

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA

Facultad de Ciencias y Tecnología

Escuela de Química



“Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”

Trabajo de Grado

Presentado por:

Katherine Cruz Pérez

Anne S. Hernández Ferreira

Para optar por el título de:

Ingeniero Químico

Santo Domingo, Distrito Nacional

REPÚBLICA DOMINICANA

2021

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de salud, amor y maravillosas experiencias.

Gracias al señor Roberto Bonetti, por su apoyo incondicional a mi familia, por ser la columna fundamental en mi formación académica desde antes de mis estudios universitarios, por sus consejos y por creer y confiar en mi padre. Las palabras nunca serán suficientes para expresar lo agradecida que estoy.

A mis padres, Martha y César, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una debida educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. Sin el esfuerzo de ustedes y la preocupación sobre forjarme debidamente, nada de esto hubiese sido posible.

A mi hermana Sanely, por ser parte importante de mi vida y representar no solo la figura de hermana sino de madre, por siempre estar presente en los momentos más importantes y guiarme por el buen camino.

Le agradezco el apoyo y dedicación de tiempo a cada uno de mis profesores, en especial a la Ing. Doris Peña, gracias por la disposición en todo momento, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión. Dr. Ramón Sánchez, asesor de nuestro proyecto de investigación, quien nos ha guiado con su paciencia, gracias por sus consejos y apoyo.

Gracias Ingeniero Carlos Márquez, por creer en mí desde el inicio, por habernos brindado la oportunidad de desarrollar este trabajo de grado, por su dedicación y apoyo durante los últimos meses, por las nuevas experiencias que me ayudaron a crecer tanto en el ámbito profesional como en el ámbito personal.

A mis amigos, gracias por todos los momentos vividos, por estar ahí en las buenas y en las malas por haber hecho el papel de una verdadera amistad en todo momento, gracias por su apoyo y comprensión. Sobre todo, a Alejandra, Pamela, Fernando, Isaury y Jenny, sin ustedes el trayecto de mi carrera no hubiese sido igual.

A Anne, por haber sido no solo una excelente compañera de tesis, sino mi amiga incondicional, por haberme tenido la paciencia necesaria, aprender a sobrellevarme, apoyarme en todo momento y por motivarme a seguir adelante en los momentos de desesperación.

Katherine Cruz

Le doy gracias a Dios por haberme bendecido y guiado a lo largo de mi vida, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. Por haberme dado la oportunidad de culminar mis estudios brindándome la oportunidad de obtener un grado académico más en mi vida.

Gracias a mis padres, Edwin Hernández y Anne Ferreira por brindarme ayuda y confianza en el desarrollo de mi carrera, por su comprensión y apoyo incondicional en todo momento. Por dar todo de sí mismos para permitir que yo contara con una buena educación y así convertirme en profesional.

Agradezco a Mia Familia porque haberle dado luz a mis días oscuros durante mi carrera. Le doy gracias especialmente a mi tío Cesar, por ser uno de los pilares más importantes de mi carrera, no solo económicamente sino también motivacionalmente, por todos sus consejos y palabras de apoyo.

Gracias a mis amigos por haberme dado tantos días alegres, por haberme dado fuerzas para continuar cuando tenía dudas, por estar ahí para mí en las buenas y en las malas. Le doy gracias especiales a Alvyn, Winabel, Fernando, Isaury y Jenny, sin ustedes este camino no hubiese sido igual de divertido.

Le doy gracias a Katherine y Mayra, por ser más que unas excelentes compañeras, sino hermanas, por haberme dado apoyo, confianza y fuerzas cuando las necesitaba, por no dejarme caer cuando estaba al borde de abandonar, gracias a ambas por confiar en mí y no rendirse, gracias por soportar todos mis cambios de humor y motivarme a ser mi mejor versión de mí.

Gracias también al Ing. Carlos Márquez por su apoyo y permitimos desarrollar este trabajo de grado.

Por último, pero no menos importante, agradezco a la Universidad Pedro Henríquez Ureña por haberme permitido formarme en ella, gracias a todos mis profesores que fueron participes de este proceso, especialmente a la Ing. Doris Peña, directora de la Escuela de Química, y a nuestro asesor, Ing. Ramón Sánchez, por su orientación y compartir sus conocimientos para así culminar mis estudios universitarios.

Anne Hernández

ÍNDICE

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE	vii
INTRODUCCIÓN	ix
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
JUSTIFICACIÓN	14
OBJETIVOS	16
ALCANCE.....	18
PRIMERA PARTE	20
MARCO TEÓRICO.....	20
CAPÍTULO I ANTECEDENTES.....	21
I.1 Historia.....	22
I.2 Minería en República Dominicana.....	23
CAPÍTULO II PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	27
CAPÍTULO III METALES PRECIOSOS Y SUS CARACTERÍSTICAS	33
III.1 Oro.....	33
III.2 Plata	33
CAPÍTULO IV AGENTES OXIDANTES.....	35
IV.1 Bórax	35
IV.2 Sílice.....	35
IV.3 Nitrato de sodio	36
IV.4 Carbonato de sodio.....	36
CAPÍTULO V CARÁCTERÍSTICAS DE LOS CRISOLES.....	37
V.1 Crisol de grafito	38
SEGUNDA PARTE.....	40
MARCO METODOLÓGICO.....	40
CAPÍTULO VI METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN	41
VI.1 Porcentaje de cobre en el precipitado húmedo	41
VI.2 Inclusión del agente de oxidante en el proceso	42
VI.3 Elección del agente oxidante.....	44

VI.4 Reacciones y mezclado	44
VI.5 Estimación del impacto económico.....	45
VI.6 Procedimiento.....	45
TERCERA PARTE.....	49
CÁLCULOS Y RESULTADOS.....	49
CAPÍTULO VII CÁLCULOS	50
VII.1 Cobre presente en el precipitado húmedo	50
VII.2 CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS.....	51
CAPÍTULO VIII RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
VIII.1 Porcentajes de cobre en cada prueba	53
VIII.2 Recuperación de Au, Ag y Cu en %.....	53
VIII.3 Impacto económico.....	59
VIII.4 Análisis de resultados	61
VIII.5 Impacto económico y remediación ambiental	63
CUARTA PARTE	64
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
CAPÍTULO IX CONCLUSIONES	65
CAPÍTULO X RECOMENDACIONES	66
QUINTA PARTE.....	67
ANEXOS Y REFERENCIAS.....	67
REFERENCIAS.....	68
REFERENCIAS.....	69
ANEXOS	73
CAPÍTULO XI ANEXOS.....	74
XI.1 Prueba 2.....	74
XI.2 Prueba 3.....	76
XI.3 Prueba 4.....	78
XI.4 Prueba 5.....	80
XI.5 Prueba 6.....	82
XI.6 Prueba 7.....	84
XI.7 Prueba 8.....	86
ANEXO 9. Glosario	88

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Química es la rama de la ingeniería que trata del desarrollo y aplicación de los procesos de fabricación en que intervienen la química o ciertos cambios físicos. La elaboración de proyectos; diseños e instalación de industrias; el control de la calidad; y la dirección de la producción, son responsabilidades que descansan sobre un profesional altamente calificado como el Ingeniero Químico, cuyo perfil de formación está orientado hacia dichas responsabilidades.

La presencia del cobre en las barras doré interfiere con la pureza del producto final, por lo que las empresas que comercializan dichas barras tratan de disminuir la cantidad de cobre presente con el fin de no afectar las ganancias.

La enciclopedia de Ciencias y Tecnologías en Argentina (2017), define la barra doré como un lingote de aleación de oro y plata con un porcentaje menor de otros elementos químicos (metal doré). Las refinerías de metales preciosos obtienen a partir del metal doré oro y plata con grado variable de pureza según el uso a que se destinan.

El cobre es un material de color rojizo que se encuentra en la naturaleza en forma metálica al igual que el oro y la plata, y por esta razón fue uno de los primeros metales conocidos y utilizados por el ser humano para la elaboración de utensilios, adornos, herramientas y armas.

Las escorias son un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales. Se pueden considerar como una mezcla de óxidos metálicos; sin embargo, pueden contener sulfuros de metal y átomos de metal en forma de elemento mencionan Mendez y Gómez (2011). En la naturaleza, los minerales de metales como el hierro, el cobre, el aluminio y otros metales se encuentran en estados impuros, a menudo oxidados y mezclados con silicatos de otros metales. Durante la fundición, cuando la mena está expuesta a altas temperaturas, estas impurezas se

separan del metal fundido y se pueden retirar. La colección de compuestos que se retira es la escoria. Sin embargo, cuando el cobre no es oxidado debidamente, una gran parte permanece en el producto final.

El nitrato de sodio es un agente oxidante muy poderoso cuyo punto de fusión es de 338°C. A bajas temperaturas, el nitrato se funde sin alteraciones, pero a temperaturas entre 50 y 600°C se descompone produciendo oxígeno, el cual oxida a los sulfuros y algunos metales como el hierro, cobre y zinc (Hilario y Mirano 2017).

La mejora en el proceso de fundición de precipitados de metales preciosos que desarrollan en las industrias mineras es de vital importancia por la rentabilidad que estas generan. Muchos de los yacimientos minerales tienen elevados porcentajes de cobre. La adición de un agente oxidante en el precipitado húmedo es una estrategia para un producto final con una pureza deseada. La presencia de dicho agente provoca la oxidación de los metales base que se encuentran como impurezas ya que proporcionan oxígeno para convertir los metales base en óxidos y de dicha forma, escorificarlos. De esta forma, se oxida el cobre metálico antes de que el producto ingrese al horno de fundición.

La estructura de este trabajo está basada en 5 partes: en la primera parte, se abarca todo lo relacionado al marco teórico, en la segunda parte se presentan los aspectos prácticos y la metodología, en la tercera parte los resultados. En la cuarta parte las conclusiones y recomendaciones y en una quinta y última parte, las referencias y anexos. En este trabajo de grado se implementa el uso de NaNO_3 previo a la fundición del producto final con el fin de una reducción del porcentaje de cobre en la barra doré.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La problemática que genera la contaminación de cobre en las barras doré viene dada por diferentes agentes que intervienen en el proceso de fundición de precipitado, principalmente, la presencia de oxígeno para oxidarlo. La baja concentración de oxígeno presente no oxida totalmente al cobre para enviarlo a la escoria y es por esto que termina formando parte del doré.

La presencia del cobre metálico en el precipitado húmedo es un interferente para la obtención del producto final. Una reducción del contenido de cobre en la barra nos garantiza un proceso de fundición más estable, un mejor cuidado del crisol, un producto final con menos impurezas (cobre, zinc y hierro), una menor cantidad de oro y plata en la escoria y a su vez, una menor pérdida de masa al momento de la refundición por el cliente externo.

JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN

La fundición de productos es el paso final en la producción del doré. Los fundentes afectan significativamente la eficiencia de la operación. El precipitado se funde y contiene significantes cantidades de metales preciosos, además de varios contaminantes como cobre, plomo, mercurio y cadmio. En el proceso de fundición o fusión de precipitados, se obtiene metal doré en presencia de dichos fundentes formadores de escoria a temperaturas que excedan el punto de fusión de todos los componentes. En la fundición de doré, es muy importante que no haya pérdida de elementos por ser de alto valor.

El nitrato de sodio (NaNO_3) es un agente oxidante poderoso que a altas temperaturas se descompone liberando oxígeno y de dicha forma, oxidando a los metales presentes en el precipitado, como es el caso del cobre. Si se adiciona una cantidad debida del nitrato al precipitado húmedo y se seca en un horno a una temperatura específica, gran parte del cobre metálico se oxidará antes de la fundición, reduciendo el porcentaje en el producto final y un mejor cuidado del crisol. De lo contrario cuando hay elevados porcentajes de cobre este agente oxidante reacciona de manera brusca con el grafito del crisol deteriorándolo y reduciendo la vida del mismo.

OBJETIVOS

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Reducir el porcentaje de cobre metálico en la barra doré, producto final de una empresa minera, utilizando NaNO_3 como agente oxidante.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pre-oxidar el cobre metálico presente en el precipitado húmedo previo al ingreso en el horno de fundición.

- Evaluar la influencia del uso de NaNO_3 como agente oxidante en la recuperación de oro y plata en el proceso previo a la fundición.

- Realizar evaluación de impacto económico del proceso propuesto.

ALCANCE

ALCANCE

Adición de NaNO_3 en el precipitado húmedo como un agente oxidante previo al proceso de fundición para la reducción del porcentaje de cobre en la barra doré producidas en una empresa minera.

De esta forma, se plantea como solución la pre-oxidación del producto con una cantidad adecuada de agente oxidante en el proceso previo a la fundición teniendo en cuenta las condiciones en las que se debe llevar a cabo para no afectar los metales de interés. Una reducción del contenido de cobre en la barra garantiza un proceso de fundición más estable, un mejor cuidado del crisol y un producto final con menos impurezas. Una vez el producto ha sido previamente oxidado, se reduce el uso del agente oxidante en la fundición, el cual reacciona con el grafito del crisol y reduce el tiempo de vida útil del mismo.

PRIMERA PARTE

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

La ICT define la barra doré como una aleación semipura de oro y plata, con la que a menudo se alea el oro en su estado natural. Las proporciones de oro a plata pueden variar ampliamente y dependen de las condiciones geológicas que existían en el país de origen cuando se formaron los elementos. Doré es simplemente la palabra francesa que significa "dorado" o "dorado" (International Commodity Traders, 2020).

El doré puede presentarse en muchas formas, típicamente polvo o pepitas que se han formado a partir del polvo usando simples sopletes de acetileno, en el sitio de la mina de donde se extrajo. En operaciones más sofisticadas, se pueden usar hornos para fundir la mayoría de las impurezas y verter el oro en lingotes preformados.

El objetivo del proceso de fundición o fusión de precipitados de oro y plata es obtener metal doré en presencia de fundentes formadores de escoria a temperaturas que excedan el punto de fusión de todos los componentes de la carga típicamente entre 1200 y 1300°C, de acuerdo con Marsden & House (2006).

El tiempo que se demora en fundir completamente la carga no solo depende de la calidad de la escoria que se forma sino también de la composición química de la aleación oro-plata. Si el cobre no es eficientemente oxidado y removido en la escoria, permanece en estado metálico y puede formar parte del doré, alterando su punto de fusión.

I.1 Historia

La minería es la extracción selectiva de los minerales y otros materiales de la corteza terrestre de los cuales se puede obtener un beneficio económico, incluyendo toda actividad económica primaria relacionada con dicha actividad. Dependiendo del tipo de material a extraer, la minería se divide en metálica, no metálica (piedras ornamentales y materiales de construcción) y energética.

El oro y el cobre fueron los primeros metales utilizados por los humanos debido a su presencia en el estado nativo y sus propiedades maleables y dúctiles, lo que significaba que podían trabajarse fácilmente con herramientas primitivas. Los primeros usos del oro fueron en el Medio Oriente, durante el Neolítico, donde el oro se recolectaba de los lechos de los arroyos ya sea manualmente o por métodos de concentración por gravedad.

En Egipto, durante el reinado de Menes en 3050 a. C., el oro se utilizó como medio de pago monetario, en forma de granos y lingotes. Sin embargo, desde entonces, la principal aplicación del oro ha sido la decoración y la joyería, como es el caso en la actualidad. Se han encontrado ornamentos de oro finamente trabajados en tumbas en Mesopotamia que se originaron alrededor del 2700 a. C. De manera similar, la extracción de oro en Egipto comenzó con trabajos aluviales y fue seguida por la extracción de vetas subterráneas poco profundas en Nubia alrededor del 1300 a. C.

La prosperidad de las minas de oro y plata de Europa Central llegó a un abrupto final en la década de 1550, cuando México y las partes de América del Sur ahora conocidas como Colombia, Perú y Bolivia fueron conquistadas por España y las prácticas metalúrgicas europeas se extendieron a América del Sur. Uno de los primeros hallazgos más importantes fueron los depósitos aluviales del Chocó en Colombia. Los costos de producción eran más bajos que los de las minas europeas, incluso con las mayores distancias de transporte a Europa, en gran parte porque

las operaciones de América del Sur utilizaban un barrido primitivo, barato y laborioso del material del lecho del río.

Los volúmenes de producción minera utilizados son onzas de oro que equivalen a US\$1,814.25; kilogramos de oro que equivalen a US\$58,329.49; onza de plata que equivale a US\$16.85; y kilogramo de plata US\$873.95.

I.2 Minería en República Dominicana

La minería ha sido una actividad económica de la República Dominicana desde hace épocas. Existen suficientes datos históricos que prueban que el oro fue trabajado por las culturas indígenas de las Antillas, especialmente en la isla que Cristóbal Colón llamó La Española, mostrando un cierto nivel de desarrollo en la orfebrería. La importancia del oro para los indígenas no fue económica sino más bien religiosa y social y estaba reservado para adornar a la clase social considerada noble como los caciques y miembros de honor de la tribu, diferenciándose así de los demás (Manual de Minería, 2015).

El valor agregado de la minería y su atractivo para la Inversión Extranjera Directa (IED), ha crecido en los últimos años debido al aumento en los niveles de producción del oro, el mármol y los principales agregados de la construcción.

El sector minero representa una de las principales fuentes de ingresos de la República Dominicana. Las estadísticas oficiales del Banco Central de la República Dominicana indican que desde 2001 hasta la fecha, el sector minero ha recibido IED por más de US\$4,000 millones, para convertirse en el segundo destino de inversión foránea, solo superado por el comercio y la industria.

En 2013, el sector de minería registró un crecimiento de más de un 156% en relación con el año anterior, lo que representó una participación equivalente a un 1.2% del Producto Interno Bruto del país. La ley que regula las actividades de exploración y explotación de los recursos minerales en la República Dominicana es la Ley Minera de la República Dominicana No. 146, del 1971.

Desde el año 2013, República Dominicana cuenta con cinco operaciones mineras metálicas activas para la producción metálica de oro, plata, cobre, ferroníquel y bauxita. En el renglón de minería no metálica, actualmente operan 50 empresas de explotación minera, que disfrutan de los incentivos y beneficios de la Ley 146-71 de Minería.

Los yacimientos de minerales en explotación en la República Dominicana están localizados a lo largo de todo el territorio nacional. Tradicionalmente, las operaciones mineras han sido a cielo abierto, aunque la empresa Corporación Minera Dominicana (CORMIDOM) ha iniciado operaciones en la primera mina subterránea del país, para la extracción de minerales metálicos, establece el Ministerio de Energía y Minas.

Los proyectos de explotación minera metálica se ubican principalmente en tres provincias: La Vega, Monseñor Nouel y Sánchez Ramírez. La concesión Quisqueya I de ferroníquel es operada por la empresa Falconbridge Dominicana S.A. En la Reserva Fiscal de Montenegro opera Pueblo Viejo Dominicana Corporation extrayendo oro y plata, y Envirogold Las Lagunas Limited (Envirogold) que aprovecha el oro, plata y cobre de la Presa de Colas Las Lagunas. La Corporación Minera Dominicana (CORMIDOM) tiene un proyecto de extracción de oro, plata y cobre según su concesión Cerro de Maimón. Hasta el 2015 la empresa DOVEMCO explotó bauxita en la provincia Pedernales.

El 22 de enero del 2018 el ministerio de Energía y Minas aprobó la concesión para la explotación de la mina de oro en Hondo Valle, ubicada en la Cordillera Central, al norte de la provincia de San Juan. Esta sería la primera explotación minera de oro subterránea que se realizaría

en la República Dominicana. La compañía a la que se le aprobó la exploración y explotación de la mina lleva por nombre Gold Quest (Listín Diario, 2018).

El ministro de Energía, Antonio Isa Conde, manifestó que mediante una declaración jurada la empresa se comprometió a otorgar al Estado más de 40% de los beneficios, de los cuáles 5% será destinados al municipio de San Juan. El Estado recibiría US\$224 MM durante vida útil de la mina, de 7 años. Es decir, la empresa otorgará US\$52 millones por encima de lo que tendría que pagar en base a ley. El valor de mina de Romero se estima en US\$561 MM a los precios actuales de metales. Sin embargo, Isa Conde aclaró que, aunque los permisos de concesión ya están otorgados, la minería no podrá iniciar las operaciones hasta obtener la licencia medioambiental.

La discusión sobre este tema ha resurgido debido a que el 5 de febrero de 2021, el presidente de la Mesa Redonda de los Países de la Mancomunidad en la República Dominicana, Fernando González Nicolás, propuso que sean los resultados de los estudios de impacto ambiental los que determinen si se explota o no la mina de oro del proyecto Romero en la provincia de San Juan de la Maguana.

González Nicolás señaló que, si estos estudios arrojan que afectaría negativamente el ecosistema de la zona, la comunidad, el gobierno y los inversionistas no permitirían desarrollar el proyecto.

El presidente de la Mesa de la Mancomunidad, sin embargo, dijo que, si se confirman que la explotación minera no afectará el agua ni el medio ambiente de esa provincia ni de las zonas aledañas, entonces estaríamos ante una nueva oportunidad para la región y el país, de producir riqueza, transferencia de tecnología, educación, progreso y bienestar para San Juan de la Maguana.

Actualmente existe un debate sobre la construcción de una presa de colas sobre el río Cuance, en Yamasá. Esta presa de cola fue solicitada por Barrick Pueblo Viejo en el año 2020 para depositar los desechos producidos debido a que la presa actual que utiliza terminara su vida útil en el 2022. La comunidad dominicana está en contra de la construcción de esta presa de cola debido a que representa una amenaza permanente a la disponibilidad y calidad del agua de la zona y del Gran Santo Domingo (Santos, V. 2020).

Sin embargo, el ministro de Energía y Minas, ingeniero Antonio Almonte, afirmó que la aprobación de la presa de cola solicitada por la empresa Barrick Gold está sujeta a un estudio de impacto ambiental que determine que no pondrá en riesgo el ecosistema, el medio ambiente y la población de la zona, por lo que, siempre y cuando se demuestre que la construcción de esta presa de cola no tendrá un impacto ambiental negativo, se aprobará la construcción de la misma.

CAPÍTULO II PROCESO DE PRODUCCIÓN

La exploración minera es la primera etapa del ciclo minero y consiste en la búsqueda y evaluación de recursos minerales ya sean estos metálicos, no metálicos o energéticos, de acuerdo al Manual de Minería (2015). El objetivo de la exploración es encontrar una nueva fuente de minerales o yacimiento que pueda ser desarrollado económicamente y de manera sostenible. Toda mina nueva empieza como un proyecto de exploración; sin embargo, la mayoría de los proyectos de exploración no llegarán a convertirse en minas.

En el Manual de Minería también se menciona que la exploración se puede realizar en diversos lugares, ya sea en zonas nuevas donde no se ha encontrado mineral antes (exploración preliminar o inicial) o en terrenos cercanos a una operación minera para buscar yacimientos adicionales. Incluso se puede explorar dentro de una mina en explotación para expandir el yacimiento mineral y reponer las reservas, alargando así la vida de la mina.

El desarrollo de una mina es la segunda etapa del ciclo minero. Una vez ubicado el yacimiento se determina si puede ser explotado de una forma económicamente factible y, si es así, se construye una mina. En esta etapa se llevan a cabo todas las actividades que hacen posible la extracción del mineral contenido en un yacimiento y destinado a su venta.

El concentrado de mineral obtenido en la etapa de operación normalmente contiene varios minerales de valor y puede ser comercializado como tal. Sin embargo, para que estos minerales puedan ser utilizados por las distintas industrias, deben ser procesados nuevamente en las plantas de fundición que normalmente operan como unidades industriales independientes de las minas. Allí se separan los distintos metales contenidos en los concentrados de minerales que producen las minas. Posteriormente se lleva a cabo la refinación, donde los metales alcanzan una pureza aún más elevada. Estos pasos son necesarios para obtener metales aislados y con un alto grado de

pureza (hierro, aluminio, níquel, cobre, zinc, plata, oro, etc.) que es el producto requerido por las distintas industrias.

Para definir el mineral de la roca de desecho, las muestras se toman a intervalos establecidos a lo largo de las líneas examinadas dentro de la fosa y se analizan estas muestras. Algunas de las áreas más duras requieren voladura para aflojar la roca antes de la excavación. Los camiones de volteo llevan la roca a las trituradoras primarias. En el proceso de perforación se prepara el terreno para luego realizar la voladura, dejando el material expuesto y listo para ser cargado y transportado por el camión minero. El siguiente paso es reducir el tamaño de las rocas en procesos separados.

Las trituradoras rompen las rocas más grandes hasta un tamaño adecuado para el transporte en la cinta transportadora. El mineral se une al descargarse en una faja transportadora que lo lleva a una tolva de almacenamiento. El objetivo del chancado es reducir el tamaño del mineral para facilitar la acción de la solución química que recuperará el oro y la plata en la etapa de lixiviación.

Un transportador de bandas de goma transporta el doré y la roca de desecho a la zona de eliminación de molinos y residuos. Los electroimanes grandes eliminan los residuos de acero excavados en los antiguos trabajos.

El material minado es transportado a la trituradora primaria, después son llevadas a la pila de acopio a través de las correas transportadoras hasta el área de molinos, que está compuesto por un conjunto de bolas de acero que muelen las rocas mientras gira hasta convertirlas en una especie de arena gruesa, aquí se agrega agua para ayudar a que la arena fluya y salga del molino.

Posterior a la molienda, la pulpa es enviada a un espesador donde los sólidos caen al fondo de los tanques y el agua es recuperada y reintegrada al proceso de molienda.

Para liberar los metales preciosos contenidos en este tipo de minerales, es necesario realizar un tratamiento previo de oxidación de la matriz sulfurosa que permita el contacto directo de los metales con el reactivo de lixiviación. En las autoclaves, a la pulpa o lodo se le agrega oxígeno a alta presión para producir una reacción química que elimina el azufre que cubre el oro y la plata.

Según Ballester y Verdeja (2000), la ocurrencia de metales preciosos está determinada por diferentes condiciones, tales como su afinidad química y mineralógica. Muchos de los minerales de oro y plata son refractarios a los procesos convencionales de extracción, lo cual hace difícil su recuperación. Una situación bastante común que da la refractariedad de tales minerales es la distribución del oro y plata en sulfuros de hierro, formados principalmente por las especies de pirita, arsenopirita o ambas a la vez. Para liberar los metales preciosos contenidos en este tipo de minerales, es necesario realizar un tratamiento previo de oxidación de la matriz sulfurosa que permita el contacto directo de los metales con el reactivo de lixiviación.

Una mezcla con una solución de cianuro débil se alimenta en grandes tanques de lixiviación de acero donde se disuelven el oro y la plata. La cianuración es el proceso electroquímico de disolución de oro, plata y algunos otros componentes que se pueden encontrar en un mineral aurífero. Para ello se usa una solución alcalina de cianuro que forma aniones complejos de oro, estables en condiciones acuosas. Según Romero y Flores, su principio básico es proporcionar un medio en el que las soluciones alcalinas débiles tengan una acción directa preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral (Romero y Flores, 2009).

Para la recuperación del oro y la plata del lodo, a la pulpa se le agrega una solución líquida con baja concentración de cianuro de sodio, se agita y se le inyecta aire para la suspensión del carbón activado que se agrega a los tanques. Las partículas de oro y plata que llegan en forma sólida al circuito se disuelven en reacción al agregado del cianuro y del oxígeno, el carbón activado absorbe el oro y la plata que están en solución, quedando preñado (Preg-Robbing).

De forma general, el proceso de cianuración es el más ampliamente utilizado para la extracción de oro y plata a partir de sus minerales. Este proceso convencional utiliza oxígeno que se encuentra en el aire como oxidante y al ion CN^- como agente complejante, establece Habashi (1967).

Además, se menciona que este método se basa en que el oro y la plata se disuelven fácilmente en una solución acuosa diluida de cianuro de sodio o de potasio, con relativa facilidad si se mantienen condiciones oxidantes favorables (Szczygieli, 1984).

Ballester y Verdeja (2000) definen que la técnica consiste en entrar en contacto con la pulpa lixiviada con carbono en una serie de tanques agitados suavemente con un tiempo de retención suficiente. El carbono se recicla a través del circuito para acumular la carga, luego se separa de la pulpa en una zaranda vibratoria adecuada, lo suficientemente gruesa como para retener el carbono, pero lo suficientemente fina como para permitir que la pulpa pase a través de ella.

El carbono se envía a continuación a la columna de desmontaje para la desorción y regeneración. La pulpa lixiviada y el carbono se transfieren en una disposición de flujo de contracorriente entre una serie de tanques, por lo general el número de tanques variará dependiendo de la producción. En el tanque final, el carbono fresco o estéril se pone en contacto con una solución de baja concentración. En este tanque el carbono fresco tiene una alta actividad y puede eliminar trazas de oro (a niveles por debajo de 0.01 mg/L Au en solución).

Después de este proceso de lixiviación, la suspensión pasa a través de seis tanques de adsorción que contienen gránulos de carbono que absorben el oro y la plata.

A medida que sube el producto, el carbono carga a concentraciones cada vez más altas de oro, ya que entra en contacto con soluciones de mayor grado. Típicamente, concentraciones de hasta 4000 a 8000 gramos de oro por tonelada de carbono (g/t Au) se pueden alcanzar en el carbono

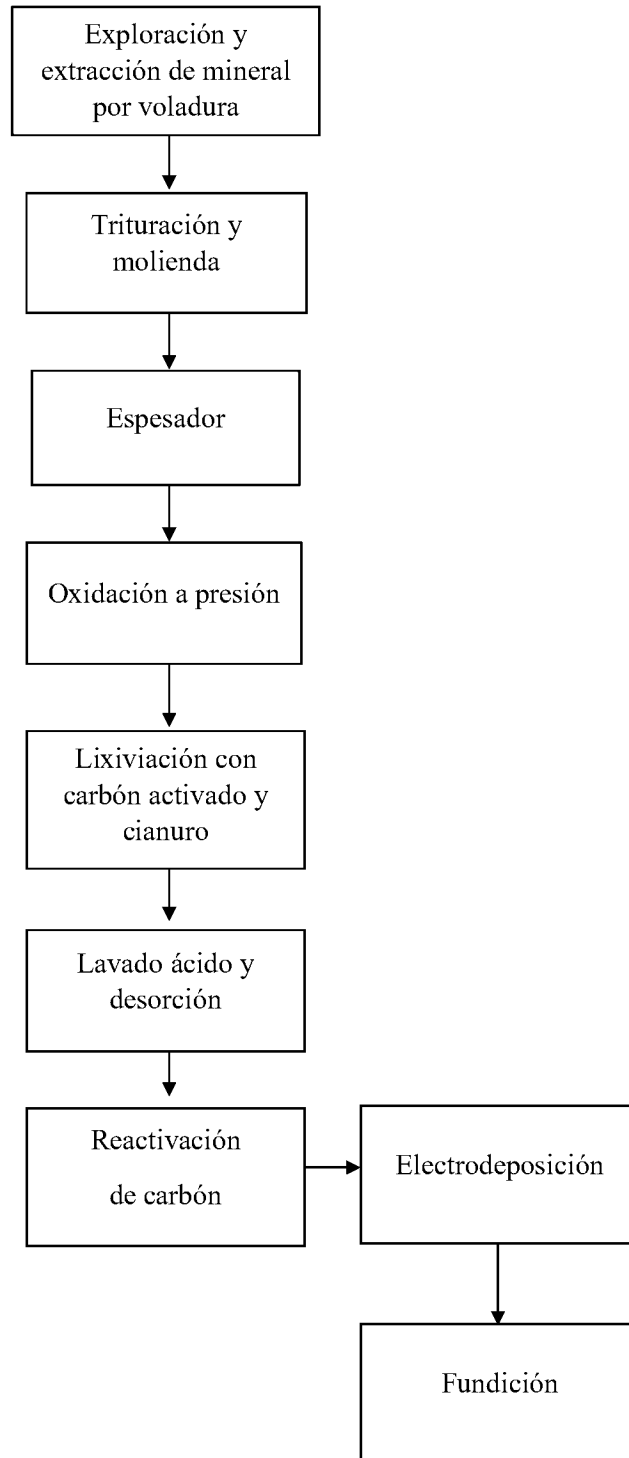
cargado final, ya que entra en contacto con el doré recién lixiviado y la solución de lixiviación preñada. Esto se puede medir comparando la cantidad de oro extraído del carbono con la cantidad de carbono utilizado.

El carbono cargado final entonces se retira y se lava antes de someterse a la "elución" o desorción de cianuro de oro a alta temperatura y pH con una solución compuesta por soda cáustica y cianuro de sodio (1% NaOH 0,1 a 0,2% NaCN) a una temperatura casi hirviendo de 36 a 72 horas. La tasa de elución puede acelerarse añadiendo un 10% de alcohol a temperaturas de alrededor de 60 a 80°C con un tiempo de desprendimiento de 4 a 6 horas. La elución del carbono cargado también puede acelerarse mediante elución a presión (120 a 130°C a 70 psig) en 6 a 8 horas, mencionan Havlik y Skrobian (1990).

La solución en la que se recupera el oro y la plata pasa por unas celdas donde se precipita el oro y la plata por electrodeposición en forma de pulpa. Aquí el oro y la plata quedan como una pasta densa que se introduce a un horno en el área de refinación donde son fundidos.

Los cátodos cargados se enjuagan para producir un lodo con oro y plata que se seca, se mezcla con fundentes (bórax, sílice, carbonato de sodio y nitrato de sodio) y se coloca en el horno. Después de varias horas el material fundido se vierte en una cascada de moldes que producen barras de lingotes doré. Se sumerge en agua para terminar de enfriar, se limpia, se estampa para identificación, se pesa oficialmente y se empaca para exportación (Marsden y House, 2006).

FIGURA 1. Proceso de extracción de oro y plata.



Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

CAPÍTULO III METALES PRECIOSOS Y SUS CARACTERÍSTICAS

Los metales preciosos se denominan como aquellos que difieren de los otros metales por encontrarse en estado libre sin formar compuestos con otros elementos. El valor de un metal precioso se basa en la rareza con la que se encuentre. Debido a la gran rentabilidad que generan en el sector económico, los metales preciosos con mayor importancia en la minería son el oro y la plata.

III.1 Oro

El oro (símbolo químico "Au") es un metal de transición que a menudo se presenta en su forma elemental natural como una pepita o un grano en las vetas de rocas o depósitos aluviales. Suele presentarse en una solución sólida con plata y también se encuentra aleado de forma natural con otros metales como el cobre o el paladio.

Según el Consejo Mundial del Oro, se han extraído alrededor de 187.200 toneladas de oro desde el comienzo de la civilización y el consumo mundial se divide entre sus aplicaciones industriales, como activo de inversión y como joyería. International Commodity Traders (2020) menciona que, una vez utilizado para sustentar los sistemas monetarios (el "patrón oro"), el oro atrae a los inversores porque tiene un valor intrínseco, como activo tangible y, por lo general, su precio se recupera durante períodos de incertidumbre económica.

III.2 Plata

La enciclopedia científica británica define a la plata pura como lustrosa, casi blanca, suave, muy dúctil, maleable, es un excelente conductor de calor y electricidad. No es un metal químicamente activo, pero es atacado por el ácido nítrico (que forma el nitrato) y por el ácido

sulfúrico concentrado caliente. Tiene la conductividad eléctrica más alta de todos los metales, pero su mayor costo ha impedido que sea ampliamente utilizado para fines eléctricos (Enciclopedia Científica Británica, 2020).

El uso principal de la plata es como metal precioso y sus sales de haluro, especialmente el nitrato de plata, también se utilizan ampliamente en fotografía. Los principales puntos de venta son la fotografía, las industrias eléctrica y electrónica y para usos domésticos como cubertería, joyería y espejos.

CAPÍTULO IV AGENTES OXIDANTES

Un agente oxidante es aquel que puede aceptar fácilmente electrones provenientes de otra especie química. El agente oxidante oxida alguna otra especie, hace perder electrones a la otra especie. Los átomos que tienen tendencia a tomar electrones o a compartir electrones para formar estructuras más estables, deben resultar buenos agentes oxidantes.

Entre los agentes oxidantes más utilizados en la industria minera se encuentran:

- Bórax
- Sílice
- Nitrato de sodio
- Carbonato de sodio

IV.1 Bórax

Vergara y Mirano (2017) establecen que con una densidad de 2370 kg/m³, el borato de sodio (Na₂B₄O₇·10H₂O) funde a 743° C, lo cual disminuye el punto de fusión para toda la carga. Cuando se funde es muy viscoso, pero en calor rojo se convierte en un ácido fluido fuerte el cual disuelve y capta prácticamente todos los óxidos metálicos (tanto ácidos como básicos). Las grandes cantidades de Bórax pueden ser perjudiciales causando una escoria dura y poco homogénea. Además, un exceso de Bórax puede dificultar la separación de fases debido a la reducción del coeficiente de expansión de la escoria y su acción de impedir cristalización.

IV.2 Sílice

El dióxido de silicio (SiO₂) tiene una densidad de 2334 kg/m³ y funde a 1750°C, es el fundente ácido más fuerte y disponible que se tiene. Se combina con óxidos metálicos para formar cadenas

de silicato estables. Las escorias con alto contenido de Sílice son extremadamente viscosas y retienen excesivamente metálicos en suspensión. Cuando la sílice se mezcla con bórax, se forman cadenas borosilicatadas. El porcentaje en peso de bórax a sílice en presencia de cantidades considerables de zinc generalmente no debe ser menor de 2:1. Estas escorias borosilicatadas no solo tendrán una alta solubilidad para óxidos metálicos base, sino que ofrecen buena fluidez al fundido.

IV.3 Nitrato de sodio

El nitrato de sodio (NaNO_3) tiene una densidad de 2260 kg/m^3 y se añade para oxidar los metales básicos en la carga. Este es un agente oxidante muy poderoso cuyo punto de fusión es de 338°C . Aldebarán Sistemas hace mención de que a bajas temperaturas el nitro se funde sin alteraciones; pero a temperaturas entre 500°C y 600°C se descompone produciendo oxígeno, el cual oxida a los sulfuros y algunos metales como el hierro, cobre y zinc. Se debe controlar la adición de nitro porque al liberar oxígeno ocasiona una reacción vigorosa y puede ocasionar el rebose en el crisol. El nitro reacciona con el grafito, provocando una excesiva erosión del crisol reduciendo su vida.

IV.4 Carbonato de sodio

Con densidad de 2400 kg/m^3 , el carbonato de sodio (Na_2CO_3) es un fundente básico poderoso que funde a 852°C . En presencia de sílice, el carbonato de sodio forma silicato de sodio con el desprendimiento de dióxido de carbono. Vergara y Mirano (2017) también mencionan que, estos silicatos reaccionan con una variedad de óxidos básicos para formar silicatos complejos. Además, debido a la facilidad natural para formar sulfatos alcalinos, también actúa como desulfurizante y un agente oxidante. El uso de Na_2CO_3 proporciona transparencia a la escoria, pero en cantidades excesivas origina escorias pegajosas e higroscópicas que son difíciles de remover del doré.

CAPÍTULO V CARACTERÍSTICAS DE LOS CRISOLES

Un crisol es un contenedor cóncavo que se usa para depositar elementos o sustancias que deben ser sometidos a altas temperaturas, a fin de producir cambios en su estado físico. Existen diversos tipos dependiendo del área y por ende el elemento a tratar (ESGRAF, 2020).

La diferencia se centra en el material con el que está hecho el crisol y este cambia dependiendo el área de uso. No todos los elementos deben ser tratados del mismo modo. Actualmente existen tres tipos diferentes de crisoles:

- **Crisol de porcelana:** Utilizado en el laboratorio por sus propiedades al ser un excelente material para trabajar con sustancias químicas.
- **Crisol de carburo de silicio:** El carburo de silicio es un material semiconductor casi tan duro como el diamante. Tiene una buena conductividad térmica que le hace tener una mejor distribución de calor. También poseen resistencia a la erosión química. Son usados mayormente en la fundición de metales, aunque suelen ser más costosos que los de porcelana o grafito.
- **Crisol de grafito:** Este es uno de los más usados, el grafito es un polimorfo del carbón y es utilizado como crisol por sus propiedades antiadherentes y su resistencia al calor, aguantando temperaturas de hasta 1500°C. Se usa para la fundición de metal.

V.1 Crisol de grafito

El crisol compuesto de grafito es un recipiente hondo utilizado principalmente para la fundición de metales, como el oro, plata, aluminio, y otros metales preciosos. Estas piezas están diseñadas especialmente según las necesidades de la industria, y pueden resistir altas temperaturas.

A grandes rasgos, el funcionamiento de un crisol es muy básico. Se colocan en un horno -ya sea eléctrico o de inducción- con el metal dentro de su contenedor, y una vez en su estado líquido, el metal se vierte en moldes para crear piezas específicas.

Los crisoles compuestos de grafito se desarrollan según dibujo o medida partiendo de barras, placas y bloques de diferentes grados y calidades de grafito sintético según su aplicación. A diferencia de otros materiales, como el barro, porcelana o cerámica, este tipo de crisol tiene excelentes propiedades antiadherentes, por lo que la fundición en estos garantiza una reducción de mermas en el material fundido.

Un crisol de grafito tiene como característica principal la resistencia a temperaturas más altas que otros, incluso superiores a los 1500°C, aunque su uso más común oscila alrededor de los 500°C.

El crisol compuesto de grafito se usa principalmente para la fundición de:

- Oro
- Plata
- Aluminio
- Platino
- Cobre

El grafito, sintético y natural, es un elemento muy utilizado en la industria, no sólo en la fundición. Si bien es un material antiadherente y resistente al choque térmico, también se puede utilizar en aplicaciones mecánicas, como: sellos mecánicos, rodamientos, juntas y otras tantas áreas (ESGRAF, 2020).

SEGUNDA PARTE

MARCO METODOLÓGICO

CAPÍTULO VI METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

Cuando los precipitados tienen altos contenidos de cobre, producen al fundirse, doré con altos porcentajes de este metal. Una solución a este problema es la pre-oxidación al precipitado, de dicha forma, el cobre se elimina parcialmente disminuyendo el porcentaje final. Para llevarlo a cabo, se requiere evaluar dos procesos para el mismo estudio, de modo que sea posible comparar entre los datos obtenidos mediante la pre-oxidación y sin la adición de este paso para poder establecer el beneficio que otorga.

El estudio de este proyecto es de carácter descriptivo experimental, ya que se plantea la problemática que presenta la presencia de cobre en el producto final. Con esto, estudiando las soluciones que se vinculen, tomando en cuenta la más factible y corroborando de manera práctica lo previamente estipulado.

VI.1 Porcentaje de cobre en el precipitado húmedo

Antes de iniciar con el secado del precipitado, se toma una muestra del producto y se realizan una serie de análisis que determinan los siguientes factores:

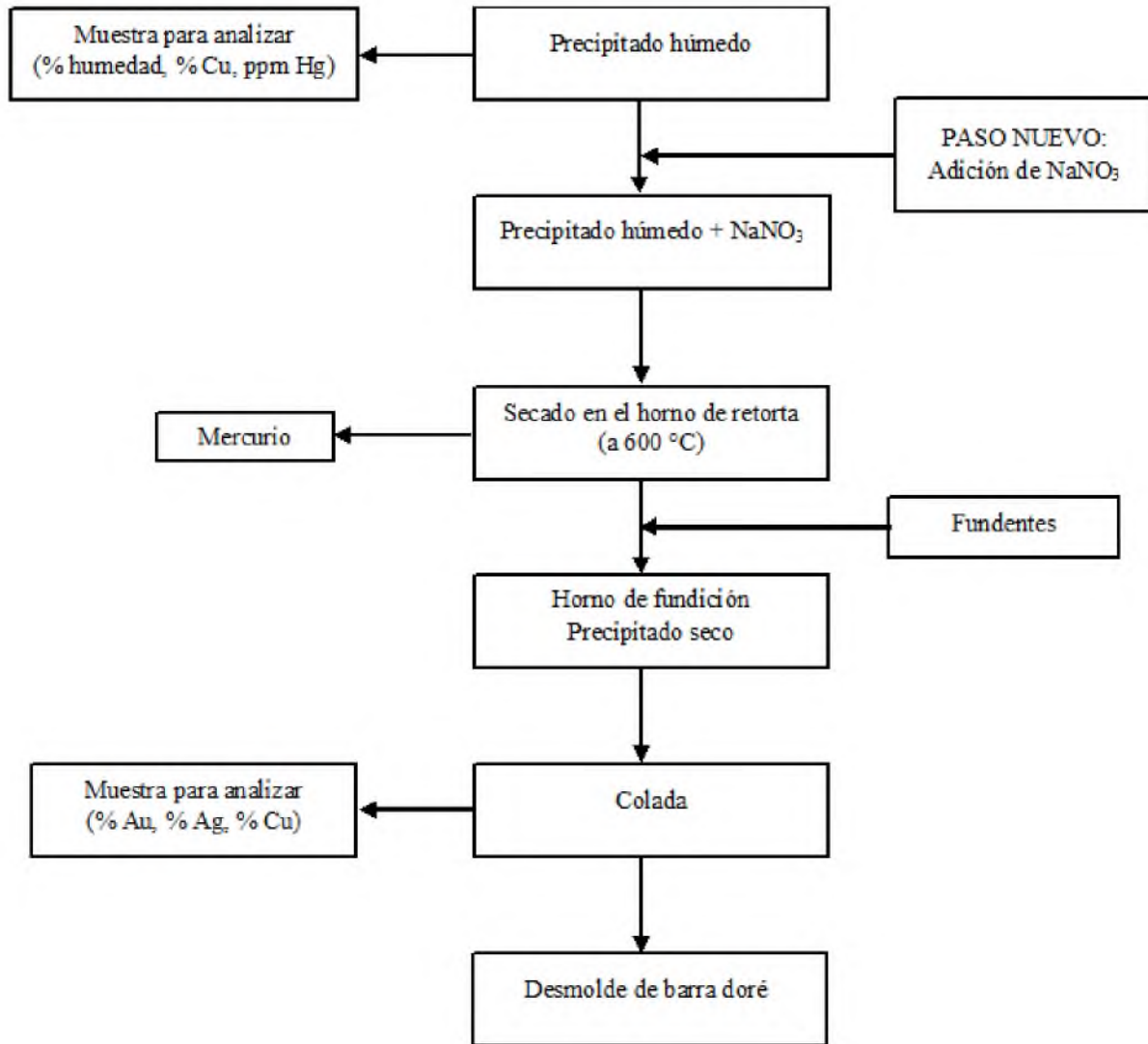
- Porcentaje de humedad
- Porcentaje de Cobre
- Mercurio total presente

VI.2 Inclusión del agente de oxidante en el proceso

Se estima mediante cálculos estequiométricos la cantidad de oxígeno que requiere el peso del precipitado tomando en cuenta los datos proporcionados por los análisis realizados. Para poder comprobar que la prueba haya funcionado, se divide el precipitado en dos partes con pesos semejantes, esto con el objetivo de comparar los resultados finales de un producto sin pre-oxidar y un producto previamente pre-oxidado.

Originalmente, el precipitado húmedo proveniente de los filtros prensa, se somete a un horno para secarlo y extraer el mercurio contenido en él. Es tratado a temperaturas que oscilan entre los 580 y 600°C. De dicha forma, aprovechando la temperatura, se realizaría la pre-oxidación con NaNO_3 mientras se seca el precipitado para oxidar el Cu de forma que cuando vaya a fundirse, el óxido de cobre pase parcialmente a la escoria y se obtenga un producto final con menos impurezas.

FIGURA 2. Diagrama de flujo del proceso de fundición con la inclusión de la pre-oxidación.



Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

VI.3 Elección del agente oxidante

El nitrato de sodio es un agente muy oxidante, sobre todo en un ambiente húmedo, con lo cual transmite óptimamente sus átomos. Además, es uno de los componentes del fundente que se adiciona al producto en el proceso final. Su reacción con el crisol durante la fundición al encontrarse con alto material para oxidar no resulta conveniente ya que lo deteriora, lo que indica otra necesidad para pre-oxidar el producto (Vergara y Mirano, 2017).

VI.4 Reacciones y mezclado

Uno de los factores que afecta la manera en la que se lleve a cabo una reacción es el estado físico en el que se encuentren los reactivos. Cuanto más chocan las moléculas, con mayor rapidez reaccionan. La mayor parte de las reacciones que se estudian son homogéneas: en ellas participan gases o disoluciones líquidas. Si los reactivos están en fases diferentes, como cuando uno es un gas y otro es un sólido, su área de contacto limita la reacción (Bautista 2012).

Por esta razón, el mezclado fue discutido para la realización de la prueba. Se realiza una prueba en la cual el agente oxidante se adiciona en el fondo de la bandeja y luego el precipitado sobre el nitrato de sodio. Luego, se toma en cuenta adicionar la mitad del nitrato de sodio en el fondo, el precipitado, y finalmente la otra mitad estimada sobre el precipitado. Como última opción, una vez el precipitado está dentro de la bandeja, se adiciona la mitad del nitrato de sodio mezclándolo bien con el precipitado, se adiciona la otra mitad y se repite el mezclado. Todo esto con el fin de determinar la técnica más factible para lograr un mayor contacto entre las superficies de ambos reactivos y un mayor rendimiento de la reacción.

VI.5 Estimación del impacto económico

Con el fin de estimar los beneficios que se obtienen con la realización de este método, se promedia la recuperación de oro, plata y la reducción de cobre una vez obtenidos los resultados. Dichos promedios se aplican a distintos escenarios en los cuáles se aplica la penalización.

VI.6 Procedimiento

Para la realización de este proyecto, se implementa la metodología tomando en cuenta factores que pueden ser aprovechados para la mejora del mismo. Cada prueba consta de una alteración diferente con el fin de determinar el conjunto de técnicas más efectivo.

VI.6.1 Primera prueba

Como se estipula anteriormente, el precipitado húmedo se divide en dos partes con pesos aproximados. El precipitado húmedo se extrae de los filtros prensas y se colocan sobre tres bandejas metálicas. Se pesan una por una y luego se aproximan los pesos volviendo a distribuir el producto.

Las bandejas se nombran con las primeras cuatro letras del abecedario. Las bandejas A y C correspondiendo a las que se les realiza la prueba; la bandeja B sin pre-oxidación.

El nitrato de sodio calculado para oxidar el cobre metálico es 4.1 kg, el cual se adiciona al fondo de las bandejas y luego se coloca el precipitado húmedo. Se dividió entre las cuatro bandejas, resultando 2.05 kg por bandeja. Las bandejas de prueba se colocan en el horno ‘‘I’’ y la bandeja de comparación en el horno ‘‘II’’.

VI.6.2 Segunda prueba

La segunda prueba se realiza con dos bandejas. La bandeja A sin nitrato de sodio y la bandeja B con nitrato de sodio.

El nitrato de sodio añadido a la bandeja de prueba fue de 3.7 kg, colocado en el fondo de la bandeja y luego el precipitado sobre el agente oxidante. La bandeja A colocada en el horno ‘I’ y la bandeja B dentro del horno ‘II’.

VI.6.3 Tercera prueba

Para la tercera prueba se utilizan cuatro bandejas. Esta vez invertidas, de modo que las bandejas A y B se pre-oxidan dentro del horno ‘II’ y las bandejas C y D dentro del horno ‘I’ sin nitrato de sodio.

El nitrato de sodio estimado para esta prueba es 4.5 kg. En esta prueba, los kilos calculados se añadieron por bandeja, a diferencia de la primera prueba.

VI.6.4 Cuarta prueba

La cuarta prueba se realiza con cuatro bandejas. Las bandejas A y B con precipitado húmedo sin agente oxidante en el horno ‘I’ y las bandejas C y D con nitrato de sodio en el segundo horno.

El nitrato de sodio estimado para esta prueba es 0.4 kg, el cual se añadió a cada una de las bandejas.

VI.6.5 Quinta prueba

Esta prueba se realiza con cuatro bandejas, utilizando las bandejas A y B sin agente oxidante y las bandejas C y D con nitrato de sodio.

En esta prueba se utilizó un método distinto de mezclado. El nitrato de sodio estimado para esta prueba es 2.05 kg, el cual se añade por bandeja y no dividido entre ellas.

Se añade la mitad de los kilos a la bandeja, se mezcla con el precipitado húmedo y luego el restante se añade nuevamente para conseguir más contacto entre el producto y el agente oxidante.

VI.6.6 Sexta prueba

Para esta prueba se utilizan tres bandejas; A y B para el material que se pre-oxidará y la bandeja C con el material que no lleva agente oxidante, se colocan en los hornos I y II respectivamente.

El nitrato de sodio estimado para esta prueba es 0.9 kg, el cual se añade a cada bandeja y no distribuido entre ellas. A partir de esta prueba se implementa esta técnica.

VI.6.7 Séptima prueba

En esta prueba se utilizan dos bandejas. En la bandeja A el material que no se pre-oxida, colocada en el horno I.

La bandeja B con 3.8 kg de nitrato de sodio estimados para la oxidación del cobre metálico. La técnica de mezclado de la quinta prueba se vuelve a utilizar con el mismo objetivo de alcanzar mayor contacto entre el precipitado húmedo y el agente oxidante.

VI.6.8 Octava prueba

Para esta prueba se utilizan cuatro bandejas. A y B para un precipitado húmedo sin agente oxidante en el horno I; C y D para la oxidación del cobre metálico en el horno II.

Se estiman 3.8 kg de nitrato de sodio, los cuales se añaden a cada bandeja y se mantiene la técnica de mezclado de la quinta prueba.

TERCERA PARTE
CÁLCULOS Y RESULTADOS

CAPÍTULO VII CÁLCULOS

VII.1 Cobre presente en el precipitado húmedo

A continuación, se muestran los datos proporcionados por el laboratorio general luego de tomar una muestra de ambos precipitados, tanto el húmedo como el seco, los cuales fueron necesarios para estimar la cantidad de oxígeno requerido para oxidar el cobre presente en dicha prueba:

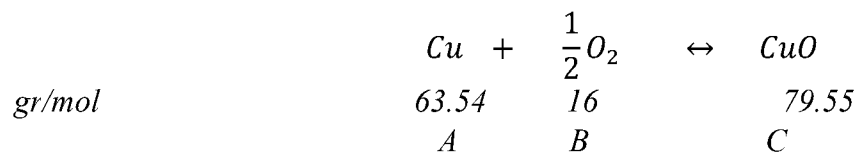
TABLA 1: Resultados de precipitado húmedo y seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	699
% humedad	56.56
ppm Hg	2086
% Cu	2.196
Cu en precipitado húmedo (kg)	15.35
Peso de agua perdido (kg)	395.3544
Hg removido -95% eliminado (kg)	1.385
Peso de precipitado seco (kg)	302
% Cu en precipitado seco	5.08

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

VII.2 CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS

VII.2.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



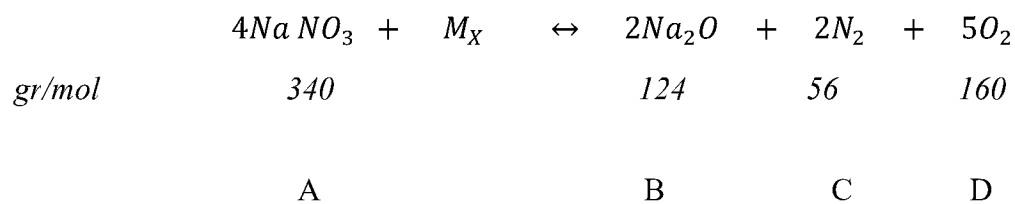
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 2.196\% \times 699 \text{ kg} = 15.35 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{15.35 \text{ kg} \times 16 \text{ moles } O_2}{63.54} = 3.87 \text{ kg}$$

VII.2.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{3.87 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 8.2 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(8.2 \text{ kg } NaNO_3)}{(302 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 2.7\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(8.2 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 4.1 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(4.1 \text{ kg } NaNO_3)}{(302 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 1.4\% NaNO_3$$

Los cálculos para las demás pruebas se realizaron de la misma manera y se encuentran en los anexos.

CAPÍTULO VIII RESULTADOS Y ANÁLISIS

VIII.1 Porcentajes de cobre en cada prueba

Para llevar a cabo la prueba, se tomaron porcentajes de cobre desde 0.1% a 3.38%. Esto con el fin de determinar varios aspectos para el procedimiento.

TABLA 2. Porcentaje de cobre en el precipitado húmedo previo a la pre-oxidación.

Precipitado húmedo		
Batch	Cu (%)	Cu (kg)
P1	2.19	15.35
P2	1.02	13.77
P3	3.38	16.92
P4	0.12	1.55
P5	0.65	7.58
P6	0.33	3.42
P7	1.81	14.31
P8	1.42	15.53

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

VIII.2 Recuperación de Au, Ag y Cu en %

Para realizar la prueba, el precipitado húmedo se dividió con el objetivo de comparar los resultados obtenidos. Cada uno identificado, para tomar en cuenta los precipitados que han sido previamente pre-oxidados.

VIII.2.1 Composición en el precipitado seco

Los porcentajes de Cu, Au y Ag luego del precipitado salir del horno de retorta son:

TABLA 3. Porcentajes de los metales en precipitado seco con NaNO₃.

Precipitado Seco con NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	8.71	3.94	16.45	0.78	1.22	2.98	1.22	6.79
Au	15.75	13.71	16.22	15.86	12.66	14.84	25.31	29.88
Ag	63.69	58.82	44.10	67.26	58.41	26.23	48.60	43.03

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 4. Porcentajes de los metales en precipitado seco sin NaNO₃.

Precipitado Seco sin NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	8.72	4.13	10.09	0.97	2.38	3.51	2.38	4.96
Au	15.73	13.29	17.77	15.86	29.06	18.23	22.59	25.39
Ag	63.74	57.28	47.76	64.93	51.77	33.12	44.75	33.14

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

VIII.2.2 Composición del bullón

Una vez finalizado el procedimiento, la muestra de cada producto es analizada por el laboratorio general para determinar la composición final.

TABLA 5. Resultados en el producto final con NaNO₃.

Producto final con NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	3.84	5.48	7.95	1.11	1.48	4.69	5.99	5.40
Au	19.49	17.48	25.01	18.46	17.74	34.78	31.81	39.18
Ag	76.62	76.73	66.83	79.70	80.29	60.14	61.63	55.09

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 6. Resultados en el producto final sin NaNO₃.

Producto final sin NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	8.04	5.76	12.10	1.06	1.80	4.58	6.07	6.59
Au	18.52	17.95	24.10	18.32	20.04	34.77	31.73	38.76
Ag	73.36	75.59	62.85	80.20	77.65	60.17	61.30	54.37

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

VIII.2.3 Composición en la escoria

Uno de los datos a tomar en cuenta, es la cantidad de dichos metales que ha sido enviada a la escoria al finalizar la fundición. Es de vital importancia para determinar si la prueba funciono, ya que el objetivo es enviar más cobre a la escoria realizando la prueba sin afectar de manera notable el oro y la plata.

TABLA 7. Porcentaje de metales oxidados enviados a la escoria con NaNO₃.

Escoria con NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	19.84	0.87	8.51	0.24	0.53	1.57	1.65	4.23
Au	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	0.85	0.09	0.43	0.15	0.14	0.00	0.12	0.19

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 8. Porcentaje de metales oxidados enviados a la escoria sin NaNO₃.

Escoria sin NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	19.35	1.14	4.46	0.23	0.45	1.25	1.46	2.98
Au	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Ag	2.94	0.14	0.13	0.20	0.12	0.00	0.11	0.25

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

VIII.2.4 Recuperación de los metales en el producto final

Tomando en cuenta los datos anteriores, se determina la recuperación de cobre, oro y plata para concluir de manera general con los resultados obtenidos.

TABLA 9. Diferencia de recuperación de cobre, oro y plata con NaNO₃

Recuperación con NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	29.00	93.00	49.00	91.00	85.00	66.10	80.90	70.20
Au	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ag	99.50	99.90	99.90	99.90	99.90	100.00	99.90	99.80

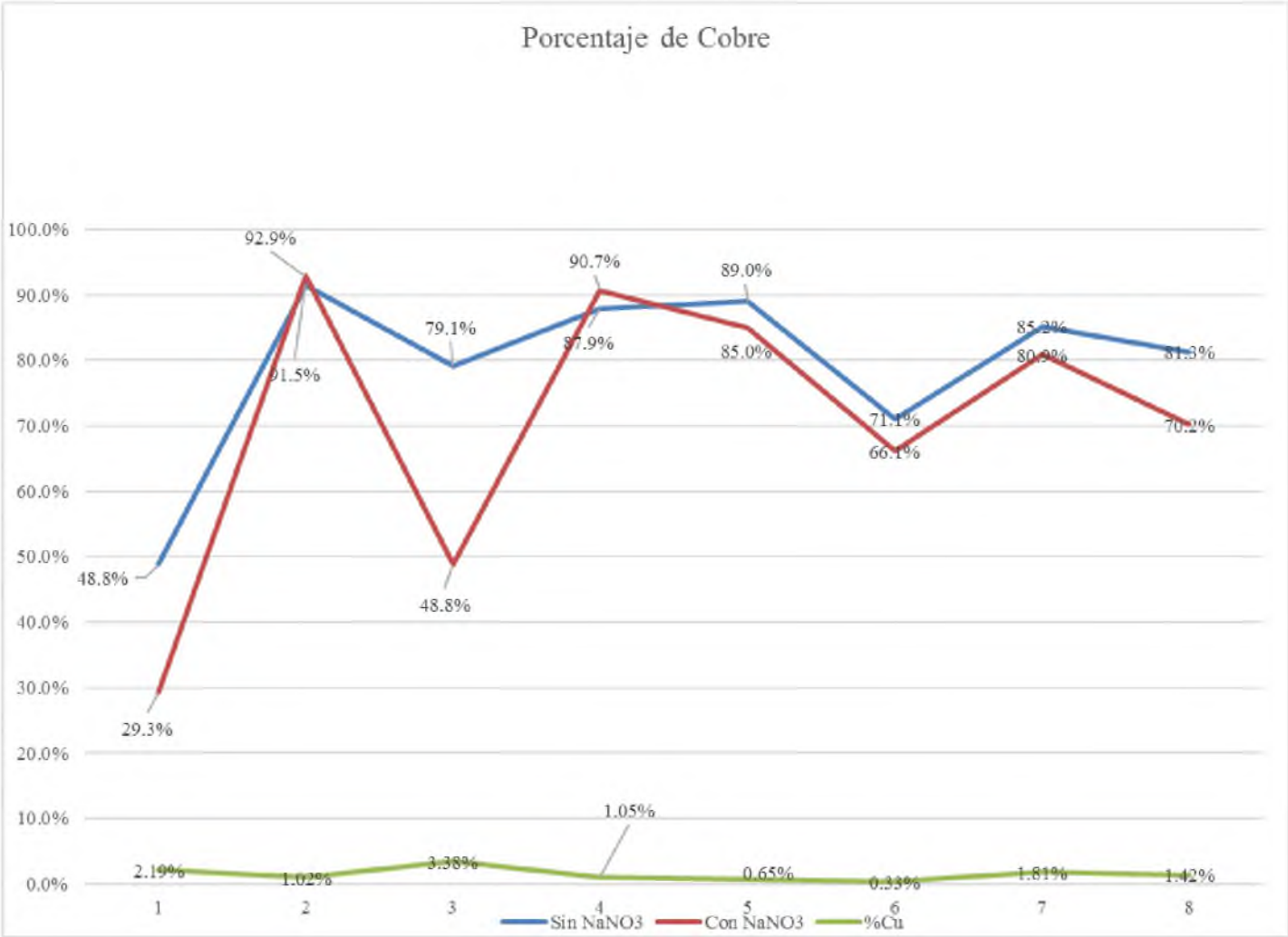
Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 10. Diferencia de recuperación de cobre, oro y plata con NaNO₃

Recuperación sin NaNO ₃ (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Cu	49.00	92.00	79.00	88.00	89.00	71.10	85.20	81.30
Au	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ag	98.20	99.90	99.40	99.90	99.90	100.00	99.90	99.80

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

FIGURA 3. Comportamiento de la recuperación de cobre frente a los distintos porcentajes.



Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

VIII.3 Impacto económico

Para realizar una estimación del impacto que genera una reducción de cobre en la barra, se aplica la penalización en la venta de esta, de un 20% de cobre como límite máximo de contaminación de dicho metal. Los datos utilizados con fines de comparar los escenarios presentados son limitados; estos y el precio por onza penalizado se reserva debido a asuntos de confidencialidad.

Los precios utilizados en estos cálculos son proyecciones realizadas para finales del 2020 en la República Dominicana: USD\$1,700 para el oro y USD\$25.00 para plata por el economista Henri Hebrard (Gómez, 2020).

TABLA 11. Datos de prueba para estimación.

kg	Au	Ag	Cu	Au Oz	Ag Oz	Cu Oz
400.25	35.34%	33.69%	33.08%	4547.93	4335.34	4256.31
460.25	31.56%	36.52%	32.81%	4670.65	5404.00	4855.02
270.25	27.84%	42.38%	29.52%	2418.77	3682.29	2564.66
500.25	28.80%	45.76%	24.98%	4632.50	7359.77	4017.15
550.25	23.14%	52.66%	23.68%	4094.04	9316.05	4189.22
350.25	21.14%	50.90%	28.31%	2380.20	5731.75	3187.37
435.60	22.10%	56.85%	21.28%	3094.80	7961.77	2980.38

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 12. Ganancias estimadas con la penalización debido a la contaminación de cobre.

Au \$	Ag \$	Cu \$ Penalización	Total
\$ 7,732,613.60	\$ 108,470.27	\$ 425.63	\$ 7,840,658.24
\$ 7,941,264.80	\$ 135,208.17	\$ 485.50	\$ 8,075,987.46
\$ 4,112,515.79	\$ 92,130.84	\$ 256.47	\$ 4,204,390.17
\$ 7,876,416.39	\$ 184,141.42	\$ 401.72	\$ 8,060,156.09
\$ 6,960,890.24	\$ 233,087.66	\$ 418.92	\$ 7,193,558.98
\$ 4,046,926.69	\$ 143,408.30	\$ 318.74	\$ 4,190,016.25
\$ 5,261,925.39	\$ 199,203.38	\$ 298.04	\$ 5,460,830.74

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 13. Estimación de la reducción de cobre metálico por pre-oxidación.

kg	Au	Ag	Cu	Au Oz	Ag Oz	Cu Oz
400.25	35.34%	58.70%	5.95%	5456.94	7554.27	766.13
460.25	31.56%	62.53%	5.91%	4690.43	9252.83	873.90
270.25	27.84%	66.85%	5.31%	2432.20	5808.33	461.64
500.25	28.80%	66.70%	4.50%	4613.98	10727.82	723.09
550.25	23.14%	72.60%	4.26%	4123.43	12842.85	754.06
350.25	21.14%	73.77%	5.09%	2433.20	8306.88	573.73
435.60	22.10%	74.07%	3.83%	3094.80	10373.60	536.47

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

TABLA 14. Ganancias estimadas sin penalización por contaminación de cobre.

Au \$	Ag \$	Total	Estimated Profits
\$ 9,278,170.34	\$ 189,007.93	\$ 9,467,178.28	\$ 1,626,520.04
\$ 7,974,910.57	\$ 231,505.86	\$ 8,206,416.42	\$ 130,428.96
\$ 4,135,341.97	\$ 145,324.42	\$ 4,280,666.39	\$ 76,276.22
\$ 7,844,926.47	\$ 268,410.02	\$ 8,113,336.49	\$ 53,180.40
\$ 7,010,859.38	\$ 321,328.11	\$ 7,332,187.49	\$ 138,628.51
\$ 4,137,050.97	\$ 207,838.07	\$ 4,344,889.04	\$ 154,872.79
\$ 5,261,925.39	\$ 259,547.54	\$ 5,521,472.93	\$ 60,642.19

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

VIII.4 Análisis de resultados

Para el análisis de las pruebas, se realizan comparaciones entre ellas con el fin de determinar los mejores resultados obtenidos entre las distintas técnicas utilizadas en el proceso.

VIII.4.1 Porcentaje de Cobre

La prueba 1 contiene un porcentaje de cobre metálico de 2.19% en el precipitado húmedo con una reducción del 40% luego de ser pre-oxidado. La prueba 4 contiene 0.12% y una reducción de 3% luego de la pre-oxidación.

Cuando no hay una cantidad relevante de cobre metálico en el precipitado húmedo, no es necesario pre-oxidar. El agente oxidante no actuará de manera significativa.

VIII.4.2 Mezclado

En la prueba 2, el contenido de cobre es de 1.02%, con una reducción de 1% luego de la pre-oxidación. En esta prueba se añaden los kilos estimados de nitrato de sodio en el fondo de la bandeja.

La prueba 5, con un contenido de cobre de 0.65%, logró reducir un 5% a pesar de no ser más alto el porcentaje del metal contaminante. Lo que difiere es la técnica de mezclado que se realiza en esta prueba, ya que hay más contacto entre las superficies y por ende, más reacción.

VIII.4.3 Exceso de agente oxidante

La reducción de cobre metálico en la primera prueba es de 40% para un contenido de 2.19%. En esta prueba se añade el nitrato de sodio estimado dividido entre las bandejas de pre-oxidación.

En la tercera prueba, se obtiene una reducción de 30% para un contenido de cobre metálico de 3.38%. En esta prueba, el nitrato de sodio estimado se añade directamente por bandeja y no distribuido entre ellas.

Un exceso de agente oxidante en la pre-oxidación puede ser utilizado en la obtención de buenos resultados. Es favorable en el aumento de contacto entre las superficies del agente oxidante y el precipitado húmedo.

VIII.5 Impacto económico y remediación ambiental

Como lo explica la metodología, cada prueba tiene dos tipos de fundiciones del mismo precipitado. Una fundición con nitrado de sodio desde el precipitado húmedo y la otra fundición sin pre-oxidar. Al comparar ambos datos obtenidos, podemos establecer los siguientes puntos:

El uso de este método nos garantiza una recuperación más baja de cobre. A menor concentración de Cu metálico en la barra doré, menor es la cantidad de pérdida de masa en la refundición, dando concentraciones de Au en % más altas.

Si el porcentaje de Au baja al momento de refundición, hay una pérdida de masa que afecta de igual forma las ganancias estimadas, ya que por más onzas de diferencia que exista entre lo recibido por el cliente y lo que obtiene al momento de refundir el producto, mayor será la pérdida en la venta. Por lo que es más conveniente tener más % de oro y plata y menos contaminación de un alto contenido de cobre.

Dentro del proceso previo a la fundición, existe el riesgo de emisión de mercurio. El precipitado húmedo proveniente de los filtros prensas, contiene mercurio. Para evitar la contaminación, los hornos de retorta (en los que se pre-oxida el precipitado húmedo) trabajando en gradientes de temperaturas en un rango de 580-620°C extrae el mercurio, transfiriéndose a un depurador con carbón activado impregnado de azufre. Se adhiere al carbón y se sublima para luego ser transferido a unos frascos denominados "flasks de mercurio", los cuales se almacenan para ser comercializados.

CUARTA PARTE

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IX CONCLUSIONES

El nitrato de sodio es un agente oxidante que tiene la capacidad de reducir la cantidad de cobre metálico, dando como resultado una fundición más estable, ya que dicho metal contaminante de la aleación deseada va de manera más eficiente a la escoria al realizar este procedimiento debido a la formación de óxido de cobre previo a la fundición.

Los resultados de cada prueba nos demuestran que una pre-oxidación del precipitado húmedo no afecta de manera significativa la recuperación de oro y plata. El oxígeno proporcionado por el nitrato de sodio no se difunde a través de dichos metales en estado sólido ya que el potencial de oxidación de ambos es lo suficientemente alto para evitar que el oxígeno pueda oxidarlos.

A menor concentración de cobre metálico en la barra, menor es la pérdida de masa en el refundido. La obtención de un menor porcentaje de cobre en el producto final garantiza menos impurezas, obteniendo leyes de oro más altas.

La contaminación de cobre afecta las ganancias que se obtienen por el hecho de que el producto que se comercializa en este caso es el contenido de oro y plata. Cuando la barra está contaminada con otros metales en porcentajes significativos, como es el caso del cobre, el contenido de interés se reduce y, por ende, su valor disminuye. Por lo que es más conveniente tener más % de oro y plata y la menor contaminación de cobre posible.

CAPÍTULO X RECOMENDACIONES

Añadir los kilos estimados de nitrato de sodio por bandeja y no por el peso total, ya que, al estar ambos productos en estado sólido, la reacción tiene una cinética de reacción más lenta y, por ende, una eficiencia más baja de la esperada. Añadiendo un exceso del agente oxidante, obtenemos una eficiencia más alta y mayor contacto entre los reactivos.

En la segunda prueba no se obtuvo una gran diferencia de recuperación ya que la forma de mezclado entre el precipitado y el nitrato de sodio no fue correcta, evitando un contacto adecuado entre los reactivos.

Aparte de un cálculo estequiométrico, se recomienda la mezcla apropiada del precipitado con el agente oxidante. Se adiciona la mitad de los kilos por bandeja, se mezcla y se repiten ambos pasos con lo que resta. De esta forma aseguramos un mayor contacto entre ambos productos y una mayor eficiencia en la reacción.

El porcentaje de cobre en la cuarta prueba es demasiado bajo (debajo del 1%), esta es la razón por la cual no hubo una reducción significativa en el producto final, ya que no había suficiente cobre disponible para ser oxidado. Realizar el procedimiento cuando se reporte que el porcentaje de cobre es mayor a 1%.

QUINTA PARTE

ANEXOS Y REFERENCIAS

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Libros

Ballester, A.; Verdeja, L.; Sancho, J. (2000). *Metalurgia Extractiva: Procesos de Obtención* Vol. II. Ed. Síntesis, España (pp. 42-49).

Embajada de Canadá en la República Dominicana (2015). *Manual Informativo sobre Minería* (p. IV, 2-10).

Marsden, J., & House, I. (2006). *The chemistry of gold extraction*. Littleton, Colorado. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (pp. 2-5, 90-92).

Parry, R. (1974). *Química, Fundamentos Experimentales*. Barcelona: Editorial Reverté (p. 561).

Szczygiel, S. (1984). *Metalurgia no ferrosa*. 1ª Ed.: Limusa México (p. 4-6).

Tesis

Hilario Vergara, K. y Mirano Goñas, R. (2017). *Influencia de la temperatura de fusión sobre la disminución del contenido de cobre en las barras doré en la fundición de precipitado electrolítico en CÍA. Minera Aurífera Santa Rosa S.A.* Universidad Nacional de Trujillo.

Webgrafía

Enciclopedia Britannica. (2020). *Plata | Datos, Propiedades, & Usos*. [Disponible en: <https://www.britannica.com/science/silver>]

García, I., Pérez, M., Samá, A. (2012). *Tratamiento de precipitados de oro con alto contenido de cobre, plomo y zinc*. [Disponible en: <http://www.cipimm.co.cu/revista-info/descargas/2-2012/ARTICULO-4-pp.30-38.pdf>]

ESGRAF. (2020). *Crisol de grafito, todo lo que tienes que saber*. [Disponible en: <https://www.esgraf.com.mx/crisol-de-granito-lo-que-tienes-que-saber/>]

Materiales de Laboratorio. (2020). *Crisol de Porcelana*. [Disponible en: <https://materialeslaboratorio.com/crisol-porcelana/>]

Artículos y Publicaciones

Aldebarán Sistemas S.L. *Aplicaciones y características del nitrato de sodio*. [Disponible en: <https://www.aldebaransistemas.com/aplicaciones-y-caracteristicas-del-nitrato-de-sodio/>] (2018).

García, I. (2015). *Fundición de precipitados del proceso Merrill Crowe*. [Disponible en: <http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015-Garcia-MIN6-P9.pdf>]

Gómez, D. (2020). *Valor de exportaciones oro aumenta 22.4% entre enero y marzo 2020*. [Disponible en: <https://www.eldinero.com.do/105134/valor-de-exportaciones-oro-aumenta-22-4-entre-enero-y-marzo-2020-a-pesar-de-que-volumen-cayo-42-5/>]

Habashi, F. (1967). *Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution*. Montana College of Mineral Science and Technology.

Havlik, T.; Skrobian, M. (1990). *Acid leaching of chalcocopyrite in presence of ozone*. Canadá (pp. 29).

International Commodity Traders. (2020). *Metales Precios (Bullón De Oro & Barra De Oro)*. [Disponible en: <https://www.intercomtraders.com/precious-metals>]

Autor desconocido. (2018). *Aprueban explotar mina de oro en San Juan*. Listín Diario. [Disponible en: <https://listindiario.com/economia/2018/01/22/499663/aprueban-explotar-mina-de-oro-en-san-juan>]

Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Producción Minera Dominicana*. [Disponible en: <https://eitird.mem.gob.do/informe-eiti-rd/produccion-y-exportacion/produccion-minera-dominicana/>]

Romero, A.; Flores, S. (2009). *Obtención de metales preciosos a partir de residuos sólidos mineros o relaves*. Revista de la facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. [Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81620149007.pdf>]

Salinas, A.; Rivera, I. (2004). *Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la pre-oxidación de minerales sulfurosos con ozono*. Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0583-76932004000400021&script=sci_arttext]

Servicios de Acento. (2021). *En San Juan esperan resultados ambientales para determinar explotación de oro*. [Disponible en: <https://acento.com.do/ecologia/en-san-juan-esperan-resultados-ambientales-para-determinar-explotacion-de-oro-8909366.html>]

Santos, V. (2020). *Barrick-Pueblo Viejo y la presa de colas en Yamasá*. [Disponible en: <https://almomento.net/barrick-pueblo-viejo-y-la-presa-de-colas-en-yamasa/>]

Dirección de comunicación estratégica. (2020). *Ministro de Energía y Minas: aprobación presa de cola a Barrick Gold dependerá de estudio impacto ambiental*. [Disponible en: <https://cdeee.gob.do/cdeeesite/ministro-de-energia-y-minas-aprobacion-presa-de-cola-a-barrick-gold-dependera-de-estudio-impacto-ambiental/>]

ANEXOS

CAPÍTULO XI ANEXOS

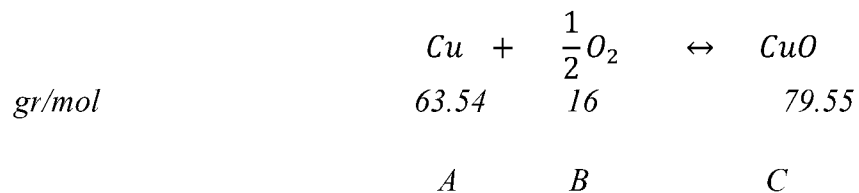
XI.1 Prueba 2

TABLA 15. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	1.346
% humedad	55.66
ppm Hg	90.5
% Cu	1.023
Cu en precipitado húmedo (kg)	13.77
Peso de agua perdido (kg)	749.1836
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.116
Peso de precipitado seco (kg)	597
% Cu en precipitado seco	2.31

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO₃ como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.1.2 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



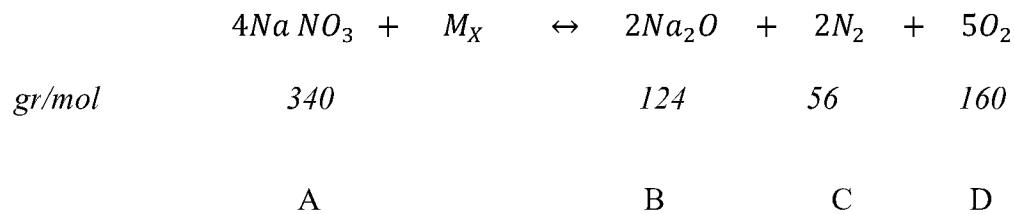
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 2.31\% \times 597 \text{ kg} = 13.77 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{13.77 \text{ kg} \times 16 \text{ moles } O_2}{63.54} = 3.47 \text{ kg}$$

X.1.3 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{3.47 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 7.4 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(7.4 \text{ kg } NaNO_3)}{(597 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 1.2\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(7.4 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 3.7 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(3.7 \text{ kg } NaNO_3)}{(597 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.6\% NaNO_3$$

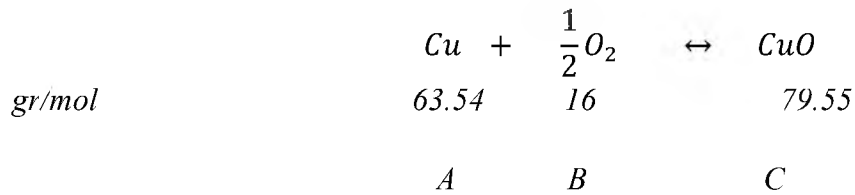
XI.2 Prueba 3

TABLA 16. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	500
% humedad	50.01
ppm Hg	518
% Cu	3.384
Cu en precipitado húmedo (kg)	16.92
Peso de agua perdido (kg)	250.05
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.246
Peso de precipitado seco (kg)	250
% Cu en precipitado seco	6.78

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.2.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



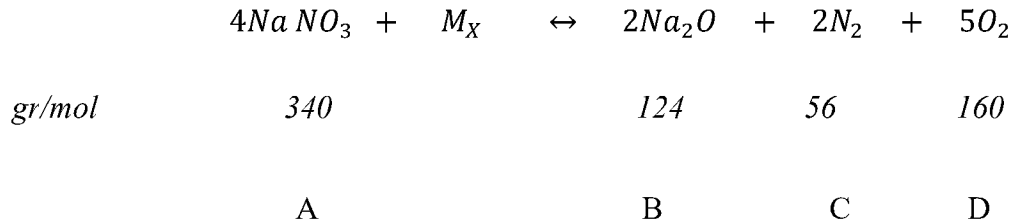
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 6.78\% \times 250 \text{ kg} = 16.92 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{16.92 \text{ kg} \times 16 \text{ moles O}_2}{63.54} = 4.26 \text{ kg}$$

XI.2.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{4.26 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 9.1 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(9.1 \text{ kg } NaNO_3)}{(250 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 3.6\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(9.1 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 4.5 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(4.5 \text{ kg } NaNO_3)}{(250 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 1.8\% NaNO_3$$

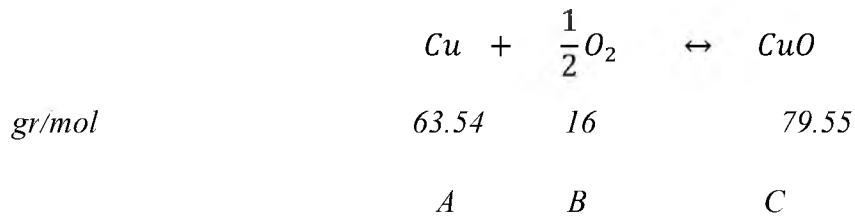
XI.3 Prueba 4

TABLA 17. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	1,240
% humedad	71.30
ppm Hg	60.4
% Cu	2.196
Cu en precipitado húmedo (kg)	27.23
Peso de agua perdido (kg)	884.12
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.071
Peso de precipitado seco (kg)	356
% Cu en precipitado seco	7.65

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.3.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



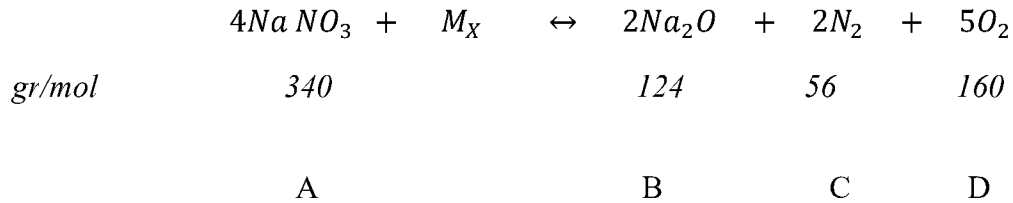
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 0.42\% \times 356 \text{ kg} = 1.49 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{1.49 \text{ kg} \times 16 \text{ moles O}_2}{63.54} = 0.37 \text{ kg}$$

XI.3.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{0.37 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 0.8 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(0.8 \text{ kg } NaNO_3)}{(356 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.2\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(0.8 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 0.4 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(0.4 \text{ kg } NaNO_3)}{(356 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.1\% NaNO_3$$

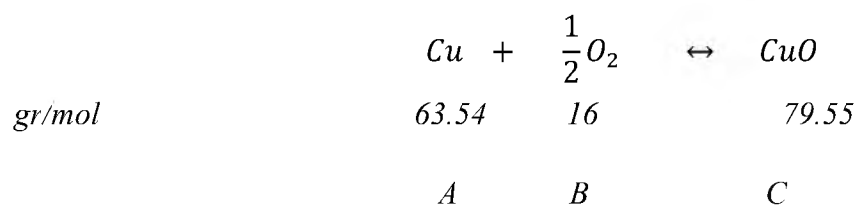
XI.4 Prueba 5

TABLA 18. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	1,169
% humedad	72.33
ppm Hg	81.2
% Cu	0.650
Cu en precipitado húmedo (kg)	7.60
Peso de agua perdido (kg)	845.5377
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.090
Peso de precipitado seco (kg)	323
% Cu en precipitado seco	2.35

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.4.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



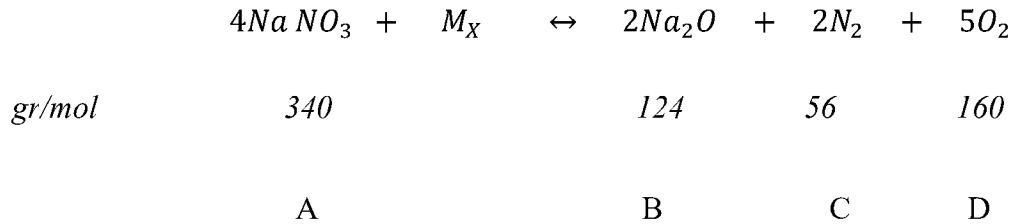
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 2.35\% \times 323 \text{ kg} = 7.60 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{7.60 \text{ kg} \times 16 \text{ moles O}_2}{63.54} = 1.91 \text{ kg}$$

XI.4.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{1.91 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 4.1 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(4.1 \text{ kg } NaNO_3)}{(323 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 1.3\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(4.1 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 2.05 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(2.05 \text{ kg } NaNO_3)}{(323 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.6\% NaNO_3$$

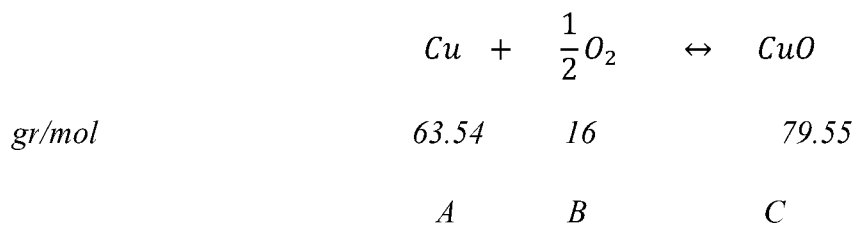
XI.5 Prueba 6

TABLA 19. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	1,027
% humedad	71.14
ppm Hg	29.1
% Cu	0.333
Cu en precipitado húmedo (kg)	3.42
Peso de agua perdido (kg)	730.6078
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.028
Peso de precipitado seco (kg)	296
% Cu en precipitado seco	1.15

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.5.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



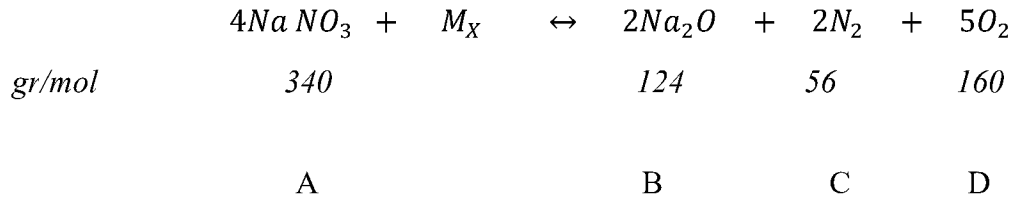
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 1.15\% \times 296 \text{ kg} = 3.42 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{3.42 \text{ kg} \times 16 \text{ moles O}_2}{63.54} = 0.86 \text{ kg}$$

XI.5.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{0.86 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 1.8 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(1.8 \text{ kg } NaNO_3)}{(296 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.6\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(1.8 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 0.9 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(0.9 \text{ kg } NaNO_3)}{(296 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.3\% NaNO_3$$

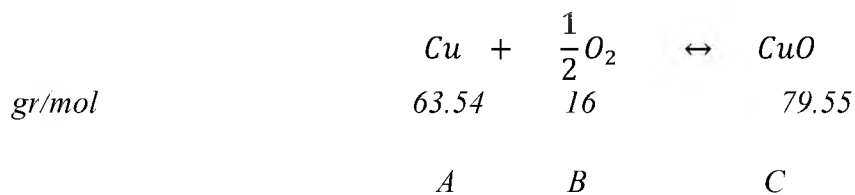
XI.6 Prueba 7

TABLA 20. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	790
% humedad	64.89
ppm Hg	80.8
% Cu	1.812
Cu en precipitado húmedo (kg)	14.31
Peso de agua perdido (kg)	512.631
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.061
Peso de precipitado seco (kg)	277
% Cu en precipitado seco	5.16

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.6.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



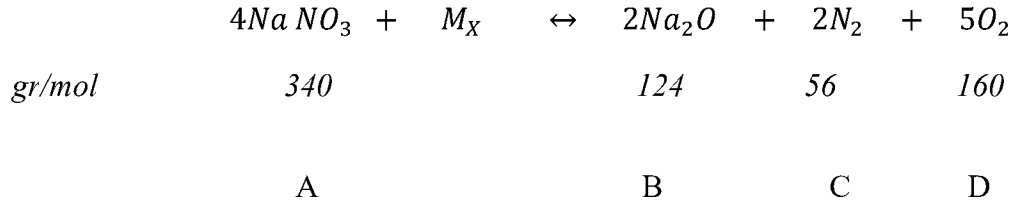
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 5.16\% \times 277 \text{ kg} = 14.31 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{14.31 \text{ kg} \times 16 \text{ moles O}_2}{63.54} = 3.60 \text{ kg}$$

XI.6.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{3.60 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 7.7 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(7.7 \text{ kg } NaNO_3)}{(277 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 2.8\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(7.7 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 3.8 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(3.8 \text{ kg } NaNO_3)}{(277 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 1.4\% NaNO_3$$

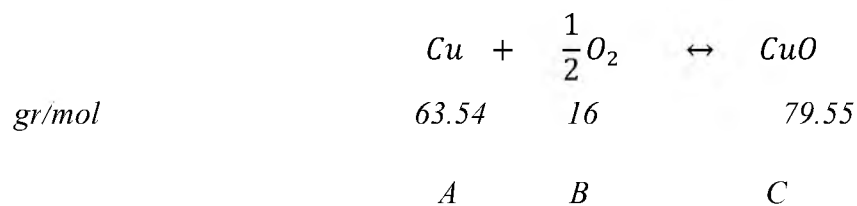
XI.7 Prueba 8

TABLA 21. Resultados de precipitado húmedo y precipitado seco.

Peso de precipitado húmedo (kg)	1.090
% humedad	58.32
ppm Hg	12.3
% Cu	1.425
Cu en precipitado húmedo (kg)	15.53
Peso de agua perdido (kg)	635.688
Hg removido -95% eliminado (kg)	0.013
Peso de precipitado seco (kg)	454
% Cu en precipitado seco	3.42

Fuente: Cruz, K., Hernández, A. (2020). “Reducción del porcentaje de cobre metálico en aleación de oro y plata utilizando NaNO_3 como agente oxidante en un proceso minero”.

XI.7.1 Cantidad de oxígeno para oxidar el cobre



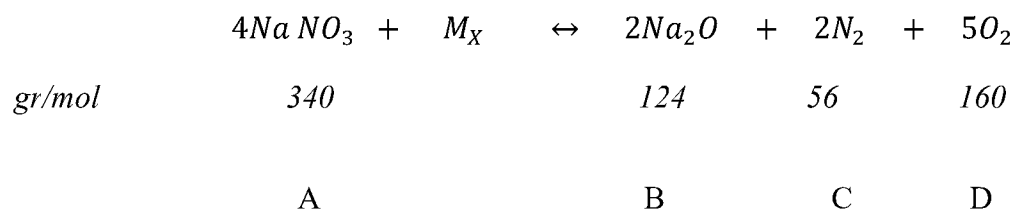
- kg de cobre metálico en el precipitado húmedo

$$A = 3.42\% \times 454 \text{ kg} = 15.53 \text{ kg Cu}$$

- Oxígeno necesario para oxidar el cobre metálico

$$B = \frac{15.53 \text{ kg} \times 16 \text{ moles O}_2}{63.54} = 3.91 \text{ kg}$$

XI.7.2 Cantidad de nitrato de sodio (oxígeno presente) para oxidar al cobre metálico



- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición

$$A = \frac{3.91 \text{ kg } O_2 \times 340 \text{ moles } NaNO_3}{160 \text{ moles } O_2} = 8.3 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para oxidar el cobre metálico en la fundición expresado en %

$$\frac{(8.3 \text{ kg } NaNO_3)}{(454 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.9\% NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado

$$(8.3 \text{ kg } NaNO_3)(0.5) = 4.15 \text{ kg } NaNO_3$$

- Nitrato de sodio para pre-oxidar el cobre metálico en el secado del precipitado expresado en %

$$\frac{(4.15 \text{ kg } NaNO_3)}{(454 \text{ kg precipitado seco})} \times 100\% = 0.9\% NaNO_3$$

ANEXO 9. Glosario

Agente Oxidante: sustancia que causa oxidación en otras sustancias en reacciones electroquímicas o de reducción y oxidación.

Autoclave: Recipiente metálico de cierre hermético que funciona como una gran olla de presión para la oxidación de los sulfuros presentes en el mineral.

CIL: Carbón en lixiviación. Proceso de extracción de oro por el cual se usa cianuro como solvente y el oro en solución es adsorbido por carbón activada.

Crisol: contenedor cóncavo que se usa para depositar elementos o sustancias que deben ser sometidos a altas temperaturas, a fin de producir cambios en su estado físico.

Destrucción de Cianuro: Proceso por el cual se oxida el cianuro libre dando la formación a cianatos.

Doré: Es el nombre comercial con el que se conoce a una aleación del oro y la plata convertida en una barra de entre 100 a 120 kilos de peso.

Escoria: son un subproducto de la fundición de la mena para purificar los metales.

Espesador: Es un equipo para la separación de sólido – líquido que sedimenta las partículas sólidas a una concentración deseada.

Fundente: es un producto químico usado en proceso de soldar y en la fabricación de placas y otros componentes electrónicos.

Horno de fundición: maquina usada para crear metales a partir de su forma mineral.

Lixiviación: Proceso por el cual se extrae un material soluble de una mezcla a través del uso de un solvente líquido (cianuro de sodio en este caso).

Molino SAG: El molino semiautógeno es un equipo usado en plantas mineras para moler rocas de mineral para reducir su tamaño y hacerlo apto para las etapas siguientes de procesamiento de dicho mineral.

Preg-Robbing: cuando algún material de carbono microscópico en el mineral compite con el carbón activado para adsorber el oro fuera de la solución de cianuro, y prevenir la recuperación, que se denomina preg-robbing.

Relave: Lodo sin oro o plata que queda tras el proceso de extracción de metales de interés.

Retorta: es un recipiente que sirve para destilar el mercurio, mientras la amalgama se quema.

Zaranda: recipiente grande con una tela, chapa o tejido con agujeros que sirve para limpiar un material o mezcla de materiales que tenga partículas de distintos tamaños.

SUSTENTATES

Katherine Cruz Pérez

Anne S. Hernandez Ferreira

ASESORES

Dr. Ramón A. Sánchez Rosario

Ing. Doris M. Peña Calderón

Asesor

Asesora

JURADOS

Jurado

Jurado

Jurado

Calificación: _____

Fecha: _____

Ing. Doris Peña Calderón
Directora Escuela de Química