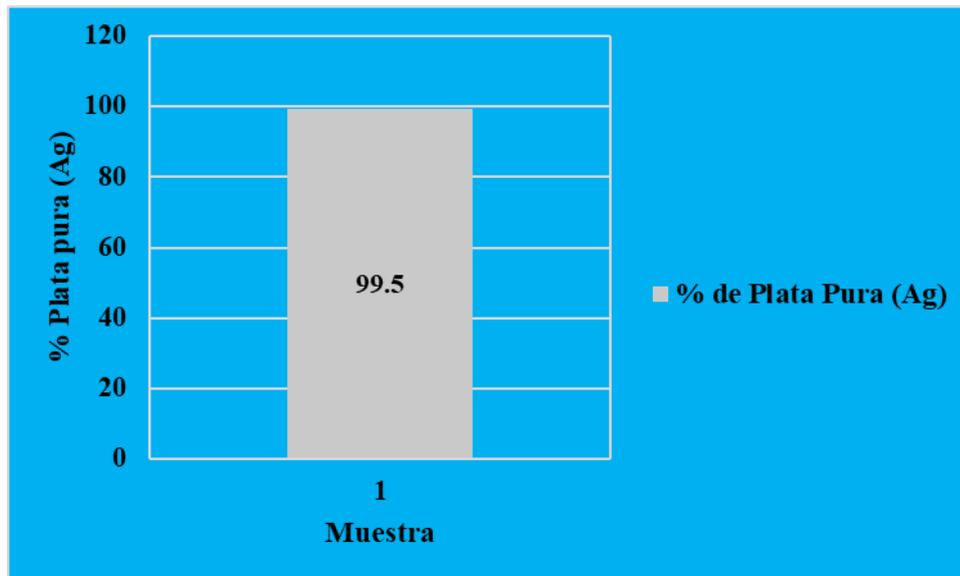


Figura 16: Plata refinada (Ag)
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 13 y figura 16 se presenta los resultados de la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno, se obtuvo utilizando los reactivos adecuados y cumpliendo los pasos de la refinación logrando como producto final una pureza de 96.565% de plata.



V. CONCLUSIONES.

Aplicando los parámetros para la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata, se logra un grado de pureza de 99.565% de plata.

La densidad de corriente en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno, a partir de 5 pruebas experimentales con densidad de corriente de 0.4 A/dm², 0.8 A/dm², 1.4 A/dm², 2.2 A/dm², 3.2 A/dm², por un tiempo de 40 minutos para cada uno de las pruebas experimentales, de las cuales con 3.2 A/dm² se alcanzó a un excelente porcentaje de recuperación 93.57%, en comparación a otras pruebas experimentales, es el más alto en el proceso de electrodeposición de plata.

El efecto de tiempo en la obtención de plata refinada a partir de electrodeposición de soluciones cianuradas de lixiviación de minerales de plata en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA – Puno, en 5 pruebas experimentales con tiempo de 10 minutos, 40 minutos, 70 minutos, 100 minutos, 130 minutos, con densidad de corriente 0.6 A/dm² para cada uno de las pruebas experimentales, se logra obtener un buen porcentaje de recuperación 92.11% con un tiempo de 130 minutos, el mismo que a comparación a otras pruebas experimentales es el más alto en el proceso de electrodeposición de plata.



VI. RECOMENDACIONES

Para las investigaciones futuras se recomienda controlar los parámetros y utilizar los reactivos adecuados en la refinación de plata, para lograr una mejor pureza del metal.

Es importante controlar la densidad de corriente para una buena y eficaz recuperación, reduciendo una inversión económica en los trabajos que se realiza y aumentando la producción en la electrodeposición de plata. También se recomienda trabajar con amperajes y parámetros adecuados, los mismos que nos ayudarán a lograr las metas que nos trazamos y para cada tipo de proceso.

En los futuros trabajos experimentales, se recomiendan a utilizar o variar el tiempo, para conseguir el porcentaje de recuperación, con el fin de evaluar varias alternativas y obtener la más acertada.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alejandro Ch., S. P. (2015). *Proceso de Recuperación de Oro a Partir de los Residuos Generados por la Joyería "Esmeralda"*. Quito: Universidad Central del Ecuador Facultad de Ingeniería Química.

Atkins, W., & Jones, L. (2006). *Principios de Química*. Argentina: Médica Panamericana S.A.

Barrientos R., C. (2003). *Evaluación de Dos Métodos de Recuperación y Refinación de los Metales Preciosos a Nivel Laboratorio a Partir de los Desperdicios con Alto Contenido de Oro*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Campo García, G. A. (2015). *Evaluación Física y Química del Efecto de un Campo Magnético en la Electrodeposición de Ni en Acero Bajo Carbono*. Veracruz: Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Química.

Chamorro Camasca, G., & Jimenez Ygnacio, R. (2011). *Purificación y Electrodeposición de Cobre a Partir del Lixiviado de la Empresa Ferroquímica S.R.L. para Obtener Cobre Electrolítico a Nivel Laboratorio*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Peru, Facultad de Ingeniería Química.

Chang, R. (2006). *Química general. 6 ed.* Mexico: McGraw-Hill. Interamericana.

Cruz Ortega, S. (2016). *Evaluación de los Parámetros para el Diseño y Construcción de una Celda de Electro Obtención para Recuperar Oro*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

del Castillo Rodríguez., F. D. (2008). *Principios de Electrodeposición*. Cuautitlán Izcalli: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería.

Domic Mihovilovic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia Fundamentos Procesos y Aplicaciones*. Chile: Instituto de Ingenieros de Minas .



Elvers B., H. S. (1989). *Ullmans Encyclopedia of Industrial Chemistry*. New York - U.S.A.: VCH.

Gómez Meza, V. J., & et al. (2005). *Electrodeposición Magnética en Materiales Conductores*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Imaz Molina, N. (2013). *Aplicación de Técnicas de Electrodeposición Mediante Pulsos de Corriente para la Obtención de Recubrimientos Metálicos*. Barcelona: Universitat de Barcelona.

Medina H., P., & Mejía S., M. T. (2016). Monografía de la Plata (Ag). *Servicio Geológico mexicano*, 5,6.

Mindiola Mirley, P. J., & Escalante , H. (2008). *Indice de Carga Contaminante para los Vertimientos Generados Durante el Proceso de Refinación Química de Oro en los Talleres de Joyería de Bucaramanga*. Medellín: Bucaramanga.

Navarro, Y. J., & Salermo, M. J. (1994). *Estudio Técnico Experimental de la Desorción del Carbón Activado Cargado de Oro*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Ñaupá Paitan, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagómez Paucar, A. (2013). *Metodología de la Investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. Lima: Ediciones U.

Ortega Cuadra, F. U., & Valdivia Gutiérrez, M. A. (2014). *Refinación de Oro por Disolución y Precipitación Selectiva a Nivel de Laboratorio en la Empresa Desminic S.A., Mina la Libertad, Chontales*. Nicaragua - Managua: Universidad Nacional de Ingeniería.

Panchi Villavicencio, V. F. (2009). *Estudio del Proceso de Electrodeposición de Metales sobre una Base Polimérica*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica.



Peinado Peinado, J., & Meléndez-Vald, F. T. (2017). Medida del pH. *Disoluciones Reguladoras Precipitación Isoeléctrica de la Caseína* , 1.

Ponce Sánchez, M. A. (2005). *Investigación omparativa de los Métodos Clásicos de Refinación de Oro en Eficiencia y Costos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Raymond Chang, W. C. (2002). *Química, Séptima Edición*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.

Rivera , B. I., & Ybañez, O. C. (2016). *Influencia de la Concentración del Ácido Cítrico y pH en la Lixiviación de Copelas Usadas, la Densidad de Corriente y Distancia de Electrodo en la Electrodeposición del Plomo Lixiviado*. Trujillo - Perú: Universidad Nacional de Trujillo.

Salcedo Lozano, A. (1987). *Química*. Perú: San Marcos.

Sánchez A., A. (2019). La plata. *Real Sociedad Española de Química*, 115.

Sand H., A. (2013). Electroquímica y análisis electroquímicos. *Teoría Iónica*, 2-3.

ANEXOS

ANEXO N° 01



Se observa los equipos que sean utilizado, para la ejecución de nuestro proyecto, que nos ayuda a evaluar los parámetros en electrodeposición de la plata.



Se observa el equipo de rectificador de corriente



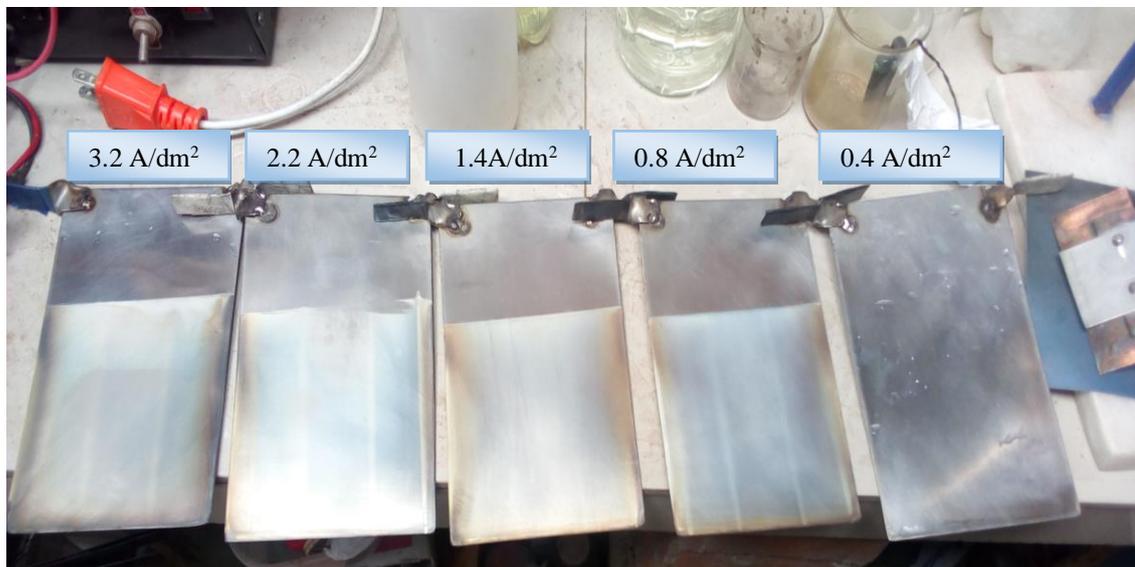
Se observa la celda de electrodeposición



Se observa el cátodo cargado de plata después de la electrodeposición



Se observa el ánodo.



Se observa los cátodos, después de realizar las pruebas experimentales.



Solución de plata (madre).



Muestra tomada después de realizar las pruebas experimentales para enviar a laboratorio para su análisis respectivo.



Ataque químico con ácido nítrico
a la lana de acero.



Filtrando la solución de plata
después del ataque químico.



Precipitación de plata (Ag) con
cloruro de sodio (sal común).



Secado de plata refina.



Producto final, plata (Ag) al
99.565%



ANEXO N° 02



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Tel: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-20-00068

Fecha de emisión: 05/02/2020

Página 1 de 1

Señores: JAVIER CALLOAPAZA CANAZA
Dirección: JR MARIANO H. CORNEJO 189 PUNO
Atención: JAVIER CALLOAPAZA CANAZA
Recepción: 05/02/2020
Realización: 05/02/2020
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

*902 Método de ensayo para Plata por Absorción Atómica en soluciones alcalinas lectura Directa

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*902 Ag mg/L
SS20000331	PRUEBA 01 TIEMPO	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	45.4
SS20000332	PRUEBA 02 TIEMPO	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	28.2
SS20000333	PRUEBA 03 TIEMPO	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	13.1
SS20000334	PRUEBA 04 TIEMPO	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.2
SS20000335	PRUEBA 05 TIEMPO	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.3
SS20000336	PRUEBA 06 DENSIDAD	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	39.3
SS20000337	PRUEBA 07 DENSIDAD	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	31.4
SS20000338	PRUEBA 08 DENSIDAD	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	22.8
SS20000339	PRUEBA 09 DENSIDAD	No proporcionado por el cliente.	Solución de Cianuro	13.7
SS20000340	PRUEBA 10 DENSIDAD	No proporcionado por el cliente.	Solución de Cianuro	3.5
SS20000341	PRUEBA 11 DENSIDAD	No proporcionado por el cliente.	Solución de Cianuro	54.5

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
Ingeniero Químico CIP 114426

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Nº 15010



CERTIFICADO DE ANALISIS

MC – LQM – 20.03.0008

CLIENTE : CALLOAPAZA CANAZA JAVIER
FECHA DE REPORTE : 25/03/2020
SOLICITUD DE ENSAYO : ANALISIS Ag

ITEM	CODIGO	% Ag	METODO DE ENSAYO
1	F- 03/ B1	96.565	MC – LQM – ME-06

MINERA CONFIANZA S.A.C.

Ing. Gerardo Lazo Balbin
JEFE DE LABORATORIO
C.I.R. 106170
Ing. Gerardo Lazo Balbin
JEFE DE CONTROL DE CALIDAD



ANEXO N° 03

REFINACIÓN DE PLATA (Ag)

