

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA.

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**EXTRACCIÓN DE ORO DEL MINERAL AURÍFERO POR LIXIVIACIÓN EN
COLUMNAS CON REACTIVOS BROMURO DE POTASIO Y ÁCIDO
BROMHÍDRICO EN LA UNIDAD MINERA UTUNSA – ANABI -HAQUIRA
APURÍMAC**

(Investigación Tecnológica)

PRESENTADO POR:

- **Bach. ARMINTA QJEUARUCHO, Luzmarina**
- **Bach. VARGAS HUAMAN, Danny Nelson**

Para optar al título profesional de INGENIERO METALÚRGICO.

ASESOR: Dr. Ing. CAMERO HERMOZA, PEDRO

CUSCO – PERU

2022

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO.

SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO

En cumplimiento al Reglamento de Grados y Títulos vigentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ponemos a vuestra disposición el trabajo de investigación intitulada:

EXTRACCIÓN DE ORO DEL MINERAL AURÍFERO POR LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS CON REACTIVOS BROMURO DE POTASIO Y ÁCIDO BROMHÍDRICO DE LA UNIDAD MINERA UTUNSA – ANABI – APURÍMAC.

El propósito del presente trabajo de investigación tecnológica tiene como objetivo, investigar una posibilidad tecnológica de extraer oro mediante lixiviación en columnas del mineral aurífero de la Cia Minera Anabí de la unidad Utunsa –Apurímac, con el uso de los reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico.

Arminta Qjehuarucho, Luzmarina

Vargas Huamán, Danny Nelson

RESUMEN

La Unidad minera Utunsa – Anabi S.A.C ubicada en Apurímac posee una mina de tajo abierto de mineral oro, este mineral de oro ingresa a un proceso de lixiviación por cianuración en pilas para extraer el complejo cianuro-oro utilizando el método riego por goteo, esta solución lixiviada es drenada hacia el pozo PLS, posteriormente esta solución enriquecida, es bombeada hacia la planta Merrill Crowe para su recuperación y refinación del oro.

Mediante este estudio de investigación se evaluó la factibilidad de lixiviación en columnas con uso de reactivos ácido bromhídrico y bromuro de potasio como nuevo proceso alternativo para extraer oro del mineral aurífero. Para lo cual se realizó a nivel de laboratorio pruebas con un diseño factorial 2^3 con puntos centrales, de acuerdo a las pruebas preliminares realizadas se pudo establecer que las variables de mayor influencia son: tamaño de partícula, concentración de reactivo lixivante y tiempo de lixiviación variables que han sido de mayor significancia para realizar las pruebas en columnas.

De acuerdo a los resultados obtenidos la mejor extracción de oro fue de 87.09% con un consumo de 0.132 Kg/TM del reactivo lixivante, donde las variables que tienen más influencia fueron tamaño de partícula $\frac{1}{2}$ ", concentración del agente lixivante 20 g/L y tiempo de lixiviación 15 días. El modelo matemático a partir de los resultados es $Y\%$ de extracción de oro = $86.3 - 19.2 A - 1.864 B - 1.61 C + 1.64 A*B + 1.49 A*C + 0.2111 B*C - 0.126 A*B*C$.

Palabras claves: **Lixiviación en Columnas, % extracción del oro, ácido bromhídrico y bromuro de potasio**

ABSTRACT

The Utunsa – Anabi S.A.C mining unit located in Apurímac has an open pit gold ore mine, this gold ore enters a heap cyanidation leaching process to extract the cyanide-gold complex using the drip irrigation method, this solution Leachate is drained to the PLS well, then this enriched solution is pumped to the Merrill Crowe plant for gold recovery and refining.

Through this research study, the feasibility of column leaching using hydrobromic acid and potassium bromide reagents was evaluated as a new alternative process to extract gold from gold ore. For which a level of laboratory tests was carried out with a 2^3 factorial design with central points, according to the preliminary tests carried out, it was possible to establish that the variables with the greatest influence are: particle size, concentration of leaching reagent and time of leaching variables that have been of greater significance to carry out the tests in columns.

According to the results obtained, the best gold extraction was 87.09% with a consumption of 0.132 Kg/MT of the leaching reagent, where the variables that had the most influence were particle size $\frac{1}{2}$ ", concentration of the leaching agent 20 g/L and leaching time 15 days. The mathematical model from the results is $Y\% \text{ gold extraction} = 86.3 - 19.2 A - 1.864 B - 1.61 C + 1.64 A*B + 1.49 A*C + 0.2111 B*C - 0.126 A*B*C$.

Keywords: Column Leaching, % gold extraction, hydrobromic acid and potassium bromide

INTRODUCCION

Los nuevos retos que afronta la minería- extractiva del oro a nivel mundial, es la obtención del metal precioso de manera económica eficiente y ambientalmente amigable, situación que se ha vuelto cada vez más crítica en las últimas décadas, debido a diversos factores, como el uso de cianuro y mercurio de forma convencional para la extracción del oro siendo ambientalmente contaminantes.

Esta condición ha obligado a impulsar nuevas tecnologías con mayor intensidad y frecuencia, la búsqueda de otras fuentes para su obtención del oro. Para tratar los minerales auríferos se han revisado y discutido extensamente varios métodos, los cuales pueden resumirse en someter al mineral en cuestión a un pretratamiento, por ejemplo: la tostación oxidante seguida por su lixiviación con cianuro o bien, una oxidación a presión en autoclave, antes de extraer los metales preciosos. Principalmente por esto, es que, en los últimos años, un buen número de posibilidades se han evaluado e incluso retomado trabajos de investigación, entre los cuales se encuentran las alternativas de tratamiento de minerales de oro por lixiviación como: **tiocianato, tiosulfato amoniaco, tiourea, halógenos y amoniaco.**

El uso del bromo, se considera por algunas universidades de los Estados Unidos, como una alternativa bastante atractiva, ya que es menos tóxico que el cianuro, es más barato y de fácil regeneración.

Por ende, esta investigación tecnológica por el proceso de lixiviación en columna con reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico es para conocer el máximo porcentaje de extracción del oro y alternativa de reemplazo al uso del cianuro, mediante una investigación de método experimental de diseño factorial 2^3 .

DEDICATORIA I

Dedico esta tesis a DIOS como principal impulso, quien inspiró mi espíritu para la conclusión de esta tesis y sobre todo haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres Segundo y María, quienes me dieron vida, educación, apoyo, consejos y sin duda alguna paciencia. A mis hermanas Lourdes y Raquel quienes actuaron como una segunda madre cuando lo necesité. Por confiar y creer en mí.

A mi compañero de vida, mi esposo Pabel y mi amado hijo Níkola, quienes fueron y son un pilar fundamental para continuar y no rendirme en este largo camino de la vida.

A mis compañeros de estudio, mis docentes, nuestro asesor, amigos, quienes nos prestaron su ayuda y tiempo en algún momento del proceso de la elaboración de esta tesis.

Arminta Qjehuarucho, Luzmarina

DEDICATORIA II

Con mucho cariño a mi madre Melchora Huaman Ttito, quien se merece todo, me enseñó que con perseverancia, esfuerzo y sacrificio todo es recompensado. A mi padre Vargas Miranda, Modesto, que desde el cielo siempre me protegerá y me guiará para seguir adelante junto a mis hermanos, en mi corazón llevo todos sus consejos y a su apoyo incondicional que me compartió en vida, por el ejemplo la responsabilidad, esas ganas de seguir adelante y creciendo profesionalmente, a mis hermanos Gabriel y Francisco por su paciencia, por ser mi compañeros y amigos durante casi toda mi vida. A mis tíos quienes depositaron toda su confianza en mí y mis primos quienes estuvieron siempre.

A mis amigos que el destino y la vida me regaló con quienes compartí tantas aventuras y un sin fin de anécdotas, quienes dieron sentido a la palabra amistad e hicieron de la universidad una de mis mejores etapas.

Y por último y no menos importante, a mis docentes, personas de gran sabiduría, quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro.

Vargas Huaman, Danny Nelson

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por sus bendiciones, de habernos guiado en este camino, a nuestra Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, en sus aulas fuimos formados y fueron testigos de muchas anécdotas.

A nuestro Asesor: Dr. Ing. Pedro Camero Hermoza, por su gran aporte en la ejecución de este trabajo de investigación, por sus sabios consejos, por su paciencia, quien gracias a su gran experiencia profesional supo encaminar el desarrollo de este trabajo.

A nuestros docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes han sido fundamental en nuestra formación, por sus sabios consejos y enseñanza que nos permitió desarrollar las capacidades que se esconden en cada uno de nosotros, por brindarnos el tesoro más grande que existe, la educación universitaria.

A todas esas personas que directa e indirectamente nos apoyaron con el desarrollo de este trabajo, hasta su finalización y podamos concluir exitosamente esta etapa que será inolvidable llamada vida universitaria.

MUCHAS GRACIAS.

INDICE

PRESENTACIÓN	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
INTRODUCCION	IV
DEDICATORIA I	V
DEDICATORIA II.....	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
INDICE	VIII
LISTA DE TERMINOS Y SIMBOLOS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABLAS	XVIII

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION

1.1 Planteamiento del Problema	1
1.1.1. Situación Problemática.....	1
1.2 Formulación del Problema.....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	2
1.3 Justificación de la Investigación.....	2
1.3.1. Socio-Económica	2
1.3.2. Social.....	3

1.3.3. Ambiental	3
1.3.4. Tecnológico	4
1.4 Limitaciones de estudio	4
1.5 Objetivos de la Investigación	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	5

CAPITULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Antecedentes de la investigación.....	6
2.1.1. Antecedentes locales	6
2.1.2. Antecedente Nacional	8
2.1.3. Antecedentes internacionales	9
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1. El oro	10
2.2.2. Principios de la hidrometalurgia del oro	13
2.2.3. Diagrama de Marcel Pourbaix.....	23
2.2.4. Cinética De Reacción	26
2.2.5. Modelado de cinética	27
2.2.6. Factor de partícula en sistemas sólido-líquido	29
2.2.7. Lixiviación del oro	29
2.2.8. Métodos de lixiviación	30

2.2.9.	Método tradicional de lixiviación: Cianuración.....	35
2.2.10.	Métodos alternativos.....	37
2.2.11.	Uso de halógenos.....	45
2.2.12.	Generalidades sobre el uso de bromo como agente lixivante.....	54
2.2.13.	Descripción Proceso	62
2.2.14.	Peróxido de hidrogeno.....	67
2.2.15.	Efecto del ion común.....	68

CAPITULO III
HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1	Hipótesis y Variables.....	69
3.1.1.	Hipótesis general.....	69
3.1.2.	Hipótesis específicas	69
3.2	Identificación de variables e indicadores.....	69
3.2.1.	Variable dependiente.....	69
3.2.2.	Variables independientes.....	69
3.2.3.	Variables Intervinientes.....	70
3.2.4.	Indicadores	70
3.3	Operacionalización de variables.....	71

CAPITULO IV
METODOLOGÍA

4.1	Ámbito del estudio.....	72
-----	-------------------------	----

4.1.1.	Ubicación Geográfica De La Unidad Minera Utunsa-Anabi	72
4.1.2.	Mineralización.....	73
4.1.3.	Sistema de lixiviación	75
4.2	Diseño de investigación.....	76
4.2.1.	Tipo de Investigación	78
4.2.2.	Método de Investigación	78
4.2.3.	Nivel de Investigación.....	80
4.3	Población de estudio.....	80
4.3.1.	Tamaño de muestra	80
4.3.2.	Técnicas e instrumentos de recolección de información o datos	80

CAPITULO V
PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

5.1	Muestreo	81
5.1.1.	Preparación de muestras representativas.....	81
5.1.2.	Muestra representativa para pruebas preliminares.....	83
5.1.3.	Muestra Representativa para Carguío de Columnas de Lixiviación.....	84
5.1.4.	Homogenización y cuarteo de Muestras	84
5.2	Pruebas Preliminares	86
5.2.1.	Análisis mineralógico.....	86
5.2.2.	Análisis químico de la muestra	91
5.2.3.	Determinación de porcentaje de humedad, pH natural	91

5.2.4.	Determinación de la gravedad específica.....	92
5.2.5.	Prueba Flash de Lixiviación.....	95
5.2.6.	Prueba de botella.....	97
5.3	Prueba experimental.....	102
5.3.1.	Prueba en Columnas.....	102

CAPITULO VI

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1	Diseño factorial 2^3 con puntos centrales con Minitab.	130
6.1.1.	Representación geométrica de las combinaciones	131
6.2	Cálculo de efectos.....	132
6.3	Análisis de varianza.....	134
6.4	Modelo matemático	136
6.5	Análisis de residuos	138
6.6	Análisis de correlaciones múltiple.....	140
6.7	Análisis de reportes gráficos.....	143
6.8	Discusión De Resultados.....	148
CONCLUSIONES.....		150
RECOMENDACIONES.....		152
BIBLIOGRAFIA.....		153
ANEXOS.....		158

LISTA DE TERMINOS Y SIMBOLOS

g/ L: Gramos por litro

g/t: Gramos por tonelada

E= Potencial de reducción

m = Metro

cm = Centímetros

E° = Potencial de reducción estándar

μm = Micrones

ppm: Partes por millón

g: Gramos

G.E: Gravedad Específica

h: Hora

Kg: Kilogramo

l: Litro

V: Voltaje

kJ: kilojoule

J: Joule

ml: Mililitro

pH: Potencial de Hidrógeno

PLS: Pregnant leaching solution

Br: Bromo

HBr: Ácido Bromhídrico

KBr: Bromuro de Potasio

NaBr: Bromuro de sodio

CN: Cianuro

Oz: Onzas

SA: Sílice Alunita

SG: Sílice Granular

SM-1: Sílice Masiva 1

SM-2: Sílice Masiva 2

SO₂: Dióxido de azufre

Tm: Tonelada métrica

REDOX: Reacción de oxidación-reducción

GEOBROM: Bromuro de Sodio nombre comercial

ΔG° : Variación de energía libre

ΔH : Cambio de entalpía

DBDmH: Dibromo-dimetil- hidantoina

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oro con cuarzo zona de Brasil.....	11
Figura 2 Clasificación de yacimientos auríferos.....	12
Figura 3 Diagrama Eh-pH Metal/Agua.....	24
Figura 4 Rangos indicativos de Eh-pH empleados en procesos industriales de extracción de oro.....	25
Figura 5 Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea.....	27
Figura 6 Alternativas de disolución de oro	30
Figura 7 Esquema del proceso de lixiviación In-Situ	31
Figura 8 Esquema del proceso de Lixiviación en Botadero.....	32
Figura 9 Esquema del proceso de Lixiviación en Bateas.....	33
Figura 10 Esquema del proceso de Lixiviación en Bateas.....	34
Figura 11 Representación de una lixiviación en pilas.....	35
Figura 12 a) Representación esquemática de la celda de corrosión local en una superficie de oro.....	37
Figura 13 b) Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema Au – H ₂ O – CN ⁻ a 25°C).....	37
Figura 14 Mecanismo electroquímico para la lixiviación de oro en una solución de tiosulfato.....	39
Figura 15 Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-NH ₃ -S ₂ O ₃ -H ₂ O a 25°C,.....	39
Figura 16 Mecanismo de reacción electroquímica de la lixiviación de oro con tiourea.....	41
Figura 17 Diagrama Eh-pH para la formación de complejos de oro en solución de tiourea	41
Figura 18 Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-SCN-H ₂ O a 25°C,	42
Figura 19 Modelo del mecanismo electroquímico-catalítico de la lixiviación del oro en solución amoniacal y sales de amonio.....	44
Figura 20 Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-Cl-H ₂ O a 25°C	46
Figura 21 Diagrama eh-pH de complejos de oro en medios de yoduro.....	47
Figura 22 Mecanismo electroquímico de lixiviación de yoduro de oro.....	48
Figura 23 Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-Br-H ₂ O a 25°C	50

Figura 24 Es un diagrama de flujo que indica las reacciones químicas clave que ocurren en cada etapa del proceso.....	65
Figura 25 Lixiviación de mineral de Jerooy - Bromuro vs Cianuro	67
Figura 26 Ubicación geográfica de la Unidad minera Utunsa	73
Figura 27 Alteraciones mineralógicas por el tipo de mineral de Utunsa	74
Figura 28 Apilamiento de mineral por montones Pad lixiviación	75
Figura 29 Diagrama de la metodología para el tema de investigación de lixiviación de oro con HBr y KBr	76
Figura 30 Diagrama del proceso experimental	79
Figura 31 Muestra de mineral 100 Kg	81
Figura 32 Muestreo de mineral aurífero	82
Figura 33 Esquema de distribución de muestras cuarteadas para el procedimiento experimental.....	85
Figura 34 Material cuarteado y registrado para pruebas en columna	86
Figura 35 Fotografía (b)microscopio electrónico de barrido	88
Figura 36 Fotografía (a)microscopio electrónico de barrido	88
Figura 37 Fotografía (c)microscopio electrónico de barrido	89
Figura 38 Fotografía (e)microscopio electrónico de barrido	89
Figura 39 Fotografía (e)microscopio electrónico de barrido	89
Figura 40 Fotografía (f)microscopio electrónico de barrido.....	89
Figura 41 Ley de cabeza de mineral de oro	91
Figura 42 Procedimiento para determinación de la gravedad específica.....	92
Figura 43 Esquema del procedimiento para prueba flash	95
Figura 44 Prueba flash en unidad minera Utunsa	97
Figura 45 Esquema del procedimiento de para determinar la cinética de lixiviación.....	98
Figura 46 Reactivo ácido bromhídrico y bromuro de potasio.....	100

Figura 47 Cinética de lixiviación de prueba en botella.....	102
Figura 48 Estructura metálica armada para proceso de lixiviación en columna.....	104
Figura 49 Titulación de solución lixivante	105
Figura 50 Muestras codificadas y almacenadas para laboratorio.....	107
Figura 51 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°1	108
Figura 52 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°2.....	110
Figura 53 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°3.....	112
Figura 54 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°4.....	114
Figura 55 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°5.....	116
Figura 56 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°6.....	118
Figura 57 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°7.....	120
Figura 58 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°8.....	122
Figura 59 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°9.....	124
Figura 60 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°10.....	126
Figura 61 Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°11.....	128
Figura 62 Resumen de las curvaturas de cinética de extracción del oro.....	130
Figura 63 Representación geométrica de las variables en 2 ³ puntos centrales	132
Figura 64 Efectos principales para la extracción de oro	134
Figura 65 Grafica de optimización de las tres variables para el modelo.....	140
Figura 66 Diagrama de Pareto estandarizado para la extracción del oro	144
Figura 67 Grafica de interacciones para el porcentaje de extracción del oro	144
Figura 68 Superficie de % extracción vs concentración y tiempo	145
Figura 69 Contorno de % de extracción vs tamaño de partícula y concentración	145
Figura 70 Contorno de % de extracción vs concentración y tiempo.....	146
Figura 71 Contorno de % de extracción vs tamaño de partícula y tiempo.....	146

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Constantes de estabilidad para complejos seleccionados de Au (I) y Au (III)	17
Tabla 2	Datos termodinámicos seleccionados para especies de oro	20
Tabla 3	Potenciales de reducción estándar seleccionados	22
Tabla 4	Resumen de potenciales estándar para parejas de oro seleccionadas en soluciones acuosas.....	23
Tabla 5	Pruebas experimentales para pasos de control de velocidad en reacciones líquido-sólido.....	29
Tabla 6	Comparación de resultados de prueba de lixiviación con HBr y KBr	66
Tabla 7	Tabla de operacionalización de variables	71
Tabla 8	Accesos vía terrestre a la mina.....	72
Tabla 9	Plan de pruebas experimentales mediante el diseño factorial 2 ³	77
Tabla 10	Equipos e insumos utilizados.....	82
Tabla 11	Muestra SM-1 Análisis Mineralógico Por Difracción De Rayos X.....	87
Tabla 12	Descripción Del Estudio Microscopia Electrónica SM-1	87
Tabla 13	Composición química (%) de los minerales identificado en la Muestra SM-1.....	88
Tabla 14	Análisis De Icp Óptico.....	90
Tabla 15	Determinación Del Porcentaje De Humedad.....	91
Tabla 16	Determinación de la gravedad específica.....	93
Tabla 17	Balance de pulpa para 30 % de sólidos.....	94
Tabla 18	Parámetros Para Realizar Pruebas Flash.....	96
Tabla 19	Resultado De la Prueba Flash	97
Tabla 20	Parámetros para realizar prueba a en botellas.....	99
Tabla 21	Resultados prueba en botellas.....	101
Tabla 22	Porcentaje de extracción de oro en las pruebas de cinética de lixiviación.....	101
Tabla 23	Diseño factorial 2 ³ prueba de lixiviación.....	103
Tabla 24	Condiciones de operación para columna N°1	108
Tabla 25	Resultados de la columna N°1	109

Tabla 26 Condiciones de operación para columna N°2	110
Tabla 27 Resultados de la columna N°2	111
Tabla 28 Condiciones de operación para columna N°3	112
Tabla 29 Resultados de la columna N°3	113
Tabla 30 Condiciones de operación para columna N°4	114
Tabla 31 Resultados de la columna N°4	115
Tabla 32 Condiciones de operación para columna N°5	116
Tabla 33 Resultados de la columna N°5	117
Tabla 34 Condiciones de operación para columna N°6	118
Tabla 35 Resultados de la columna N°6	119
Tabla 36 Condiciones de operación para columna N°7	120
Tabla 37 Resultados de la columna N°7	121
Tabla 38 Condiciones de operación para columna N°8	122
Tabla 39 Resultados de la columna N°8	123
Tabla 40 Condiciones de operación para columna N°9	124
Tabla 41 Resultados de la columna N°9	125
Tabla 42 Condiciones de operación para columna N°10	126
Tabla 43 Resultados de la columna N°10	127
Tabla 44 Condiciones de operación para columna N°11	128
Tabla 45 Resultados de la columna N°11	129
Tabla 46 Tabla de resumen de las pruebas experimentales	129
Tabla 47 Niveles de Variables	130
Tabla 48 Variables en escala natural y codificada con replicas en el centro	131
Tabla 49 Efectos estimados para la extracción del oro (unidades codificadas)	132
Tabla 50 Análisis de la varianza para extracción	135
Tabla 51 Matriz de diseño y transpuesto de matriz	137

Tabla 52 Producto de las matrices $X^T X$ $(X^T X)^{-1}$	137
Tabla 53 Productos de las matrices $(X^T X)^{-1} X^T Y$	137
Tabla 54 Coeficiente de estimación para Y (respuesta).....	138
Tabla 55 Análisis de residuos	139
Tabla 56 Maximización el porcentaje de extracción de Au.....	139
Tabla 57 Factores óptimos para la extracción de Au.....	140
Tabla 58 Ajuste para la validación del modelo de regresión	141
Tabla 59 Valor óptimo de extracción del Au.....	142
Tabla 60 Análisis de varianza para la regresión de las variables B y C.....	142

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1. Situación Problemática

Desde hace 20 años los minerales de oro son comúnmente procesados mediante técnicas de lixiviación convencionales que utilizan como agente lixivante principal al cianuro, el cual es aún aplicado en la Unidad minera Utunsa -Anabí -Haqira – Apurímac, ya que la cianuración ofrece altos valores de disolución de oro, además los costos de operación son bajos y controles de operación sencillas; sin embargo, en los últimos años el uso del cianuro ha sido restringido por su carácter tóxico al ser altamente nocivo para el ser humano, la vida silvestre y forestal, trayendo consigo problemas ambientales y sociales, así como ocurre en varias unidades mineras dedicadas a la extracción del oro.

En los últimos años, se vienen investigando tecnologías y agentes lixiviantes alternativos al uso del cianuro, con el fin de mejorar los aspectos socio-ambientales y económicos dentro del proceso de lixiviación del oro, como son : tiocianato, tiosulfato amoniacal, tiourea, halógenos y amoniaco, entre otros, los cuales, actualmente en nuestro país no han conseguido imponerse frente al empleo del cianuro; ya sea, debido a los altos costos de operación y/o menor porcentaje de recuperación del metal. Por este motivo presentamos como alternativa el uso de los reactivos: bromuro de potasio y ácido bromhídrico como agentes lixiviantes para el oro.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1. Problema general

¿Se podrá extraer oro por lixiviación en columnas utilizando bromuro de potasio y ácido bromhídrico del mineral aurífero de la Unidad minera Utunsa – Anabi – Haqira - Apurímac?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿El mineral aurífero tendrá las características químicas y mineralógicas para el proceso de lixiviación en columnas de la unidad minera Utunsa?
- ¿Cuál es consumo del ácido bromhídrico (HBr) y bromuro de potasio (KBr) en el proceso de lixiviación en columnas??
- ¿Cuál será la ecuación cinética de lixiviación en columnas, utilizando los reactivos mencionados?
- ¿Cómo influyen las variables en el proceso de lixiviación en columnas del mineral aurífero?

1.3 Justificación de la Investigación

1.3.1. Socio-Económica

Con la realización de este trabajo de investigación se pretende reducir los costos de operación y aumentar ganancias en producción generando así mayores ingresos a la empresa y mejorando los beneficios de sus trabajadores y colaboradores, esto también tendrá efecto en el canon minero donde se buscare mejorar la calidad de vida socio-económica de los comuneros que viven en las comunidades aledañas a la mina, tanto con beneficios directos e indirectos en el puesto de trabajo,

además genera otras actividades como el comercio, transporte , salud , educación y así poder llevar al crecimiento de la población.

1.3.2. Social

Durante los últimos años han existido empresas mineras que desarrollan la metalurgia extractiva del oro, sin considerar la importancia de aspectos ambientales ni sociales, donde el uso de cianuro en las operaciones mineras de oro, genera conflictos sociales con las comunidades aledañas, por carácter toxico y venenoso. Las poblaciones cercanas a las zonas donde se realizan este tipo de actividades vienen mostrando desaprobación por el tipo de reactivos que se utilizan.

Con el uso de los reactivos alternativos se pretende reducir, la problemática social que se genera en la industria del oro. Es por ello, que con la aplicación de estos nuevos reactivos alternativo utilizados en el proceso de lixiviación se podrá manejar de manera más adecuada los temas medioambientales para generar la aprobación de licencia social de las comunidades y poblaciones cercanas al desarrollo del proyecto de beneficio de minerales auríferos.

1.3.3. Ambiental

Debido al proceso convencional de las empresas mineras que desarrollan la extracción del oro, genera un gran impacto ambiental con el uso del cianuro, por su alto grado de toxicidad y es letal tanto para los seres humanos como para el medio ambiente.

Con este trabajo de investigación se obtendrá condiciones de manejo ambientales favorables y así reducirá el grado de impacto ambiental, con nuevos parámetros, normas y estándares de calidad ambiental.

1.3.4. Tecnológico

Actualmente, en la metalurgia extractiva del oro, se aplica el método de lixiviación con uso de cianuro, por lo tanto, la aplicación de éste nuevo método usando los reactivos de bromuro de potasio y ácido bromhídrico en el proceso de lixiviación del mineral aurífero, no será un problema ya que los equipos y el proceso de lixiviación no cambiarán, lo cual facilitará la adecuación de este nuevo método a varios tipos de lixiviación. La demostración y ampliación de este método está en progreso en diversas empresas mineras extranjeras.

1.4 Limitaciones de estudio

En el desarrollo de este trabajo de investigación se encontraron diversas limitaciones, las cuales son:

- ✓ Falta de estudios previos de investigación sobre el uso de bromuro de potasio y ácido bromhídrico.
- ✓ Escasa información bibliográfica a cerca del bromuro de potasio y ácido bromhídrico.
- ✓ La falta de laboratorios especializados en análisis químicos de soluciones líquidas lixiviadas con bromo.

1.5 Objetivos de la Investigación

1.5.1. Objetivo general

Extraer oro por lixiviación en columnas utilizando bromuro de potasio y ácido bromhídrico del mineral aurífero de la Unidad minera Utunsa – Anabi – Haqira-Apurímac.

1.5.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar la caracterización química y mineralógica del mineral en los laboratorios de la Unidad minera.
- ✓ Determinar el consumo apropiado del ácido bromhídrico y bromuro de potasio titulando la solución lixivante en el laboratorio.
- ✓ Determinar la influencia de las variables por diseño experimental 2^3 con el software MINITAB.
- ✓ Determinar el modelo matemático del proceso de lixiviación utilizando el software MINITAB.

CAPITULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes locales

(Chávez C. y Menejes D. 2013) en la tesis titulada “Evaluación de variables del proceso de cianuración en columna de minerales auríferos de Mollepiña - provincia de Grau – Apurímac”. Cusco –Perú.

Dicha investigación fue realizada en la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad San Antonio Abad del Cusco se realizó con minerales auríferos de baja ley procedentes del yacimiento Ccoriminas, ubicado en la Comunidad de Nueva Esperanza Mollepiña con leyes promedio entre 6 y 10 g/TM de Au. Cuyo objetivo es evaluar las variables del proceso de cianuración en columna para un escalamiento de pruebas a escala piloto; para ello, se realizó pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio mediante pruebas de cianuración en botella y columna. Las Pruebas de cianuración en Botella se experimentaron en el Laboratorio Químico - Metalúrgico de la Unidad Minera Santa Rosa de la Empresa Minera Phoenix S.A.C.; cuyos resultados muestran un consumo de cal de 1.5 Kg/TM de mineral y un consumo de NaCN de 1.62 Kg/TM de mineral, con una extracción máxima de 97.44 % Au y 49.37 % Ag. Las Pruebas de cianuración en Columna se experimentaron en el Laboratorio de Hidrometalurgia, aplicando el diseño factorial de 2^3 con 2 niveles y 3 variables de estudio (tamaño de partícula, altura de llenado y tiempo de cianuración), realizándose 11 pruebas en columna (8 combinadas y 3 centrales); cuyos resultados muestran que la Columna C-5 obtuvo la máxima extracción alcanzando el 82.17 % Au y 62.95 % Ag, con un tamaño

de partícula de $\frac{1}{4}$ ", 0.8 m de altura de llenado y 25 días de riego. Para el análisis de los resultados experimentales en columna se utilizó el software estadístico de Statgraphics Plus 5.1

- ✓ **(Loayza A. y Quispe N. 2013)**, en la tesis titulada “Evaluación de variables del proceso de cianuración en columnas en el yacimiento minero Huisamarca, Quiñota – Chumbivilcas”. Cusco – Perú.

La investigación fue realizada en la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad San Antonio Abad del Cusco. es abordado por un problema de leyes en el licor de lixiviación (PLS), que ingresa a la poza de operaciones del yacimiento minero Huisamarca; tomaron la decisión de realizar un análisis de las variables: blendeo y tiempo de cianuración. Estudio que era importante realizar, porque tuvieron variaciones en las leyes del PLS. Y con estos cambios repentinos, pusieron en riesgo primeramente la producción diaria de oro, el colapso de la planta y la rentabilidad económica de la empresa. Para ello desarrollaron y planificaron de acuerdo a la metodología planteada, iniciando con el muestreo en el Pad de lixiviación y su transporte al laboratorio metalúrgico, donde se hizo la homogenización y se formó los con pósitos blending: 50% argílico avanzado + 50% sílice granular; 25% argílico avanzado + 75% sílice granular; 75% argílico avanzado + 25% sílice granular; estos a su vez fueron homogenizados y cuarteados, seleccionaron las muestras para el análisis químico (leyes de cabeza) y análisis de mallas valoradas. Prosiguiendo con los cálculos de alcalinidad, densidad bulk, porcentaje de humedad, adición de cianuro entre otros, para culminar con el carguío de las columnas e iniciar con el riego en todas las pruebas. Una vez culminado los pasos anteriores, se controlaron y muestrean las soluciones diariamente (riego,

pregnant y barren) para el análisis de sus leyes en laboratorio; los resultados se cargan a una base de datos elaborada en una hoja Excel, y finalmente se utiliza el software estadístico statgraphics. Los resultados obtenidos con este estudio, fueron primordialmente para dar solución a la problemática: mejorando el porcentaje de extracción de oro a partir del blending y el tiempo de cianuración, y de esta manera asegurar la producción diaria de oro sin poner en riesgo la planta Merrill Crowe, a su vez extender el periodo de vida de la empresa. Concluyendo con una propuesta de desarrollo sostenible para la empresa, con una extracción óptima de 84.33% Au, y un tiempo de cianuración de 18 días

2.1.2. Antecedente Nacional

- ✓ **(Isidro Perca J, 2018)** en la tesis titulada “Pruebas de cianuración en botellas y columnas para minerales mixtos auríferos en la empresa minera J.J. INVERSIONES MINERA SAC en Abancay” Apurímac – Perú.

Se desarrollo en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Esta tesis tiene por objetivo: El estudio los minerales mixtos auríferos mediante pruebas de cianuración en botellas y columnas. También involucra pruebas para consumo de cianuro y cinética en las pruebas de lixiviación en columnas con resultados de análisis y caracterización de minerales auríferos de dicha zona minera, según los resultados obtenidos durante esta investigación, es posible lograr porcentajes de disolución de oro de hasta el 90 % para los minerales de la zona, esta afirmación fue posible a las mejores condiciones de las pruebas metalúrgicas planteadas para el control del proceso.

2.1.3. Antecedentes internacionales

(R; Futuro, A; Fiúza, A; Vila, M y Dinis, M. 2018), en el trabajo de investigación titulado “El bromo lixiviación como un método alternativo para la disolución de oro”.

Portugal

Se realizaron pruebas experimentales con el fin de evaluar la viabilidad de bromo producido in situ, en el reactor de lixiviación, para disolver oro usando muestras de mineral de la mina portugués sin explotar de Castromil. Se realizaron cinco ensayos preliminares para garantizar la viabilidad del proceso de lixiviación de bromo para el mineral desde el depósito Castromil. Se utilizó el método cuantitativo experimental – explicativo, dónde los resultados mostraron que se necesitan temperaturas más elevadas para obtener proporciones de disolución de oro más altas, aunque pérdidas de volumen graves de la solución de lixiviación se observaron casi de 50%, debido a estas temperaturas. El rendimiento del proceso de lixiviación aumentó cuando se aplicó una relación sólida / líquido, lo que implica menores cantidades de la solución de lixiviación, que es económico ventajoso en términos de costes de reactivos y diseño de la planta. Y como conclusiones obtuvieron: la lixiviación bromo podría ser una alternativa a la cianuración para el mineral de Castromil, incluso sin ninguna etapa de pre tratamiento, que sería obligatoria con el fin de obtener resultados similares con tiosulfato de lixiviación. Además, que la lixiviación bromo alcanza recuperaciones similares a los obtenidos con cianuro y mayor que cuando se utiliza tiosulfato. También podría concluir que el proceso de lixiviación bromo presenta una velocidad de disolución más rápido tomando sólo 4 h para disolver el 80% de oro, mientras que lixiviación con cianuro requiere 24 h para obtener un rendimiento similar.

(Pettman, Roger Bruce and Arnold, Dale F. Proyecto CYCLADDEX INC 2017), “Recuperación de metales preciosos y tierras raras usando cyclodextrina”. New york- Estados unidos.

Dicha investigación fue realizada New york. El principal objetivo de esta invención es de recuperar metales preciosos como el oro, plata, platino, paladio y tierras raras, a partir de materiales que los contengan. Se aplicó el método cuantitativo – experimental donde se realizaron pruebas que consisten en formar una mezcla oxidante ácida acuosa de peróxido de hidrógeno, un ácido y una fuente de ion bromuro, dicha mezcla oxidante ácida que tiene un pH en el rango de 0 a 6.

De acuerdo a las pruebas realizadas, los resultados muestran que mientras incrementa la temperatura, la concentración de oro también incrementa. En conclusión, se tiene que el rendimiento del oro en el lixiviado puede exceder el rendimiento que se consigue utilizando cianuro, a pH muy bajos da buenos rendimientos y mientras incrementa el tiempo de lixiviación también incrementa el rendimiento.

2.2 Bases teóricas

2.2.1. El oro

Según Vargas G. (2015) “El oro es un metal amarillo brillante por la luz reflejada, en láminas muy delgadas es azul o verde. Es el más maleable y dúctil de todos los metales” (págs. 9 -10), en estado natural se denomina oro puro de 24 quilates como se observa en la figura 1, es sumamente maleable, es demasiado blando para ser usado en joyería y acuñar moneda, por lo que se alea siempre para aumentar su dureza sobre todo su durabilidad tales fines con plata y cobre.

Según Yannopoulos (1991) “El oro es un metal amarillo suave, con la ductilidad y maleabilidad más alta, a comparación con cualquier metal, el oro cristaliza en el sistema cubico, aunque los cristales de oro son muy raras. El oro tiene una alta conductividad térmica y eléctrica” (p.11)

Figura 1.

Oro con cuarzo zona de Brasil



Nota: Fabre Minerals 1996-2021(<https://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=GoldTE60AB5f.jpg&LANG=ES>)

2.2.1.1. **Minerales auríferos que se encuentran en la naturaleza**

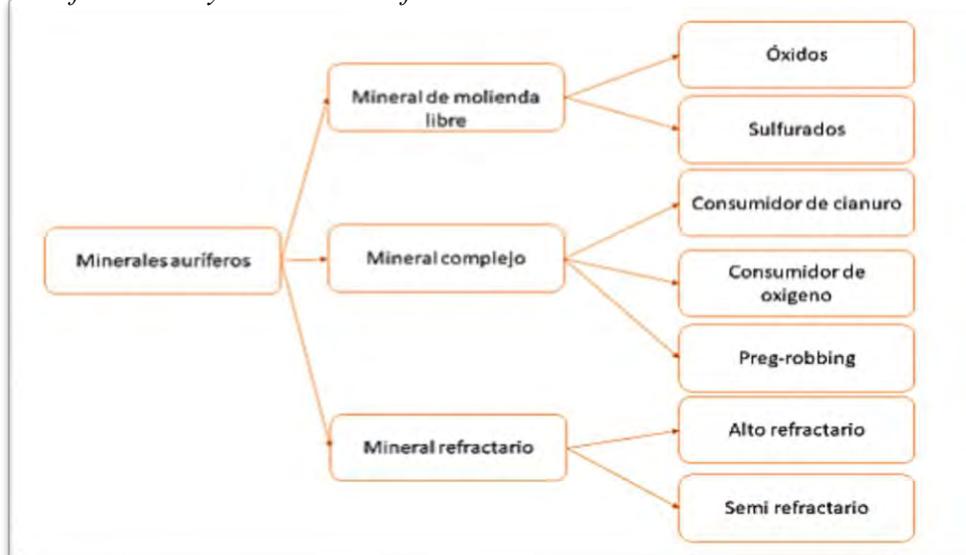
Es poco probable que el oro forme compuestos en la naturaleza, a diferencia de otros metales, se encuentra como oro nativo o forma un tipo de aleación generalmente asociado con plata (Ag) y cobre (Cu) y en pequeñas cantidades aparece esparcido en vetas genéticamente relacionadas con rocas de origen ígneo de tipo silíceo, siendo la fuente principal el cuarzo hidrotermal y las vetas donde el oro, junto con la pirita y otros sulfuros, se depositaba por las soluciones minerales ascendentes que lo contenían. Los sulfuros que contienen oro se oxidan tanto en la superficie terrestre como en sus inmediaciones, lo que hace que este elemento quede libre, lo que favorece mucho su extracción. Las vetas, que están expuestas a los efectos del tiempo, especialmente a través de la intemperie, liberan el oro contenido en el manto terrestre, arena de río o es arrastrado

desde arroyos cercanos. Dado que el oro tiene una gravedad específica alta, se separa mecánicamente de minerales más ligeros. (Ros Moreno, 2017)

La clasificación de los yacimientos de minerales de oro se puede entender en la figura 2:

Figura 2

Clasificación de yacimientos auríferos



Nota: Gold Ore Processing and Environmental Impacts (Taylor & Francis, 2018)

Aunque existen varias clasificaciones geológicas para los depósitos auríferos, la más conocida son la siguientes (Henley, 1975):

1. Vetas de oro-cuarzo.
2. Depósitos epitermales.
3. Placeres jóvenes.
4. Placeres fósiles.
5. Depósitos con oro diseminado.
6. Oro en menas de metales no ferrosos.

7. Oro en agua de mar.

Por otra parte, existe una clasificación de depósitos orientada a la extracción del oro (McQuinston Jr & Shoemaker, 1975).

1. Minerales de oro nativo, en los que el metal precioso se puede obtener mediante separación gravimétrica, amalgama y / o cianuración.

2. Oro asociado a sulfuros, donde el oro se encuentra en forma de partículas libres o dispersas en los sulfuros.

3. Teluros de oro, generalmente asociados con oro nativo y sulfuros.

4. Teluros de oro, generalmente asociados con oro nativo y sulfuros.

Las clasificaciones presentadas anteriormente, son algunas de las muchas que se pueden encontrar, sin embargo, desde el punto de vista de la extracción del oro de su mineral, se pueden considerar dos grandes grupos de minerales auríferos, los minerales refractarios y los minerales no refractarios. Los minerales que normalmente no responden a la cianuración convencional y requieren un tratamiento previo antes del proceso de cianuración se denominan refractarios.

2.2.2. Principios de la hidrometalurgia del oro

Una de las definiciones adoptadas de manera general es “La hidrometalurgia es el tratamiento de minerales, concentrados y otros materiales metálicos mediante un sistema acuoso para hacer que algunos de sus constituyentes se disuelvan y luego se recuperen de la disolución” (A. Ballester, L.F. Verdeja y J.Sancho,p330)

La mayoría de los diagramas de flujo de la minería de oro utilizan técnicas hidrometalúrgicas, las más importantes de las cuales son la lixiviación, la purificación de la solución, la concentración

y la recuperación de oro. Dependiendo del tipo de mineral, métodos de pretratamiento hidrometalúrgico como cloración, oxidación a presión y oxidación biológica.

Las consideraciones más principales en los procesos hidrometalúrgicos son el grado en que será la reacción y la velocidad de reacción, la primera depende de las propiedades termodinámicas del sistema químico, que determinan la reacción general que empuja la fuerza, la segunda es la velocidad de reacción, dependerá de una combinación de factores físicos, químicos y de transporte de masa, que pueden controlar hasta cierto punto seleccionando en el proceso y el diseño de la planta de procesos.

Para la extracción del oro, las reacciones químicas más influyentes son las que involucran al oro mismo, metales valiosos como el cobre y la plata, también reacciones secundarias relacionadas con los minerales de la ganga. Para comprender más de estas reacciones es fundamental conocer la eficiencia de la extracción de oro y el costo de operación de los diversos procesos. Por ejemplo, si las reacciones secundarias no están controladas, puede significar la disolución de especies cuya recuperación es indeseable o la precipitación de oro en solución, reduciendo así la extracción del metal de interés.

Una de las propiedades del oro es que solo se disuelve en soluciones que se oxidan y contienen ciertos complejos, como el cianuro, este comportamiento permite extraer el oro de forma selectiva de sus minerales involucrados. A pesar de la eficacia del cianuro para diluir el oro contenido en el mineral, esta disolución está limitada por factores físicos, dado que el cianuro tiene que entrar en contacto directo con el oro durante todo su paso por la pila de lixiviación para lograr una dilución del contenido metálico, la granulometría y la permeabilidad del material influyen directamente en este proceso. Si la granulometría es demasiado fina y la permeabilidad es demasiado baja, no se

permite la percolación correcta de la solución de cianuro produciendo compactación en el fondo de la pila, estancamiento y falla del proceso. (Palma, 2019)

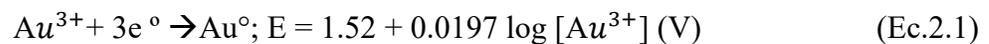
2.2.2.1. Reacción química del oro

Siendo el oro el más noble de todos los metales, tiene una amplia gama de usos en la industria, ya que es muy estable y muy poco reactivo con el oxígeno presente en el aire o el agua y con otros más fuertes oxidantes, como los ácidos. La disolución del oro en una solución acuosa requiere un agente complejante y un agente oxidante para lograr velocidades de lixiviación aceptables, con la estabilidad del oro solo en presencia de un número limitado de ligandos como cianuro, cloruro, haluros, tiourea, tiocianato, tiosulfato y algunos ácidos orgánicos para formar complejos estables (Marsden & House, 2006).

2.2.2.2. Reacciones oro-agua

Según Marsden & House, 2006, el oro en presencia del agua forma semireacciones en condiciones de rangos amplios de pH y potenciales.

- ✓ A pH <1 y en condiciones oxidantes tiene potenciales de solución mayores a 1,4 V, donde se pueden formar iones Au (III) en solución, representado por la semirreacción:



Donde:

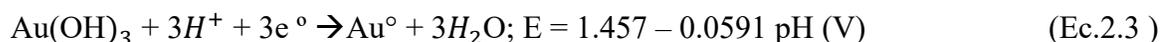
E = el potencial de reducción definido por la ecuación de Nernst

1,52 V = el potencial de reducción estándar (E°)

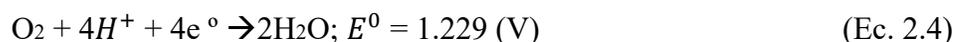
El Au (I) es inestable en agua en todas las condiciones de pH potencial, como lo indica la semireacción:



- ✓ Esta reacción tiene un E° más alto, el valor que la reducción de Au (III) y, en consecuencia, el oro es rápidamente oxidada a Au (III) sin que se forme Au (I) en un grado significativo. Entre aproximadamente pH 1 y 13, y a potenciales muy altos, se puede formar hidróxido de Au (III) insoluble:



- ✓ A $\text{pH} > 13$ y por encima de aproximadamente 0,6 V, la especie de hidroaurato soluble (HAuO_3) se forma. Todas las reacciones (2.1) a (2.3) ocurren a potenciales mayores que ese requerido para la reducción de oxígeno:



2.2.2.3. Complejos de oro

La estabilidad del oro se reduce en presencia de ciertos asociados, como iones cianuro, cloruro, tiourea, tiocianato y tiosulfato debido a la formación de iones complejos estables. Permitiendo que el oro se disuelva en soluciones oxidantes relativamente suaves, como las soluciones acuosas de cianuro. Las constantes de estabilidad que están simbolizadas como β_2 o β_3 como se observa en la tabla 1 para varios complejos de oro Au^{1+} y Au^{3+} , junto con sus potenciales de reducción estándar.

Las constantes de estabilidad muestran que algunos asociados formen complejos más estables con Au^{1+} y otros con Au^{3+} . Los llamados asociados o donadores de electrones suaves, tales como cianuro, tiourea, tiocianato, y tiosulfato, prefieren iones metálicos de baja valencia por ejemplo, Au^{1+} , mientras que los asociados donadores de electrones, tales como el cloro, amoníaco, yodo, bromo y los otros haluros, prefieren iones metálicos de alta valencia, por ejemplo, Au^{3+} . (Marsden & House, 2009)

Tabla 1*Constantes de estabilidad para complejos seleccionados de Au (I) y Au (III)*

Ligando	Complejo Au ⁺¹ o Au ³⁺	Log β_2 o β_3	E° Au(+1 o +3)/ Au(V vs SHE)	Rango de pH
CN ⁻	Au(CN) ₂ ⁻	38.3	-0.57	>9
SCN ⁻	Au(SCN) ₂ ⁻	17.1	0.66	<3
	Au(SCN) ₄ ⁻	43.9	0.66	
S ₂ O ₃ ²⁻	Au(S ₂ O ₃) ₂ ³⁻	28.7	0.17	8 - 10
Cl ⁻	AuCl ₂ ⁻	9.1	1.11	<3
	AuCl ₄ ⁻	25.3	1.00	
Br ⁻	AuBr ₂ ⁻	12.0	0.98	5 - 8
	AuBr ₄ ⁻	32.8	0.97	
I ⁻	AuI ₂ ⁻	18.6	0.58	5 - 9
	AuI ₄ ⁻	47.7	0.69	
CS(NH ₂) ₂	Au(NH ₂ CSNH ₂) ₂ ⁺	23.3	0.38	<3
HS ⁻	Au(HS) ₂ ⁻	29.9	-0.25	<9
NH ₃	Au(NH ₃) ₂ ⁺	26.5	0.57	>9
Glicinato	Au(NH ₂ CH ₂ COO) ₂ ⁻	18.0	0.63	9
SO ₃ ²⁻	Au(SO ₃) ₂ ³⁻	15.4	0.77	>4

Nota: Lixiviantes alternativos al cianuro para la lixiviación de minerales de oro (Aylmore, M. (2005))

2.2.2.4. Equilibrios Químico y Termodinámico del oro

Según Marsden & House, 2006; El equilibrio químico es el punto en una reacción química donde no hay más cambios en la concentración de las especies iónicas y moleculares relacionadas. La composición en estas condiciones se puede describir usando una constante de equilibrio (K), que es una relación que relaciona las actividades de los productos de reacción y los reactivos, por ejemplo, el equilibrio establecido entre dos reactivos (A y B) y dos productos (C y D) en solución acuosa se puede expresar de la siguiente manera:



$$K = \frac{a_C^y a_D^z}{a_A^w a_B^x} \quad (\text{Ec.2.6})$$

Dónde: w, x, y y z = la estequiometría de la reacción, a_{A-D} son las actividades de las especies A, B, C y D respectivamente.

Cuanto mayor sea el valor de la constante de equilibrio, más avanzará la reacción hacia la terminación, formando C y D. Los factores que afectan el valor absoluto y relativo las concentraciones de cada especie son:

- Valor de la constante de equilibrio (K)
- Concentración total de especies de metales
- Concentración de ligando
- Relación de concentración metal-ligando
- Coeficientes de actividad de todas las especies

El cambio de energía asociado con una reacción determina si, y en qué dirección, procederá. Esto se puede expresar como el cambio de energía libre de Gibbs (ΔG^0 en kJ / mol) para la reacción, derivada de datos estándar de entalpía y entropía:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Ec.2.7})$$

Dónde:

ΔH = el cambio de entalpía (kJ / mol)

T = la temperatura (K)

ΔS = el cambio de entropía (kJ / mol K)

En equilibrio, la energía libre de Gibbs se minimiza y se puede demostrar que:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln K \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Esta ecuación se conoce como isoterma de Van't Hoff, para una reacción en particular, por ejemplo, ecuación 2.5, ΔG^0 es constante y se puede calcular a partir de:

$$\Delta G^0 = yG^0 + zG^0 - wG^0 - xG^0 \quad (\text{Ec.2.9})$$

Si ΔG es negativo, la reacción procede espontáneamente de izquierda a derecha, mientras que, si es positivo, se produce la reacción inversa. El equilibrio se logra cuando $\Delta G = 0$, y desde ecuación 2.8 esto ocurre cuando:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (\text{Ec.2.10})$$

Por lo tanto, la constante de equilibrio para una reacción dada puede derivarse de la energía libre calculada usando datos de actividad aproximados o reales para las diversas especies involucradas. Los datos termodinámicos están disponibles para condiciones estándar a 25 ° C para la mayoría de las especies encontrados en la hidrometalurgia del oro ver la tabla 2 para las especies de oro con datos termodinámicos.

Tabla 2

Datos termodinámicos seleccionados para especies de oro

Formula	State	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔG^0 (kJ/mol)	S^0 (J mol ⁻¹ K ⁻¹)
Au	g	366	326	180.39
Au	c [†]	0	0	47.40
Au ⁺	g	1,262.4	—	—
Au ⁺	aq [‡]	—	176	—
Au ²⁺	g	3.247 × 10 ³	—	—
Au ³⁺	Aq	—	440	—
AuO ₃ ³⁻	Aq	—	51.9	—
HAu ₃ ²⁻	Aq	—	-142	—
H ₂ AuO ₃ ⁻	Aq	—	-218	—
Au(OH) ₃	c	-424.7	-317	190
Au(OH) ₃	aq	—	-283.5	—
AuCl	c	-35	—	—
AuCl ₂ ⁻	aq	—	-151.0	—
AuCl ₃	c	-118	—	—
AuCl ₃ ·2H ₂ O	c	-715.0	—	—
AuCl ₄ ⁻	Aq	-322	-234.6	267
AuBr	c	-14.0	—	—
AuBr ₂ ⁻	aq	-128	-115.0	220
AuBr ₃	c	-53.26	—	—
AuBr ₃	Aq	-39.3	—	—
AuBr ₄ ⁻	Aq	-192	-167	336
HAuBr ₄ ·5H ₂ O	c	-1,668	—	—
AuI	c	0	-0.5	—
AuI ₂ ⁻	aq	—	-47.6	—
AuI ₄ ⁻	Aq	—	-45	—
Au(CN) ₂ ⁻	Aq	242	286	1.7 × 10 ²
Au(SCN) ₂ ⁻	Aq	—	252	—
Au(SCN) ₄ ⁻	Aq	—	561.5	—

Nota: * g = gas. † c =composición sólida. ‡ aq = especie acuosa
The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

2.2.2.5. Consideraciones electroquímicas

Según Marsden & House,2006. Para reacciones electroquímicas, son aquellas que implican oxidación o reducción por electrones transferencia, la ecuación 2.11 se puede expresar en términos de potenciales de electrodo. Por ejemplo, la reducción electroquímica generalizada es la siguiente:



En cuanto a la ecuación 2.5, la constante de equilibrio es la razón de las actividades de los productos dividido por las actividades de las especies que reaccionen y puede ser expresado de la siguiente manera:

$$k = \frac{a_M^{(n-1)+}}{a_M^{n+}} \quad (\text{Ec2.12})$$

La energía libre está relacionada con el potencial del electrodo por:

$$\Delta G = -nFE \quad (\text{Ec2.13})$$

y si todas las especies están en sus estados estándar, entonces:

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ \quad (\text{Ec2.14})$$

Dónde:

n = el número de electrones transferidos

F = la constante de Faraday, una unidad de carga conveniente (96,487 culombios)

Por tanto, de la ecuación (2.8) se deduce que:

$$E = E^0 \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \frac{a_{\text{estado de reduccion}}}{a_{\text{estado de oxidacion}}} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

o

$$E = E^0 - \frac{RT \ln a^{(n-1)+}}{nF \ln a^{n+}} \quad (\text{Ec.2.16})$$

La ecuación 2.15 se conoce como ecuación de Nernst, donde R es la constante universal de los gases (8,3141 mol⁻¹K). De ello se deduce que el valor del coeficiente RT / nF es 0,0591 V para una reducción de 1 electrón (n = 1) a 298 K. Valores de los potenciales de los electrodos (**E**⁰) se

puede calcular a partir de datos estándar de energía libre. Los valores de las semirreacciones seleccionadas se enumeran en la tabla 3 y 4. La ecuación de Nernst 2.15 se puede utilizar para calcular los potenciales de los electrodos en soluciones acuosas en equilibrio.

Tabla 3

Potenciales de reducción estándar seleccionados

Reaction	E^{\ominus} (V)
$\text{Ag}^+ + e \rightleftharpoons \text{Ag}$	0.799
$\text{AgCl} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0.222
$\text{Ag}_2\text{S} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{S}^{2-}$	-0.705
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.706
$\text{H}_2\text{BO}_3 + 5\text{H}_2\text{O} + 8e \rightleftharpoons \text{BH}_4^- + 8\text{OH}^-$	-1.24
$\text{Br}_2(\text{aq}) + 2e \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	1.087
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2e \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1.358
$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	0.90
$(\text{CNS})_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{CNS}^-$	0.77
$(\text{CN})_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons 2\text{HCN}$	0.37
$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.340
$\text{Fe}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	0.771
$2\text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.828
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.776
$\text{Hg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Hg}$	0.851
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Hg}$	0.796
$\text{Mg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.375
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}_2$	0.682
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e \rightleftharpoons 4\text{OH}^-$	0.401
$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.126
$\text{Pt}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pt}$	1.2
$\text{S} + 2e \rightleftharpoons \text{S}^{2-}$	-0.508
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}$	0.141
$\text{Sb}^{5+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sb}^{3+}$	0.75
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.763
$\text{ZnO}_2^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn} + 4\text{OH}^-$	-1.216

Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

Tabla 4

Resumen de potenciales estándar para parejas de oro seleccionadas en soluciones acuosas

Half-Reaction	Standard Potential, E° (V)
Au(I)/Au(0)	
$Au^+ + e \rightarrow Au$	1.68 to 1.83
$Au(CN)_2^- + e \rightarrow Au + 2CN^-$	-0.65 to -0.57
$AuCl_2^- + e \rightarrow Au + 2Cl^-$	1.154
$AuBr_2^- + e \rightarrow Au + 2Br^-$	0.960
$AuI_2^- + e \rightarrow Au + 2I^-$	0.578
$AuI + e \rightarrow Au + I^-$	0.530
$Au(SCN)_2^- + e \rightarrow Au + 2SCN^-$	0.604 to 0.662
Au(III)/Au(0)	
$Au^{3+} + 3e \rightarrow Au$	1.42 to 1.52
$AuCl_4^- + 3e \rightarrow Au + 4Cl^-$	0.994 to 1.002
$AuBr_4^- + 3e \rightarrow Au + 4Br^-$	0.854
$AuI_4^- + 3e \rightarrow Au + 4I^-$	0.56
$Au(SCN)_4^- + 3e \rightarrow Au + 4SCN^-$	0.636
Au(III)/Au(I)	
$Au^{3+} + 2e \rightarrow Au^+$	1.36
$AuCl_4^- + 2e \rightarrow AuCl_2^- + 2Cl^-$	0.926
$AuBr_4^- + 2e \rightarrow AuBr_2^- + 2Br^-$	0.802
$AuI_4^- + 2e \rightarrow AuI_2^- + 2I^-$	0.55
$Au(SCN)_4^- + 2e \rightarrow Au(SCN)_2^- + 2SCN^-$	0.604 to 0.623

Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

2.2.3. Diagrama de Marcel Pourbaix

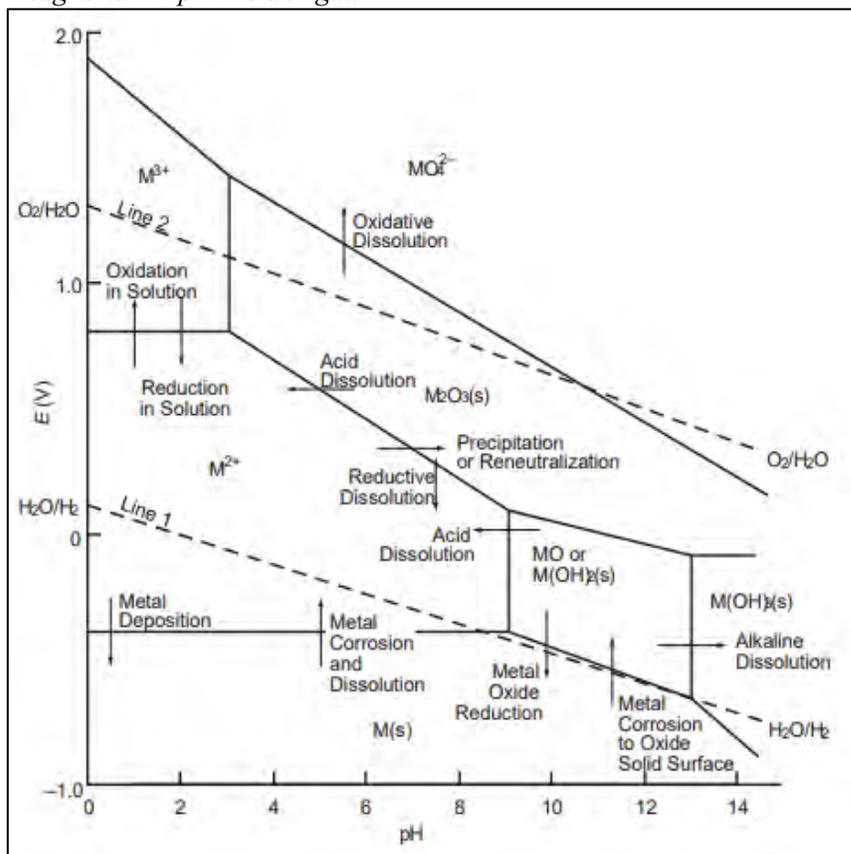
Marcel Pourbaix, en 1951, hace una importante contribución a la ciencia a través de la investigación de los procesos de corrosión acuosa y su derivación del valor potencial del pH. Los diagramas Eh-pH son representaciones gráficas de la estabilidad de un metal y sus productos de corrosión en función del potencial y el valor de pH (acidez o alcalinidad) de la solución acuosa. (Delahay, Pourbaix, & Rysselberghe, 1951). La Figura 3 se muestra el diagrama Eh-pH Metal/Agua, donde proporcionan la física química de un metal en un sistema acuoso, donde se ilustra las condiciones bajo las cuales tienen lugar las reacciones redox y ácido-base en el sistema, se muestra los productos de reacción probables según la zona de estabilidad en el sistema metal / agua, generalizado, ocurre:

- ✓ M^{2+} se oxida a pH 1 para formar M^{3+} , mientras que a pH 7, el óxido metálico sólido, M_2O_3 , se forma como un precipitado en solución.
- ✓ M_2O_3 , solo se disuelve en condiciones muy ácidas y en potenciales elevados (por ejemplo, en soluciones bien oxigenadas) para formar M^{3+} , mientras que, en condiciones reductoras, se disuelve como M^{2+} , con valores de pH de hasta 8.

El área de estabilidad del metal se extiende por encima de la línea de reducción de oxígeno y es evidente que el oro es estable en agua pura en ausencia de agentes complejantes. Sin embargo, existen algunas limitaciones asociadas con el uso de estos diagramas en sistemas minerales prácticos. (Marsden & House, 2009)

Figura 3

Diagrama Eh-pH Metal/Agua



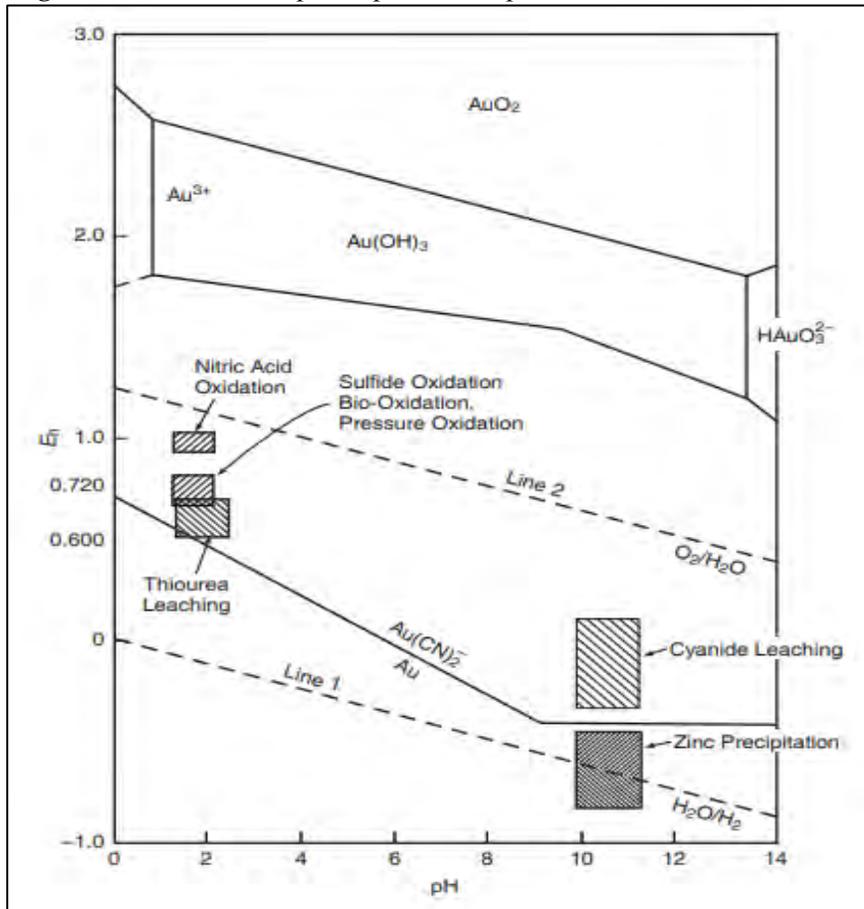
Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006.

- ✓ La cinética de la reacción no se tiene en cuenta y las reacciones en los sistemas minerales a menudo no alcanzan el equilibrio dentro del tiempo de residencia del proceso disponible.
- ✓ La composición química y las concentraciones de especies sólidas y en solución pueden ser inciertas, lo que hace imposible la derivación correcta del diagrama.

Las partículas de minerales pueden causar efectos catalíticos o galvánicos (por ejemplo, la presencia de galena o pirita cuando se lixivía el oro). Las condiciones de Eh – pH que se aplican en los procesos industriales de extracción de oro se muestra en la figura 4.

Figura 4

Rangos indicativos de Eh-pH empleados en procesos industriales de extracción de oro



Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

2.2.4. Cinética De Reacción

Las reacciones más importantes en los procesos hidrometalúrgicos de extracción de oro son heterogéneas, que involucran la transferencia de metales y menas entre las fases sólida y líquida. Las reacciones heterogéneas están controladas por la reacción química inherente cinética o por la tasa de transporte de masa de las especies individuales que reaccionan, pasos de una reacción son los siguientes (Marsden & House, 2009):

- Transporte masivo de reactivos gaseosos a la fase de solución y posterior disolución
- Transporte masivo de especies que reaccionan a través de la capa límite de solución-sólido, para la superficie sólida
- Reacción electroquímica en la superficie sólida, incluida la adsorción. y desorción en la superficie sólida y a través de doble capa eléctrica.

Se muestra un modelo de reacción simplificado en la figura 5. Si la velocidad de la reacción general se controla mediante las etapas 1, 2 o 4, donde la reacción está controlada por el transporte de masa. Mientras en la etapa 3 controla la velocidad, la reacción se controla químicamente. Una de las etapas de determinación de la velocidad puede cambiar para una reacción si cambian las condiciones; por ejemplo, si se aumenta la concentración de un reactivo limitante de la velocidad, una reacción puede cambiar de transporte de masa a controlada químicamente a medida que haya más reactivo disponible para ser transportado a la superficie de reacción. Se dice que una reacción en la que tanto el transporte de masa como los factores químicos afectan la velocidad se produce bajo control mixto.

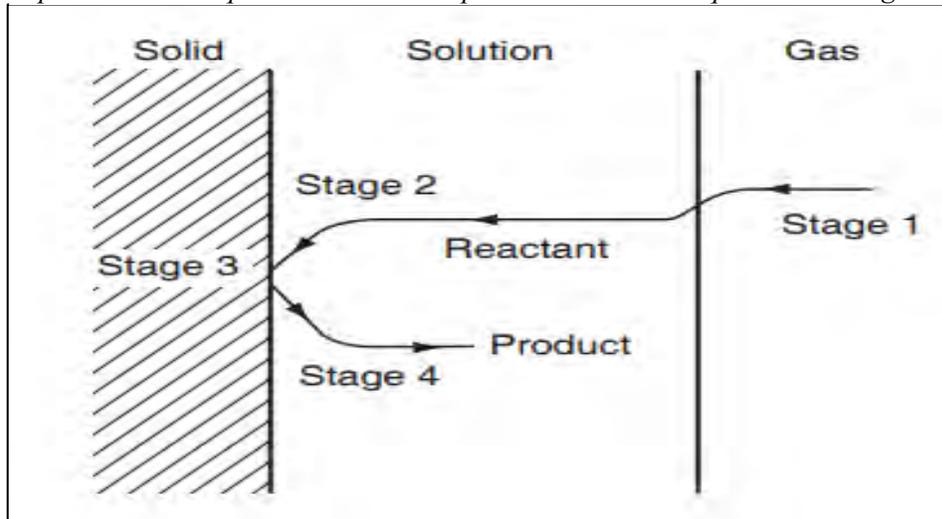
Las reacciones más importantes en los procesos hidrometalúrgicos de oro son heterogéneas, implicando la transferencia de metales y minerales entre las fases sólida y líquida. La etapa 3 como se puede ver en figura 2.8 llega a involucrar reacciones de dos tipos: la primera son aquellas que

involucran solo una reacción química (1), o las que son electroquímicas (2), es decir, una oxidación o reducción que involucra electrones transferir. La etapa 3 generalmente incluye varias de las siguientes etapas:

- Hidroxilación-hidratación superficial
- Reacción de especies superficiales.
- Adsorción de especies que reaccionan sobre la superficie sólida.
- Desorción de especies de productos de la superficie sólida.
- Reacción del producto en solución

Figura 5

Representación esquemática de las etapas de una reacción química heterogénea



Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

2.2.5. Modelado de cinética

La constante de velocidad para cualquier reacción se puede expresar en la forma de la ecuación de Arrhenius, (Marsden & House, 2009) es decir:

$$k = A e^{-E_a / RT} \quad (\text{Ec.2.17})$$

dónde:

A = constante relacionada con la frecuencia de colisión de las especies de solución

E_a = energía de activación para la reacción

R = constante de gas

T = temperatura absoluta

De acuerdo con la ecuación 2.17, se encuentra que la velocidad de reacción aumenta exponencialmente con la temperatura. El valor de E_a para una reacción se puede derivar trazando log k versus 1 / T y calcular la pendiente de la línea (E_a / R). El término E_a se define como sigue:

$$E_a = RT^2 \frac{d \ln K}{dT} \quad (\text{Ec2.18})$$

Para reacciones controladas químicamente, el valor de E_a es grande, generalmente superior a 40 kJ / mol, mientras que, para las reacciones controladas de transporte de masa, E_a es pequeño, entre 5 y 20 kJ / mol.

Una guía general útil, es que la velocidad de una reacción controlada químicamente aumenta en un factor de dos para un aumento de 10 ° C en la temperatura, otros factores permanecen constantes. Si un proceso es de transporte masivo, control químico o difusión, puede ser determinado experimentalmente mediante el seguimiento del efecto de las diferentes condiciones de reacción, como se da en la tabla 5.

Tabla 5*Pruebas experimentales para pasos de control de velocidad en reacciones líquido-sólido*

Factor	Químico De Superficies Control	Tasa De Difusión Control	Transferencia De Masa Externa Control
Aumento del flujo de fluidos	No efecto	No efecto	La tasa de reacción aumenta
Energía de activación encendida cambio de temperatura	40–400 kJ/mol	5–20 kJ/mol	5–20 kJ/mol
Cambio de partícula sólida.	Para sólidos con cero porosidades iniciales, cinética proporcional al tamaño; por sólidos que inicialmente son poroso (porosidad se desarrolla durante reacción), el tamaño tiene poca o ningún efecto sobre la cinética.	Tiempo de reacción proporcional al tamaño.	Tiempo de reacción proporcional a tamaño

Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

2.2.6. Factor de partícula en sistemas sólido-líquido

Las características de las partículas, como el tamaño, la forma y la porosidad de las partículas, juegan un papel importante tanto en la cinética como en el grado de finalización de las reacciones de lixiviación, ya que controlan el área de superficie disponible para la reacción con un reactivo en la solución de proceso. La velocidad de reacción en sistemas heterogéneos depende de la accesibilidad de la solución. En la superficie del mineral (capa límite o difusión controlada de poros) o en la velocidad de reacción química (depende de la superficie disponible). En cualquier caso, la velocidad de reacción aumentará si la roca o el mineral son porosos. (Marsden & House, 2009)

2.2.7. Lixiviación del oro

El proceso de lixiviación es la disolución de un metal, en este caso oro, en un líquido, siendo de la reacción principal la disolución del oro en una solución acuosa, que requiere tanto un agente

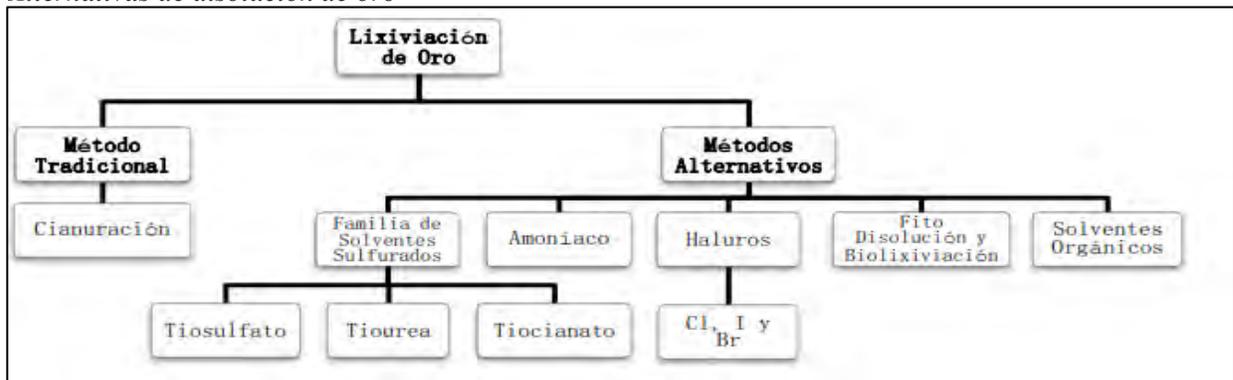
complejante como un agente oxidante para lograr velocidades de lixiviación aceptables. La estabilidad del oro solo se reduce en presencia de un número limitado de asociados como iones de cianuro, cloruro, tiourea y tiosulfato para formar complejos estables, como se mencionó anteriormente (Marsden & House, 2009).

Dentro de los métodos de disolución del oro, se conocen los métodos tradicionales y alternativos, los cuales se muestran esquemáticamente ver figura 6.

La lixiviación industrial se realiza sobre minerales oxidados, mezclas de óxidos, minerales sulfurados o concentrados derivados de la flotación, aglomeraciones de transformaciones y minerales que contienen metales preciosos en su estado nativo para la extracción de estos metales.

Figura 6

Alternativas de disolución de oro



Nota: Evaluación de una metodología alternativa a la cianuración para la disolución de oro utilizando solventes orgánicos (Perea, 2016)

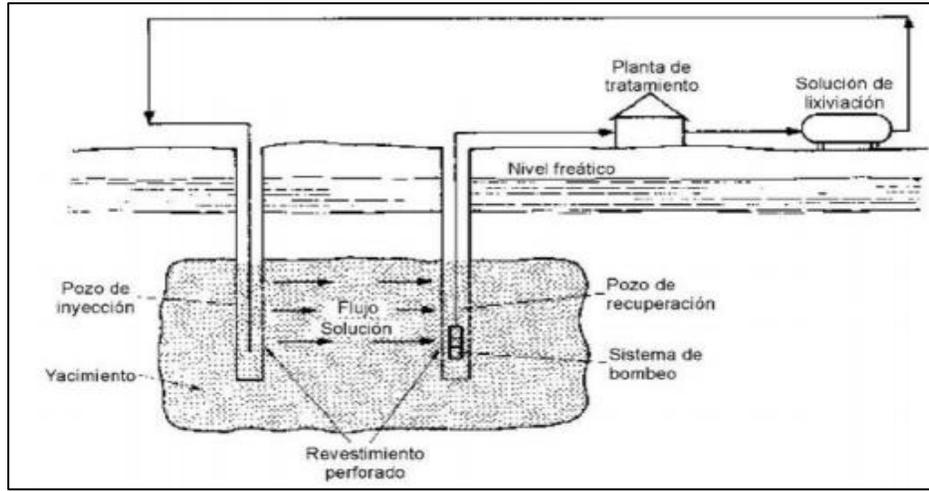
2.2.8. Métodos de lixiviación

2.2.8.1. Lixiviación In-Situ

La lixiviación in situ, o "in place", consiste fundamentalmente en aplicar las distintas soluciones de lixiviación directamente sobre el mineral del depósito, sin que éste sea sometido a labores de extracción y trituración. Este método se utiliza para minerales de muy baja ley que pueden reaccionar durante un largo período de tiempo ver esquema en la figura 7. (Palma, 2019)

Figura 7

Esquema del proceso de lixiviación In-Situ



Nota: Lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto (Palma,2019)

2.2.8.2. Lixiviación en Botaderos

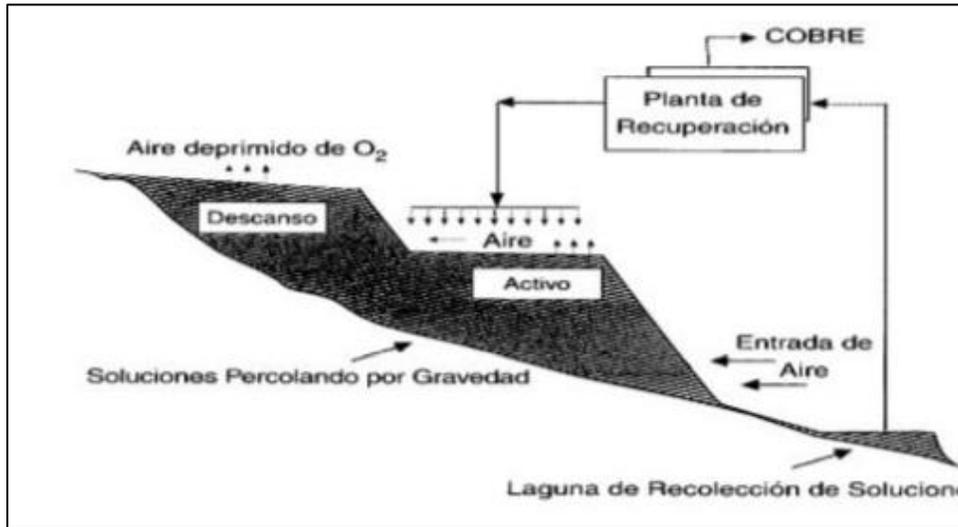
Esta lixiviación se aplica a botaderos o a acumulaciones de mineral de muy baja ley del mineral o sobre cargado, a menudo sin el uso de Pads. (Yannopoulos J.C,1991,p.120).

Las soluciones se riegan en vertederos a través de sistemas de distribución mediante goteros o aspersores en un área determinada, se tendrá en cuenta de las condiciones de evaporación que tenga el lugar y la abundancia de agua disponible en la zona observar esquema en la figura 8.

Las soluciones se recolectan a través de un sistema de precipitación y se recolectan en tanques o poza, para luego ser enviadas a la planta de proceso de recuperación. Estas operaciones se caracterizan por tener ciclos de tiempo muy largos, generalmente superiores a un año, presentando bajas recuperaciones que oscilan entre el 0 y el 60% y presentando uno de los costos operativos más bajos entre los métodos de lixiviación existentes. (Palma, 2019)

Figura 8

Esquema del proceso de Lixiviación en Botadero.



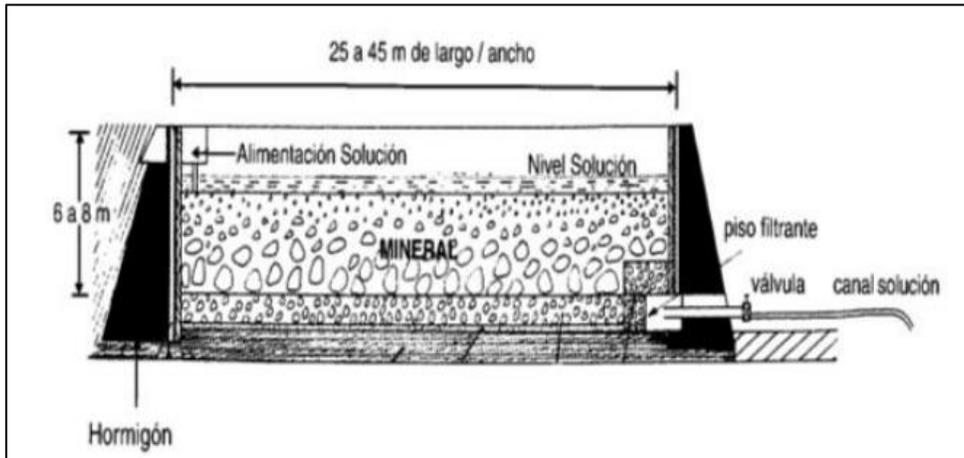
Nota: Lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto (Palma,2019)

2.2.8.3. Lixiviación en Bateas Inundación

La Lixiviación en Bateas Inundadas o Vat Leaching, se realiza habitualmente en una estructura rectangular de hormigón protegida con asfalto ácido retardante, cuya parte inferior tiene una estructura de madera con una tela filtrante. Se crean cadenas de 10 a 12 tazones, que se llenan de mineral con un tamaño de grano de $\frac{3}{4}$ "a $\frac{1}{2}$ " y se inundan con la solución de lejía. Las soluciones se devuelven a los tanques adyacentes para aumentar la concentración del metal de interés en la solución como se observa en la figura 9. Debido a la dinámica que ofrece este proceso, solo se utiliza en los casos en que los minerales a lixiviar tienen una cinética de disolución rápida. El ciclo de lixiviación en este caso es más rápido que los métodos anteriores y dura entre 6 y 12 días. (Palma, 2019)

Figura 9

Esquema del proceso de Lixiviación en Bateas.



Nota: Lixiviación Cianurada De Mineral De Oro En Columnas A Nivel De Planta Piloto (Palma,2019)

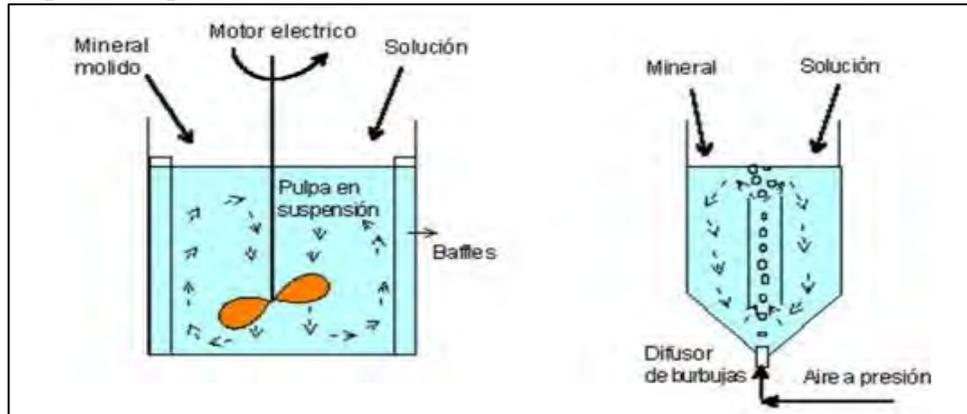
2.2.8.4.Lixiviación Agitada

Este proceso de lixiviación agitada es un proceso que requiere un mayor grado de liberación del mineral de interés, es decir, requiere un mayor grado de trituración, que generalmente se realiza mediante molienda húmeda observar en el esquema de la figura 10. De esta manera, se aumenta el área expuesta a la solución de lixiviación y, mediante agitación, se reduce el tamaño de la capa límite de difusión.

Debido a esto, los costos operativos de este proceso son más altos, pero se justifican cuando se aplican a minerales de alta calidad, lo que resulta en una mayor recuperación y tiempos de proceso más cortos. La agitación se puede crear de dos formas, la primera utilizando el sistema de elevación de aire y la segunda es la más utilizada y se realiza mediante agitación mecánica. (Palma, 2019)

Figura 10

Esquema del proceso de Lixiviación en Bateas



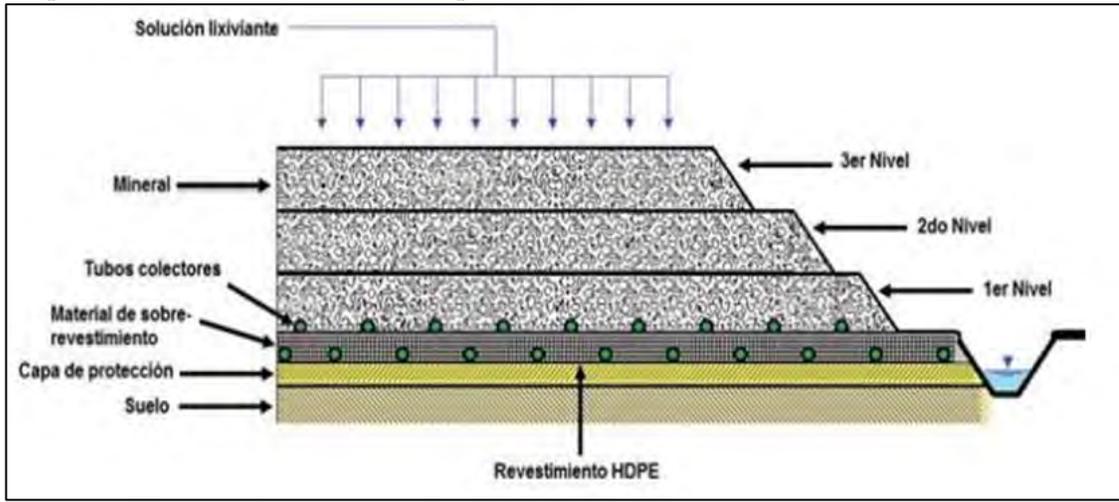
Nota: Lixiviación Cianurada De Mineral De Oro En Columnas A Nivel De Planta Piloto (Palma,2019)

2.2.8.5.Lixiviación en Pilas

La lixiviación en pilas es similar a la lixiviación en vertederos, pero se diferencia en que el contenido de mineral es mayor y en la mayoría de los casos el mineral sale estéril del proceso en la fase de concentración. El suelo, los montículos y la solución se preparan, forman y agregan como en el caso de la lixiviación de vertederos como se observa en la representación en la figura 11. En este tipo de lixiviación se debe evitar el encharcamiento del lecho, debido a la estanqueidad que ejercen sobre él las partículas de arcilla o minerales de muy pequeño diámetro. Los pilotes pueden ser dinámicos, cuando el mineral, luego de la lixiviación, es enviado a relleno sanitario y la base del pilote puede ser reutilizada o permanente en la que los nuevos pilotes se cargan sobre los anteriores aprovechando la permeabilidad existente. El tiempo de proceso puede ser de varios meses, dependiendo del tipo de mineral a tratar, el contenido del elemento o especie de interés y el tamaño de las partículas a lixiviar. Con este sistema se han reportado extracciones del 70 al 85%, similares a las obtenidas en el proceso de percolación, que se verá a continuación (C., B., & R., 2007).

Figura 11

Representación de una lixiviación en pilas.



Nota: Lixiviación fundamentos y aplicación (<https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixiviacion-en-pilas/>)

2.2.9. Método tradicional de lixiviación: Cianuración

El proceso de cianuración es lo más convencional utilizada por las mineras para la extracción de mineral aurífero de baja ley, se ha aplicado con éxito a la lixiviación de oro de una amplia variedad de minerales y concentrados durante mucho tiempo de forma convencional y ha demostrado ser muy eficiente y rentable. Se ha venido aplicando desde finales del siglo XIX, la cianuración obtuvo su patente en 1887 en el Reino Unido, sin embargo, la acción del cianuro de potasio como complejante del oro fue descubierta desde 1793. (Vazquez, 2008)

Las sales de cianuro simple, como el cianuro de sodio, potasio y calcio, se disuelven en agua para formar los respectivos cationes metálicos e iones de cianuro libres. En el caso del cianuro de sodio, tenemos:



El cianuro al ser el compuesto más utilizado en la industria minera del oro, principalmente debido a los siguientes factores (Marsden & House, 2006):

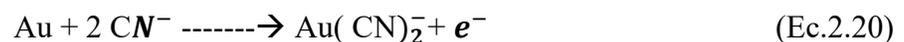
- ✓ A pesar su toxicidad, se puede aplicar con poco riesgo para la salud y el medio ambiente.
- ✓ El oxidante más comúnmente utilizado en la lixiviación con cianuro es oxígeno
- ✓ Su relativo bajo costo.
- ✓ Efectividad en la disolución de oro y plata.
- ✓ Selectividad para oro y plata por encima de otros metales.

Por temas ambientales con el cianuro, ha sido necesario buscar alternativas a éste debido a los siguientes factores:

- ✓ Afectaciones a la salud debido al mal manejo de éste reactivo.
- ✓ Restricciones a su uso en algunos países debido a su mala percepción.
- ✓ Impactos ambientales generados por su uso inadecuado.
- ✓ Problemas de recuperación de oro asociado a minerales refractarios.

La lixiviación de cianuro ocurre a través del siguiente mecanismo electroquímico, el cual está representado en la figura 12 por las siguientes reacciones:

Reacción anódica: En la reacción anódica ocurre la oxidación, creando un complejo estable con cianuro llamado complejo de aurocianuro. (Marsden & House, 2006)



Reacción catódica: El oxígeno obtenido del aire y el agua presente en la solución forman peróxido de hidrógeno e iones OH, que se transportan a la solución. (Marsden & House, 2006).

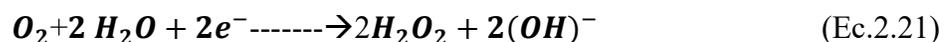


Figura 12

a) Representación esquemática de la celda de corrosión local en una superficie de oro

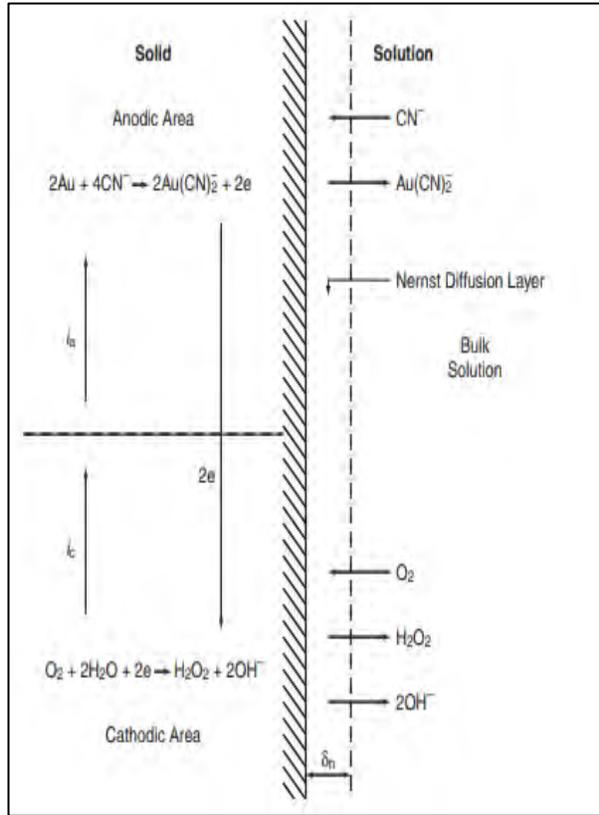
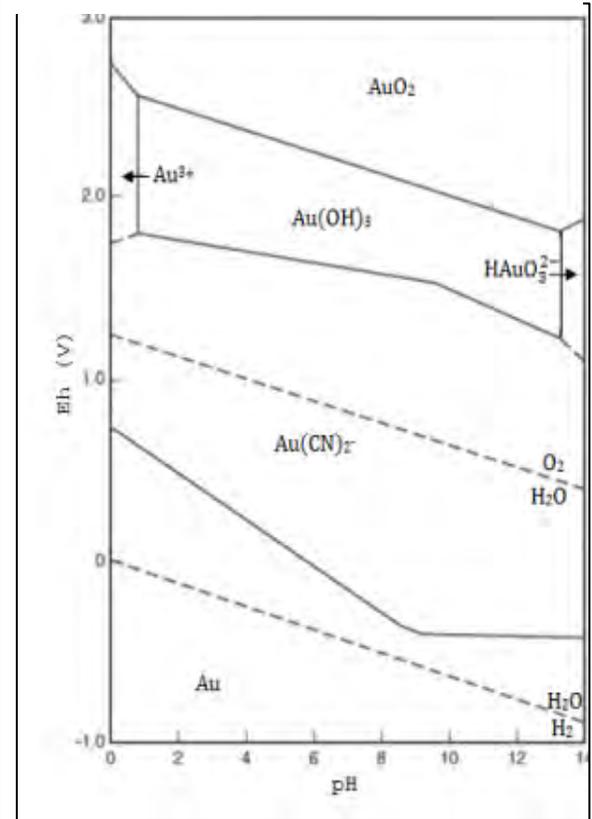


Figura 13

b) Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema Au - H₂O - CN⁻ a 25°C)



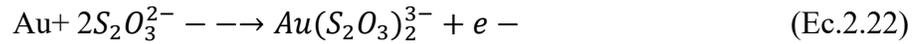
Nota: a) se observa en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno: i_a = la corriente anódica; i_c = la corriente catódica. b) Concentraciones de todas las especies de oro soluble = 10^{-4} M [6]. $[CN^-]$ total = 10^{-3} M, $pO_2 = pH_2 = 1$ atm, $\log ([H_2O_2] - [HO_2^-] / pO_2)$ The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006.

2.2.10. Métodos alternativos

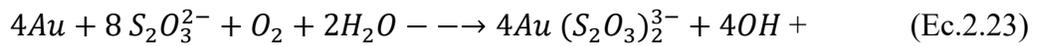
2.2.10.1. Tiosulfato

La capacidad del tiosulfato para formar complejos estables con el oro se conoce desde hace más de 100 años, pero no fue hasta finales de la década de 1970 que se iniciaron investigaciones serias sobre su uso como alternativa. A partir de 1990, con la creciente preocupación por el uso de cianuro y sus efectos en el medio ambiente, la investigación para desarrollar procesos de lixiviación de oro

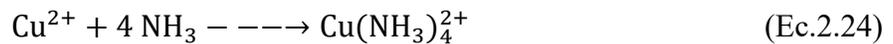
a base de tiosulfato aumentó en todo el mundo. La reacción química y cinética de especies de tiosulfato (S_2O_3) forma complejos estables con oro en soluciones acuosas como se observa en la figura 14 (Marsden & House, 2009):



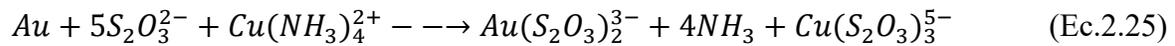
El oro se disuelve en una solución alcalina de tiosulfato, utilizando como agente oxidante el oxígeno disuelto para formar el complejo con Au^+ el diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-NH₃-(S_2O_3)₂³⁻ se puede ver en la figura 15 (Marsden & House, 2009):



La velocidad de disolución del oro con tiosulfato donde el oxígeno como agente oxidante es muy lenta, lo que no justifica su uso comercial. Como se puede ver en la ecuación 2.24, el amoníaco estabiliza los iones Cu_2 en solución como tetramina de cobre. (Marsden & House, 2009):



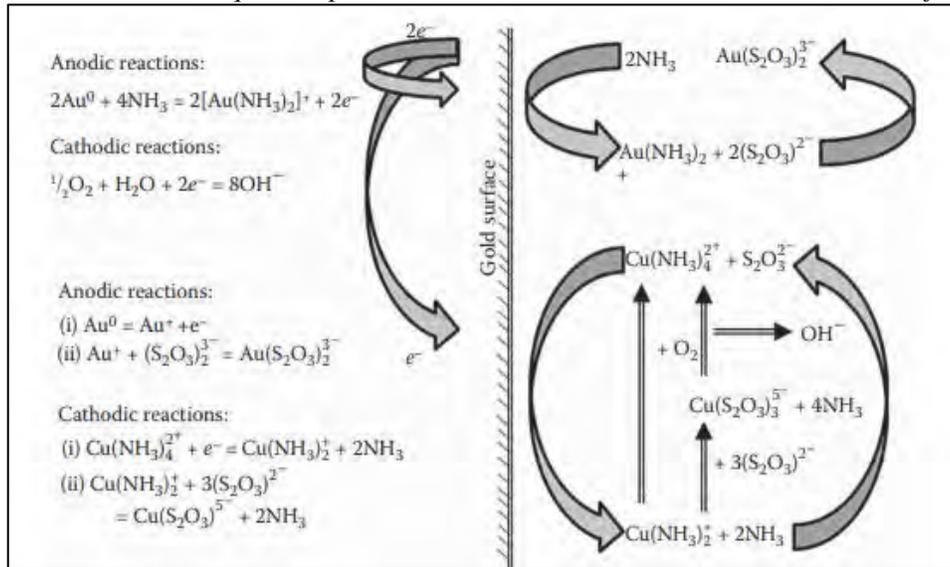
La lixiviación de oro se produce de acuerdo a la reacción (2.25), el cual es el sistema más reconocido por diversos autores como el más eficiente (Marsden & House, 2006).



Si bien este proceso tiene una tasa de disolución relativamente alta y efectos de contaminación muy bajos con respecto a la cianuración, su aplicación en la industria aún es difícil, ya que el tiosulfato se oxida muy fácilmente y provoca un alto consumo de reactivos, por ende existen altos costos operativos.

Figura 14

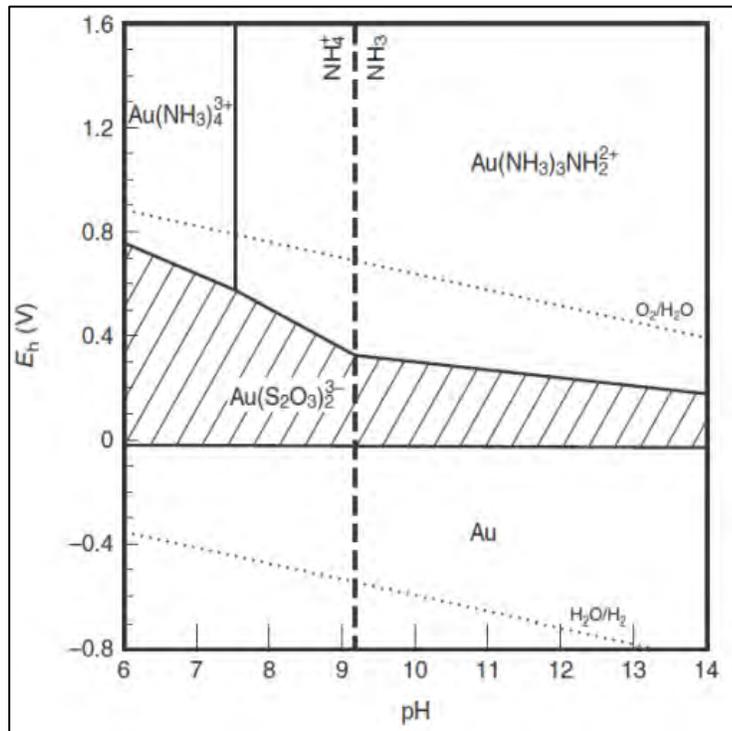
Mecanismo electroquímico para la lixiviación de oro en una solución de tiosulfato



Nota: Extractive Metallurgy 2 Metallurgical Reaction Processes (Alain Vignes,2011)

Figura 15

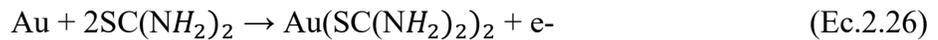
Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-NH3-S2O3-H2O a 25°C,



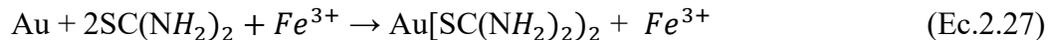
Nota : se observa $[\text{Au}^+] = 10^{-5} \text{ M}$, $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3] = 0.1 \text{ M}$, $[\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+] = 1 \text{ M}$
 Extractive Metallurgy 2 Metallurgical Reaction Processes (Alain Vignes,2011)

2.2.10.2. Tiourea

Esta alternativa ha sido propuesta con la finalidad de sustituir el uso del cianuro para el tratamiento de minerales sulfurados, minerales que consumen cianuro y para usar en lugares donde las preocupaciones ambientales hacen que el uso del cianuro sea difícil. La tiourea es un reactivo relativamente no tóxico, que se comporta como fertilizante vegetal en el medio ambiente, dando la impresión que puede ser una alternativa atractiva al cianuro en áreas ambientales sensibles (Marsden J. y Lain C., 2006, p.281). La reacción química y cinética de la tiourea siendo un compuesto orgánico que se disuelve fácilmente en una solución ácida en una forma molecular estable tiene la capacidad de disolver el oro para formar un complejo estable, como se ve en la siguiente ecuación (Marsden & House, 2006):



Sin embargo, a estas condiciones donde la reacción es muy lenta, por que es necesario utilizar agentes oxidantes fuertes como Fe^{3+} , peróxido de hidrógeno u ozono para que la reacción se desarrolle a una velocidad suficiente que permita la recuperación de oro en un tiempo adecuado (Marsden & House, 2006).



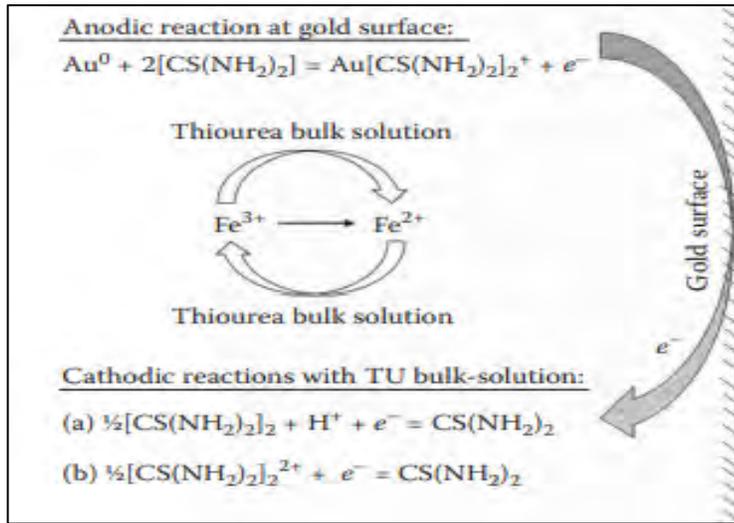
Se observa en la figura 16, el mecanismo de reacción en la lixiviación de tiourea donde se encuentra limitado por el pH al que se puede llevar a cabo en el extremo superior debido a los siguientes puntos (Marsden & House, 2006):

- ✓ En soluciones de tiourea la tasa de lixiviación es mucho más rápida que la disolución con cianuro.
- ✓ Por encima de pH 3 se da la precipitación de Fe^{3+} .

- ✓ En pH superior de 3.5 a 4 se da un fuerte aumento en la cinética de oxidación, en la figura 17 se observa los complejos a formarse en el diagrama Eh-pH

Figura 16

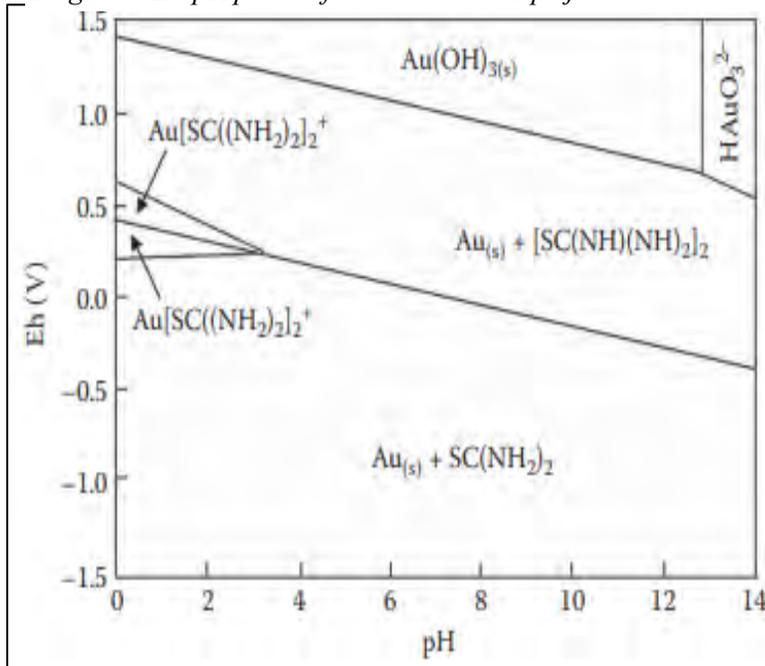
Mecanismo de reacción electroquímica de la lixiviación de oro con tiourea



Nota: Extractive Metallurgy 2 Metallurgical Reaction Processes (Alain Vignes,2011)

Figura 17

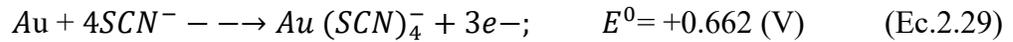
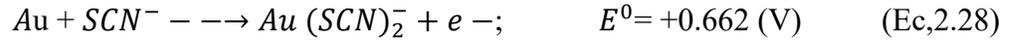
Diagrama Eh-pH para la formación de complejos de oro en solución de tiourea



Nota: Extractive Metallurgy 2 Metallurgical Reaction Processes (Alain Vignes,2011)

2.2.10.3. Tiocianato

El oro se disuelve en soluciones de tiocianato acidificado (SCN) para formar complejos tanto con Au como con Au^{3+} , esto en función del potencial de disolución. (Marsden & House, 2006):

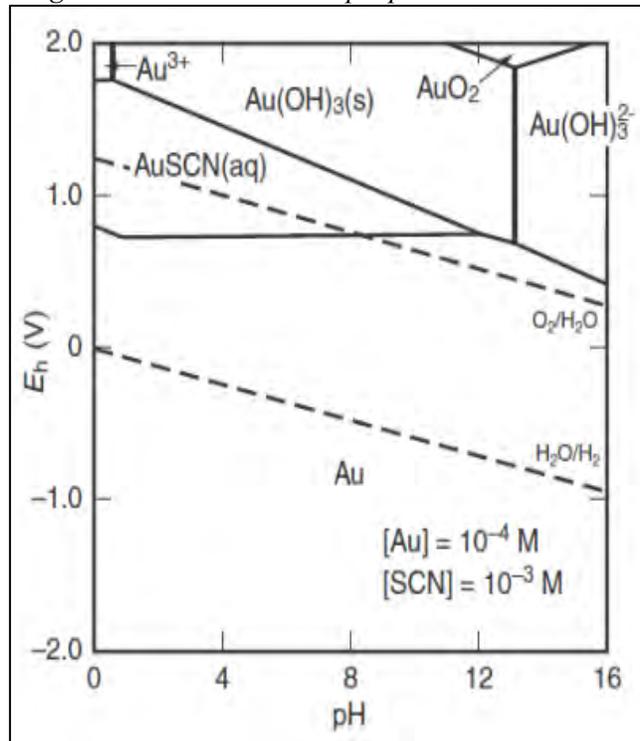


Las constantes de estabilidad para los dos complejos, $Au(SCN)_2^-$ y $Au(SCN)_4^-$ son aproximadamente 10^{17} y 10^{42} , respectivamente, siendo el complejo $Au(SCN)_2^-$ el más estable.

El Fe^{3+} es el oxidante más adecuado para la reacción ya que la cinética de disolución es muy lenta si se usa oxígeno como oxidante y no se puede usar peróxido de hidrógeno porque oxida el tiocianato muy rápidamente. (Marsden & House, 2006).

Figura 18

Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-SCN-H₂O a 25°C,



Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

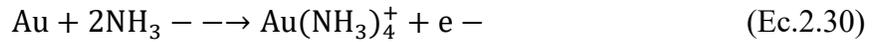
De acuerdo al diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-SCN-H₂O en la figura 18 se puede observar que la velocidad de disolución del oro acelera cuando se aumenta la concentración de tiocianato y, en menor grado al aumentar la concentración de Fe^{3+} . Se han utilizado concentraciones de tiocianato de 0,5 a 5 g / L y Fe^{3+} en concentraciones de 6 a 12 g / L en pruebas de lixiviación en columna a escala industrial y de laboratorio. Dado que el consumo de tiocianato aumenta con la concentración, es importante mantener una concentración de tiocianato suficiente para una disolución eficaz del oro, pero no en exceso.

El aumento de la temperatura aumenta la tasa de disolución del oro, pero también aumenta significativamente la tasa de consumo de tiocianato y, dado el alto nivel de consumo de reactivo incluso a temperatura ambiente, es poco probable que aumentar la temperatura de lixiviación sea una opción viable.

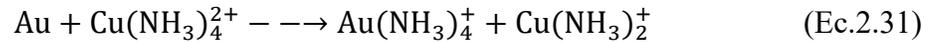
Cuando se usa tiocianato a temperaturas superiores a 10 ° C, se ha informado una disminución significativa en la extracción de oro, probablemente debido al aumento de la oxidación del tiocianato. La solución de tiocianato ácido se muestra como una posible alternativa al cianuro para la lixiviación de oro. Es necesario seguir trabajando para optimizar las condiciones de funcionamiento y minimizar el consumo de reactivos. (Marsden & House, 2006)

2.2.10.4. **Amoniaco**

En este caso el oro se disuelve en presencia de una solución acuosa de amoníaco y un agente oxidante adecuado, como oxígeno, hipoclorito, peróxido de hidrógeno o bromo. La disolución procede a través de la formación de complejos con especies de Au, $(Au(NH_3)_2^+)$, a una forma potencialmente estable del complejo amino Au^{3+} , esto depende del potencial con el que procede la solución como se observa en la ecuación siguiente (Marsden & House, 2006):



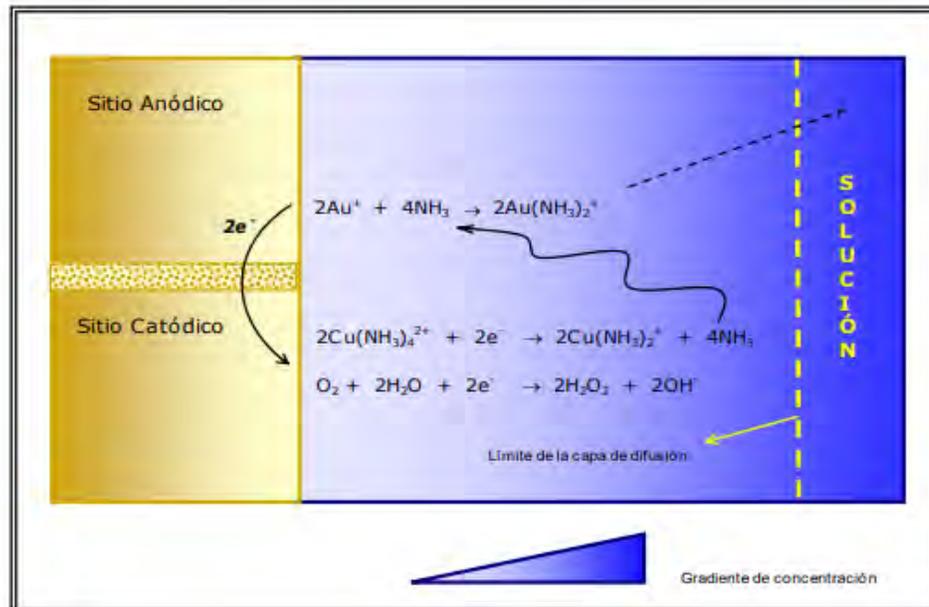
Cuando la temperatura ambiente, el oro se pasiva y la disolución del oro se observa solo en soluciones de amoníaco por encima de 80 ° C, por lo tanto el Cu^{2+} es el oxidante más eficaz para disolver oro en soluciones de amoníaco como se presenta en la siguiente reacción.:



Cuando ocurre el aumento de las concentraciones de amoníaco y cobre aumenta la velocidad de disolución del oro, siempre que haya suficiente amoníaco para formar complejos con el cobre. Alrededor de 9,5 serían las condiciones óptimas para el pH para producir una cinética de disolución eficiente. En la figura 19 se observa el modelo de mecanismo electroquímico-catalítico de la lixiviación del oro que ocurre en una solución amoniacal (Marsden & House, 2006).

Figura 19

Modelo del mecanismo electroquímico-catalítico de la lixiviación del oro en solución amoniacal y sales de amonio.



Nota: Tesis Aplicación del amoníaco como lixivante ecológico de minerales auroargentíferos (Vazquez,2011)

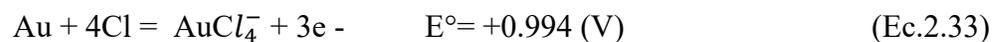
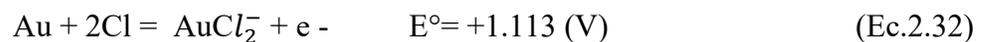
2.2.11. Uso de halógenos

En la búsqueda de sistemas alternativos de lixiviación, el bromo ha recibido la mayor atención, principalmente gracias a los esfuerzos hechos por Great Lakes Chemical Corporation, demostraron que el bromo es un agente lixivante más efectivo que el cianuro tratándose de lixivaciones de materia aurífera. El uso de los sistemas haluro/halógeno para la extracción de oro ha sido documentado en varias publicaciones. El oro con los haluros, se ha reconocido la existencia del complejo Au(I) con el ioduro y de los complejos de Au (III) para el bromuro y el cloruro. Ambas formas de complejos iónicos dependen de las condiciones químicas de la solución. En soluciones acuosas, la estabilidad de los complejos oro-haluro se incrementa en el siguiente orden: Cl- < Br- < I-, lo cual muestra una preferencia al oro.

2.2.11.1. Cloro

A mediados del siglo XIX, la cloración era el sistema de lixiviación estándar para el oro, antes de la implementación del cianuro, el cual fue utilizado para el tratamiento de minerales que contenían oro fino y oro asociado a sulfuros, que no pudieron ser recuperados por métodos gravimétricos ni por fundición.

Este método ha sido reemplazado generalmente por el uso del cianuro, aunque se ha propuesto como una alternativa para el tratamiento de minerales refractarios y carbonosos. La reacción química y cinética del oro se disuelve en soluciones de cloruro, para formar complejos tanto con Au como con Au³⁺, esto en función de su potencial de disolución. (Marsden & House, 2006).

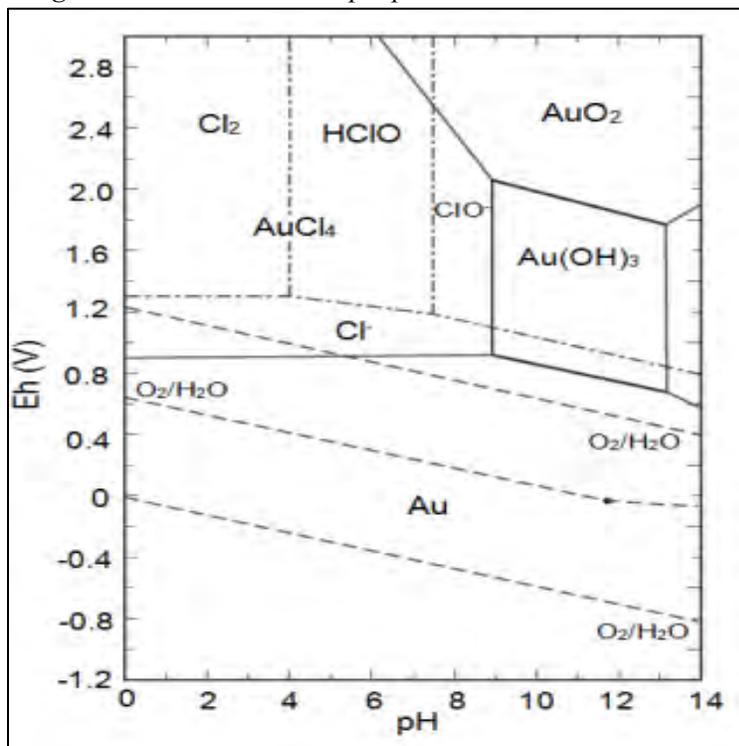


Por lo tanto, el complejo de Au³⁺, es más estable que la especie de Au⁺.

Durante la oxidación sólo se producirá por encima de aproximadamente 1.2 V, por tanto, es necesario un agente oxidante fuerte, por ejemplo, cloro, ozono o iones clorato, para disolver el oro a una cinética razonable. Los equilibrios de soluciones correspondientes se muestran en la figura 20 representado por el diagrama Eh-pH para el sistema de Au-Cl-H₂O. Además, el hipoclorito de sodio, que está comúnmente presente en los sistemas de lixiviación de cloruros, tiene un efecto adverso sobre la tasa de adsorción debido a sus propiedades oxidantes (Marsden & House, 2006).

Figura 20

Diagrama de estabilidad Eh-pH para el sistema Au-Cl-H₂O a 25°C



Nota: Extractive Metallurgy 2 Metallurgical Reaction Processes (Alain Vignes, 2011)

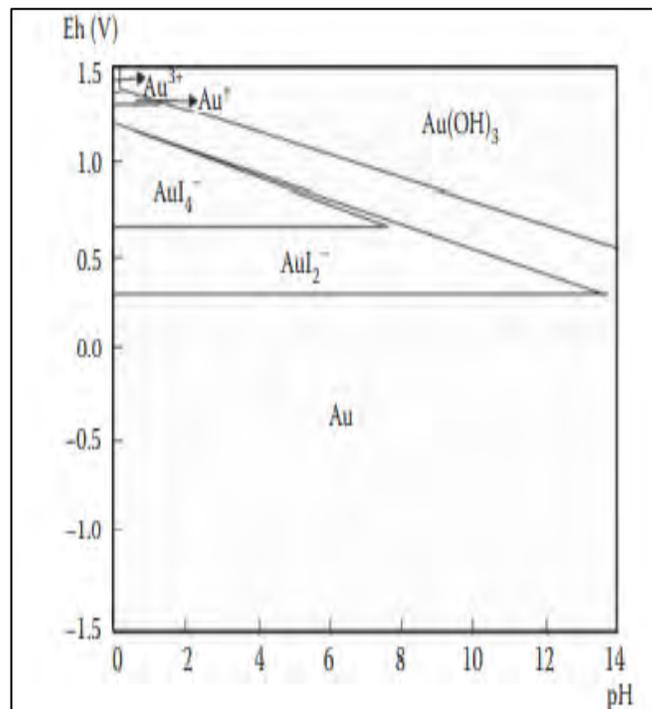
En este método el cloro es un oxidante más adecuado, puesto que también permite suministrar los iones de cloruro para la disolución de oro, además de las especies hipocloroso que son fuertemente oxidantes. Se puede considerar al ácido nítrico también como un oxidante fuerte para disolver el oro en medios clorurados, esta combinación se aplica en una técnica establecida para el análisis de oro, a la cual se le conoce como agua regia (Marsden & House, 2006).

2.2.11.2. Yodo

Las primeras aplicaciones de los sistemas yoduro / yodo fueron en la extracción de oro de materiales electrónicos y otros desechos similares, por lo que su desarrollo es promovido principalmente por no metalúrgicos. Este proceso fue en una columna de lixiviación usando una solución que contiene una combinación de yoduro / yodo, este último actuando como un agente oxidante. El oro se recuperó usando carbón activado y el yoduro en exceso producido se oxidó electroquímicamente a yodo usando una celda de diafragma especial. La figura 21 muestra que el yodo puede formar complejos con el oro de dos formas, dependiendo del número de oxidación del oro en Au^+ y Au^{3+} , siendo el complejo Au^+ el más adecuado para los potenciales redox.

Figura 21

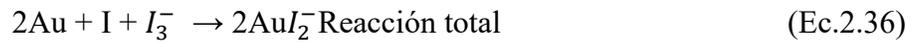
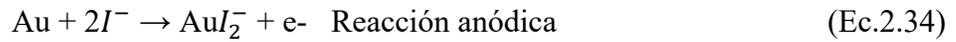
Diagrama eh-pH de complejos de oro en medios de yoduro



Nota: The Chemistry of Gold Extraction (Marsden & House), 2006

El yodo elemental, es muy poco soluble en agua pura, pero su solubilidad aumenta al aumentar la cantidad de iones de yoduro. La disolución conduce a la formación de varios iones como:

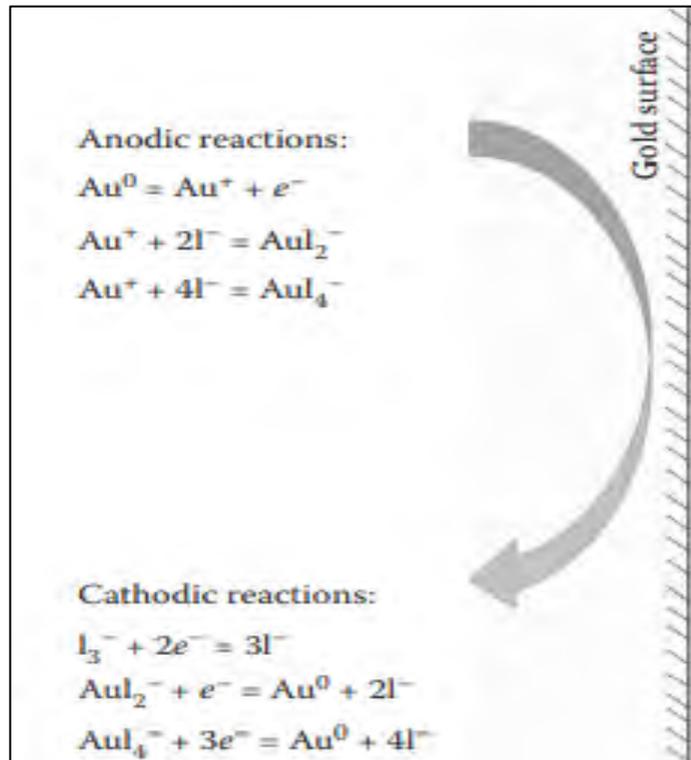
I_3^- , I_4^{2-} , I_5^- e I_6^{2-} . Según los trabajos de Qi y Hiskey (1991) y Davis et al. (1993), la disolución del oro en un electrolito iodado es un proceso electroquímico que puede representarse como:



Este sistema de lixiviación posee ciertas ventajas como su bajo potencial de oxidación y la buena estabilidad en solución acuosa, comparado con los otros halógenos, ver figura 22.

Figura 22

Mecanismo electroquímico de lixiviación de yoduro de oro

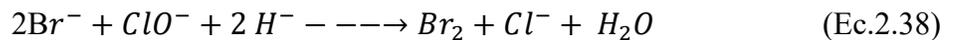
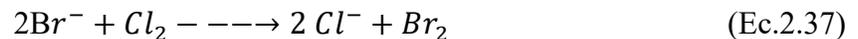


Nota : Extractive Metallurgy 2 Metallurgica Reaction Processes
(Alain Vignes,2011)

2.2.11.3. Bromo

Según von Michaelis, 1987, el bromo como lixiviante del oro, fue descrito por primera vez en 1846, donde el bromo en medio acuoso-líquido reacciona exotérmicamente con el oro para formar el auribromato Au_2Br_6 , y formar un complejo de tipo $(AuBr_3)^-$. El monobromuro de oro, es sensible a la humedad y se descompone en complejos de auri- y aurobromida, correspondientemente $(AuBr)^-$ y $(AuBr_2)^-$.

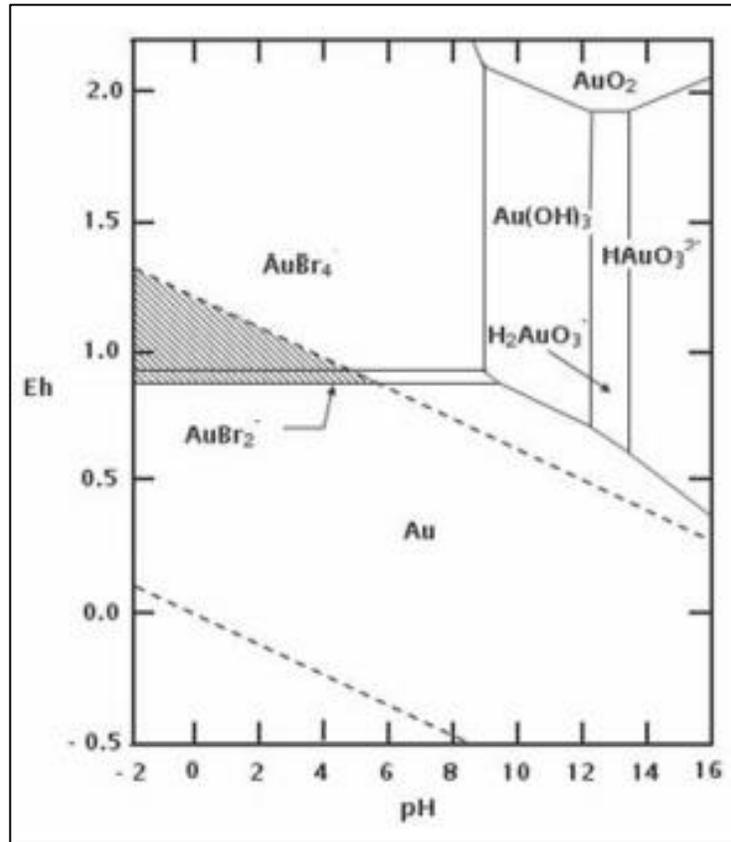
La cinética de lixiviación del oro con bromo se acelera enormemente en la presencia de un catión protónico (por ejemplo, NH_4^+) y un reactivo oxidante. También es posible una rápida lixiviación de oro en condiciones de pH casi neutro, con el requisito de alto potencial redox ($E_0 = 0,97$ V) en comparación con la cianuración del oro ($-0,57$ V). La estabilización del complejo de bromuro de oro se puede lograr mediante la adición de un oxidante fuerte como el ácido bromhídrico. El bromo se puede introducir en la suspensión con hipoclorito o cloro, utilizados como oxidantes para convertir el bromuro en bromo como se observa en la ecuación 2.37 (Ilyas & Lee, 2018):



En la figura 23, se observa que este elemento puede formar dos complejos estables de oro en solución acuosa según las zonas de intersección entre los dominios de estabilidad, a diferencia del cloro, lo cual significa que se requieren condiciones menos oxidantes y de acidez.

Figura 23

Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-Br-H₂O a 25°C



Nota: Dissolution Chemistry of Gold and Silver In Different Lixiviants. (Hiskey y Atlury, 1988).

Los estudios sobre el uso del bromo para la lixiviación de oro no son muy extensas, son pocos avances referentes al uso de este elemento. La primera información más resaltante fue a finales del siglo XIX hasta los años 80, cuando se inició el desarrollo de una fuente de bromo, especialmente para un manejo más seguro en las soluciones de lixiviación conocidas bajo el nombre GEOBROM. El uso del GEOBROM sería una tecnología más limpia y favorable a la inversión para reducir el impacto medioambiental. A excepción del manejo de bromo / bromuro, sería una tecnología más limpia con menos inversión para mitigar el impacto ambiental (Vazquez, 2008).

Según otro registro sobre el uso de bromo como lixiviación de oro, fue el proceso de Schaeffer en su patente de 1882, que fue mejorado por Hinman en 1885, cuando descubrió la necesidad de exceso de bromo y su regeneración durante el proceso de disolución del oro, posteriormente fue mejorado aún más en 1903 por Cassel, ya que fue el primero en utilizar el medio alcalino para recuperar bromo en forma de bromatos y así producir bromo in situ por acidificación. Mientras tanto en 1942 Fink y Putnam patentaron un proceso en el que agregaron cloro para la producción in situ de bromo como su regeneración para poder seguir utilizando ese bromo en la lixiviación del oro (Pesic y Sergent, 1993).

Pesic y Sergent (1993), ambos estudiaron el mecanismo de disolución de oro con bromo elemental usando la técnica de disco rotatorio. Dentro de los principales parámetros estudiados fueron la concentración de bromo/bromuro (Br/Br^-), velocidad de agitación, pH y la temperatura, así como, también el efecto en la velocidad de reacción de cloruro de sodio (NaCl), manganeso (Mn), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y de los ácidos siguientes: bromhídrico (HBr), sulfúrico (H_2SO_4), nítrico (HNO_3) y clorhídrico (HCl). Algunas de las conclusiones más importantes que obtuvieron en su investigación son:

- 1) El mecanismo de reacción es electroquímico / químico, con el componente electroquímico responsable de la formación de $(\text{AuBr}_2)^-$ mientras que el componente del mecanismo químico es responsable de la disociación del complejo anterior en una forma más estable como $(\text{AuBr})^-$. lo que va a la solución.

- 2) El pH no afecta la velocidad de disolución en el intervalo de 1 a 7 y de ahí en adelante, la velocidad disminuye en la medida que se incrementa el valor de pH.

- 3) El ion bromuro (Br^-) es imprescindible para que se logre la disolución.

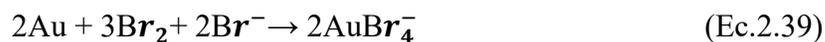
4) El ion manganeso (Mn^{2+}) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) presenta efectos negativos en la velocidad de reacción.

5) La velocidad de disolución del oro en bromo es 21 veces mayor comparada con la obtenida con cianuro y cerca de 10 veces comparada con la de tiourea.

Para resumir el trabajo de Pesic y Sergent consistió en evaluar, mediante la técnica del disco rotatorio, el efecto de la velocidad de rotación, tiempo de lixiviación, temperatura y concentración de agentes oxidantes como el ión férrico (Fe^{3+}), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% e hipoclorito de sodio ($NaClO$), solo o en combinación entre sí, en la lixiviación de oro con soluciones bromadas con el objetivo de encontrar aplicabilidad a este método, ya que se desconoce su aplicación en metalurgia extractiva. La síntesis del resultado de su investigación es:

- ✓ La velocidad de disolución del oro fue casi el triple, comparada con la de un proceso convencional de cianuración, por el efecto combinado del Fe^{3+}/H_2O_2 .
- ✓ La temperatura es un factor importante, ya que la velocidad de reacción aumentó 2.5 veces al elevar la temperatura de 15 a 30°C.

De acuerdo a Trindade et al., (1994), si el bromo se usa como agente oxidante la reacción de disolución puede representarse por:



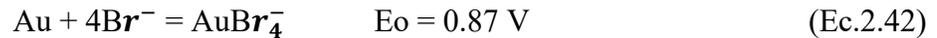
Donde el ion bromuro (Br^-) es el agente complejante. Se conoce que el bromo en solución acuosa se hidroliza en forma de ácido hipobromoso según la reacción siguiente:



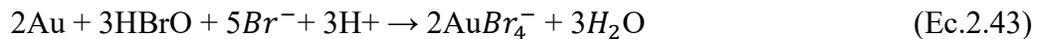
Por lo tanto, si el HBrO se desempeña como agente oxidante, entonces el oro puede disolverse de acuerdo a:



Dadgar (1989), propone que la disolución del oro en soluciones bromadas en un proceso electroquímico que puede ser representado por la ecuación 2.42.



Sin embargo, Dadgar (1989), llegó a comparar la extracción, recuperación y economía de la lixiviación de oro utilizando soluciones de cianuración contra el bromo en dos concentrados refractarios que han sido tostados por su alto contenido de carbono y azufre. En sus experimentos con la solución de bromuro, utilizó bromuro de sodio (NaBr) y GEOBROM 3000, como fuentes de iones de bromuro para su solución de lixiviación y dejó la reacción que describe la disolución del oro con este producto de la siguiente manera:



De acuerdo con la reacción 2.43, el oro se oxida primero a Au^{3+} por el HBrO para luego estabilizarse en forma del complejo AuBr_4^- por la acción del ion bromuro. Las condiciones experimentales bajo las cuales obtuvo recuperaciones del orden del 95 % con ambos métodos fueron: temperatura ambiente, pH de 4 a 6 y potenciales de oxidación entre 0.7 y 0.9 V, en un lapso de 6 horas, el cual fue 8 veces menor que el de cianuración.

En el trabajo realizado por Quijano et al. (1993), Con el mismo método, se investigó la recuperación de oro y plata de un mineral oxidado de México, la aplicación de bromo como lixiviación directa y como pretratamiento de acidificación. El resultado obtenido y comparado con

el cianuro del mismo mineral, mostró que el uso de bromo es muy prometedor y por lo tanto se necesita más investigación al respecto. Teniendo en cuenta la información al respecto, se puede decir que la visión general de los estudios investigados es apropiada por las contribuciones relacionadas con el contenido a nivel químico, sobre la disolución del oro con soluciones bromadas y por los resultados obtenidos en algunos casos, y demuestra la aplicabilidad de este lixiviado alternativo.

2.2.12. Generalidades sobre el uso de bromo como agente lixivante

2.2.12.1. Propiedades del bromo.

El bromo es un elemento químico perteneciente al grupo VIIA del sistema periódico en el que se agrupan los halógenos, no metales que tienen gran afinidad por otras sustancias y, en consecuencia, tienden a formar sales. El bromo con símbolo Br y configuración electrónica externa $3d^5 4s^2 4p^5$, el bromo no se encuentra en estado elemental en la naturaleza, aunque como combinación es relativamente abundante, en especial en forma de bromuro en las aguas marinas, a partir de las cuales se obtiene por reacción con cloro. Ocurre en bajas concentraciones en la corteza terrestre, que van desde unas pocas partes por mil millones hasta alrededor del 1%. Comercialmente, la mayor parte del bromo proviene de fuentes naturales, el bromo elemental es un líquido rojo denso con humo y un olor acre. Tiene un peso específico de 3,12 g/L a 20 ° C, un punto de congelación de 7,3 ° C y un punto de ebullición de 58 ° C. Además, es el único elemento líquido no metálico a temperatura ambiente, por tanto, la solubilidad del bromo es de 3.86 g por 100 g de H₂O a 3.84 °C, esta aumenta en presencia de cloruros o bromuros y disminuye en presencia de sulfuros o nitratos. El bromo es muy corrosivo para la mayoría de los metales en presencia de humedad ,se mantiene seco en tanques revestidos de plomo o níquel, prestando especial atención al control del agua.

Los estados de valencia más estables de las sales de bromo son 1 y 5, aunque también se conocen 1, 3 y 7, dentro de amplios límites de temperatura y presión, las moléculas en el líquido y el vapor son Br_2 diatómico, con un peso molecular de 159,818 g/mol. Como el resto de elementos del grupo de los halógenos, se caracteriza por su alta capacidad de oxidación, el cual es un factor que favorece la facilidad de combinarse con otros miembros del sistema periódico y de disolverse en numerosos compuestos orgánicos, como alcohol, cloroformo o carbono. El bromo en combinación con otro elemento simple más electropositivo, metálico o no metálico, da lugar a la formación de bromuros. Las propiedades de los bromuros son intermedias entre las de los cloruros y los yoduros. Los bromuros metálicos se estudian individualmente con sus respectivos metales, generalmente son sólidos y tienen un aspecto salino, su color varía según la naturaleza del metal, muchos de ellos son fácilmente fundibles y volátiles. (Bernal Alava, 2018)

2.2.12.2. Datos de toxicidad del bromo.

La toxicidad del bromo es muy similar a la del cloro. En general, los halógenos son menos tóxicos que el cianuro. El bromo elemental es un potente oxidante, es muy corrosivo para la piel y otros tejidos, provocando quemaduras e irritación. El valor límite para el bromo gaseoso es de 0,1 ppm durante 8 horas al día. Los valores de concentración de vapor de bromo que se consideran letales en los textos toxicológicos son 53 y 308 mg / m^3 para una persona con un tiempo de exposición de 0,17 y 0,5 h, respectivamente. Con los mismos tiempos de exposición, los valores de concentración de cianuro de hidrógeno son 198 y 149 mg / m^3 . Las sales de bromo disponibles comercialmente (bromuros de sodio, calcio y potasio) generalmente se consideran no tóxicas. En concentraciones bajas, el bromuro es prácticamente indetectable para la mayoría de los organismos. (Lenntech Water Treatment Solutions, 2020)

2.2.12.3. **Productos comerciales de bromo.**

Según A. Dadgar and B.M. Sanders, 1990, hay una gran variedad de productos utilizados para generar bromo libre. Las opciones varían desde el bromo elemental, que tiene el costo más bajo, pero es de muy difícil manejo, hasta los productos desarrollados por The Great Lakes Chemical Corporation, que inicialmente produjo el Geobrom 3114, y la DBDmH (dibromo-dimetilhidantoina o Geobrom 5500), la cual es cara, pero de muy fácil manejo. Generalmente, el bromuro de sodio (Geobrom 099 o 4600) o el ácido bromhídrico puede ser la opción más efectiva en costo si el bromuro es regenerado a bromo en el circuito. El Geobrom 3400 es una mezcla de bromo y bromuro de fácil manejo, el cual contiene cerca de 34% de bromo como Br_2 y es el producto adecuado para sistemas de arranque o bien en sistemas sin regeneración.

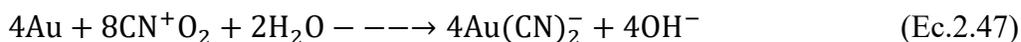
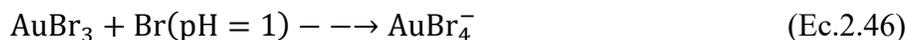
2.2.12.4. **Bromuro de Sodio.**

Según M. Yañez, 1995, la química de los halógenos ha sido investigada aproximadamente por 100 años y puede ser otra alternativa para suplir la cianuración. El cloro, bromo y yodo se están aplicando en varios procesos los cuales se han mostrado efectivos para la extracción de oro de ciertos minerales, además, indica que a mediados del siglo XIX Herbert Dow vendió un producto conocido como sales minerales para la liberación del bromo elemental en solución, el siguiente desarrollo de relevancia ocurrió en 1940 cuando las sales de bromo fueron usadas para aumentar la disolución de oro. En 1987, la compañía Great Lakes Chemical recibió una patente por un proceso de extracción de metales preciosos usando la química del bromo por medio del compuesto N-halo hidantoina que permite oxidar el oro y la plata de sales solubles, este sistema ha mostrado ser efectivo para ambos metales preciosos, siendo sus principales ventajas:

- ✓ Alta eficiencia de extracción.
- ✓ Rápida disolución del metal.

- ✓ Fácil control de la química de la lixiviación.
- ✓ Amplio rango de pH de operación.
- ✓ Desechos no peligrosos.

La formación del dibromo-dimetil-hidantoina en agua disociado con ácido hipobromoso y en dimetil-hidantoina se puede observar en la reacción 2.44, mientras el ácido hipobromoso en solución oxidará al oro a tribromuro de oro como lo indica la reacción 2.45. El tribromuro de oro se complejará fuertemente con un ion de bromo para dar tetrabromuro de oro como se observa en la reacción 2.46. Si se compara la disolución con cianuro, éste se oxida usando oxígeno en presencia de un ion de cianuro para producir un ion de cianuro de oro, como lo indica la reacción:



La carga de oro en carbón activado a partir de soluciones de bromuro ha sido estudiada por algunos investigadores (Brussov 1909, Dadgar 1989, Mensah Biney 1988, Pesic y Storhok 1992, Mensah y Biney 1993) basados en los potenciales de reducción estándar del sistema oro-bromuro.

Brussov propuso que el oro es adsorbido parcial o totalmente por reducción a partir de soluciones de bromuro. Dadgar hizo pruebas de recuperación de oro por adsorción en carbón activado, intercambio iónico en resinas y precipitación con zinc a partir de soluciones de lixiviación con Geobrom (NaBr), los resultados indicaron un 95 % de extracción de oro en todos los sistemas de extracción utilizados.

Examinando las características de carga de bromuro de oro en carbón activado se encontró una oxidación significativa de la superficie del carbón durante el proceso de carga, Pesic y Storhok estudiaron los parámetros fundamentales de la cinética para la adsorción de oro en carbón activado a partir de soluciones bromo-bromuro, encontraron que el oro metálico no fue precipitado excepto cuando una alta concentración inicial de oro-bromuro fue utilizada y proponen que el complejo bromuro-oro se adsorbe en carbón activado como la especie $AuBr_4^-$. En términos de estabilidad relativa, el oro forma complejos mucho más estables con cianuro que con bromo sin embargo la di-metil hidantoina es básicamente una molécula no tóxica y biodegradable.

Los iones de bromo tienen una toxicidad semejante a la del cloruro de sodio, sin embargo, cuando los minerales con valores son del tipo refractario, este reactivo bromuro de sodio y un agente oxidante, fracasan en lograr porcentajes de extracción elevados. Por lo que estos minerales deben ser pretratado por algún proceso como la biooxidación y solo después aplicar la técnica de lixiviación con bromuro de sodio. Lo que más concierne al tratamiento de aguas de desechos para un proceso que utiliza hidantoina y bromo son metales pesados contenidos en solución. Una simple precipitación con cal es usualmente todo lo que se requiere para limpiar el agua de estos procesos.

2.2.12.5. **El Bromuro Cúprico**

Según M. Yañez, 1995st, este reactivo tiene formula $CuBr_2$, peso molecular 223.40 y punto de fusión 498 °C. Forma cristales prismáticos negros del sistema mono cíclico. Es muy soluble en agua, menos soluble en alcohol, acetona, amoniaco y piridina e insoluble en benceno. Evaporando una solución de bromuro cúprico, se forman cristales rectangulares amarillo-verdosos de dehidrato.

Existe muy poca información en cuanto al uso del bromuro cúprico como agente lixivante. Entre los trabajos que se han realizado se encuentra un estudio comparativo entre el proceso de cloruro de cobre (II) y bromuro de cobre (II) para el proceso básico.

El bromuro cúprico en solución de bromuro de sodio demostró ser un efectivo agente lixivante para sulfuros de cobre y minerales concentrados.

El uso de iones bromuro de base acuosa en la lixiviación da como resultado una cinética de lixiviación mucho más rápida y más completa que con soluciones de cloruro de concentraciones comparables. Además, se facilita la separación del cobre y no ocurren cambios drásticos en la operación de electrodeposición.

2.2.12.6. **Ácido Bromhídrico**

El ácido bromhídrico, o bromuro de hidrógeno, es un gas incoloro en condiciones normales, volátil, humeante en el aire, con un olor acre e irritante muy similar al ácido clorhídrico (National Institute for Occupational Safety and Hygiene, 2011), en solución acuosa es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosivo: irrita severamente los ojos y la piel.

Es la solución acuosa de gas bromuro de hidrógeno lo que lo convierte en un ácido más fuerte que el ácido clorhídrico y menos fuerte que el yoduro de hidrógeno. Es uno de los ácidos minerales más fuertes conocidos, reacciona violentamente con agentes oxidantes fuertes como nitratos o cloratos y muchos compuestos orgánicos ver ficha técnica en el anexo N°.

✓ Propiedades físicas.

A temperatura ambiente se presenta en forma de gas; es volátil, humeante y más denso que el aire, no es inflamable y tiene un olor acre. Su densidad es de 2.8 g / cm^3 en relación al aire, y por presión y enfriamiento se licua a 73° C y forma un líquido incoloro que puede solidificarse en una masa cristalina a 120° C . Como el ácido clorhídrico, el ácido bromhídrico es muy soluble en agua; reaccionar violentamente y liberar gases inflamables y tóxicos; también da un líquido con propiedades fuertemente ácidas que contiene iones Br y H; un volumen de agua a 10° C disuelve aproximadamente 600 volúmenes de bromuro de hidrógeno. Su reactividad debe tener en cuenta la disolución en agua es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva. Reacciona violentamente con oxidantes fuertes y muchos compuestos orgánicos. Ataca a muchos metales formando gas inflamable de hidrógeno es un gas más denso que el aire.

✓ Usos del ácido bromhídrico.

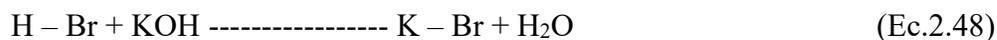
Principalmente el ácido bromhídrico se utiliza como catalizador en la producción de productos químicos y farmacéuticos como zinc, calcio y bromuro de sodio, también se utiliza como disolvente y para corregir compuestos orgánicos con enlaces covalentes entre átomos de carbono y bromo. En el campo médico se aplica como sedante o antiepiléptico, y en medicina veterinaria como medicamento. El bromuro de hidrógeno está presente solo en procesos químicos, se obtiene por reacción directa de bromo e hidrógeno, como subproducto de la bromación de compuestos orgánicos y del agua de mar. Se utiliza en la producción de bromuros orgánicos e inorgánicos, como agentes intermedios en numerosas síntesis químicas, está disponible comercialmente en forma de solución acuosa o como gas licuado, a partir del ácido bromhídrico se crean importantes elementos orgánicos para la industria como el bromuro de alilo o el fenol. También se utiliza como reactivo en los procesos industriales de isomerización, polimerización, hidratación, deshidratación

y esterificación. Además de ser una materia prima fundamental en la fabricación de materiales fotosensibles, tintes y fumigantes utilizados en horticultura o en tratamientos pos cosecha. (Instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo, 2011).

En los últimos años el ácido bromhídrico en la aplicación de la industria minera está en crecimiento debido los buenos resultados en la mejora de extracción en mineral aurífero refractario, dándose a conocer por la empresa Cycladex. Dicha empresa sigue desarrollando mejores aplicaciones con respecto al bromo.

2.2.12.7. Bromuro de potasio

El bromuro de potasio (KBr) es una sal de haluro producida por un elemento fuertemente electropositivo como el potasio (K) y otro elemento fuertemente electronegativo como el bromo (Br). El aspecto físico es un sólido cristalino blanco y es higroscópico; es decir, absorbe agua del medio ambiente. Una forma de conseguirlo es mediante la reacción de neutralización que tiene lugar entre el ácido bromhídrico y el hidróxido de potasio ver ecuación 2.48.



El bromuro de potasio es una sal binaria, producto de la combinación de un átomo de bromo con un estado de oxidación -1, con un átomo de potasio de con un estado de oxidación +1. Por lo tanto, se establece una atracción eléctrica entre el ion Br^- y el ion K^+ .

Este tipo de interacción eléctrica o electrostática es conocida como un **enlace iónico**, el cual se disocia cuando la sal bromuro de potasio se disuelve en el agua, liberándose los iones K^+ y Br^- , estos iones son disgregados por la propiedad del agua de mantener separadas las cargas eléctricas de signo contrario.

Hasta 1975 se siguió vendiendo libremente, año en que disminuyó su uso por los efectos tóxicos que producía sobre los pacientes, ver ficha técnica en el anexo N°3. Actualmente se sigue usando en varias especies de animales en el tratamiento de las convulsiones, aunque a partir de 1912 fue sustituido por el fenobarbital sódico. El bromuro de potasio se emplea en estudios ópticos correspondientes a la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Asimismo, sirve como material empleado en el campo de la fotografía. (Gabriel Bolívar. Recuperado de <https://www.lifeder.com/bromuro-potasio/>.) .

2.2.13. Descripción Proceso

(USA Patente n° WO 2017/158561 A1, 2016). De acuerdo al resumen la invención se refiere a métodos para la recuperación de metales preciosos tales como oro, plata, platino, paladio y tierras raras a partir de materiales que contienen metales preciosos. Es un método para purificar metales preciosos a partir de un material que contiene metales preciosos que comprende las etapas:

a) Formar una mezcla oxidante ácida acuosa a partir de peróxido de hidrógeno, un ácido y una fuente de ion bromuro, teniendo dicha mezcla oxidante ácida un pH en el rango 0 a 6.

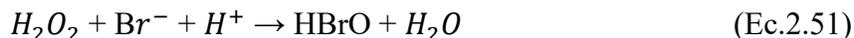
b) Poner en contacto la mezcla oxidante ácida con el metal precioso o material para oxidar el metal y formar una solución de sal de bromuro metálico.

c) Controlar la solución de sal de bromuro metálico a un valor en el rango de 3 a 7 proporcionando iones de metal alcalino en la solución para formar una solución de metal alcalino / bromuro de metal que contiene la sal en solución.

d) Añadir ciclodextrina a la solución de metal alcalino / bromuro metálico para precipitar un complejo de ciclodextrina metálica.

e) Recuperar el complejo de ciclodextrina metálica.

En la etapa a) eso se cree que tiene lugar la siguiente reacción:



En la etapa b) eso se cree que tienen lugar las siguientes reacciones:



En la etapa c) la sal $AMBr_{n+1}$ formado.

En la etapa d) el complejo $AMBr_{n+i} - mH_2OcpCD$, donde p es la relación entre equivalentes de unidades de CD en el complejo y moles de $AMBr_{n+1}$. El material que contiene metales preciosos contiene al menos uno de estos metales preciosos M en forma de metal (M°).

En el nuevo método, para la etapa a) se puede seleccionar un haluro de hidrógeno (fluoruro de hidrógeno, clorhidrato, bromuro de hidrógeno o yoduro de hidrógeno), ácido nítrico, ácido sulfúrico y mezclas de los mismos. Preferiblemente, el ácido es bromuro de hidrógeno, más preferiblemente se usa una mezcla de bromuro de hidrógeno con ácido nítrico o sulfúrico. La cantidad de ácido utilizada es suficiente para lograr el pH deseado, que está en el rango de 0-6.

La fuente de ion bromuro puede ser al menos en parte del uso de bromuro de hidrógeno solo o en combinación con otro ácido. Adicional o alternativamente, el bromuro puede derivarse de una sal de bromuro soluble en agua, especialmente un bromuro de metal alcalino, lo más preferiblemente bromuro de potasio.

En la etapa c) del proceso, el pH de la sal de metal alcalino / bromuro de metal antes de entrar en contacto con la ciclodextrina, debe estar en el rango de 3 a 7.

Cuando M es oro, a tales pH, el precipitado del complejo alfaciclodextrina con la sal de metal alcalino / bromuro de metal es óptimamente insoluble y dejará sales de bromuro de otros metales

en solución que se pueden recuperar posteriormente usando otros métodos, incluido el carbón activado, convenientemente este proceso se utiliza cuando el material que contiene metales preciosos, especialmente un mineral de oro que tiene una concentración de oro en el rango de 0,1 a 50 ppm y opcionalmente también tiene una concentración de plata en el rango de 1 a 500 ppm.

El proceso de la presente invención utiliza peróxido de hidrógeno como oxidante en el primer paso de procesamiento de un material que contiene metales preciosos. La oxidación tiene lugar en presencia de un anión y un catión para formar una sal soluble con el metal precioso oxidado como el catión Au^{3+} . Esta sal se puede representar como $AMBr_{n+i}$ ($KAuBr_3$), donde M es el metal precioso del estado de oxidación $n+i$ y A es el álcali metal.

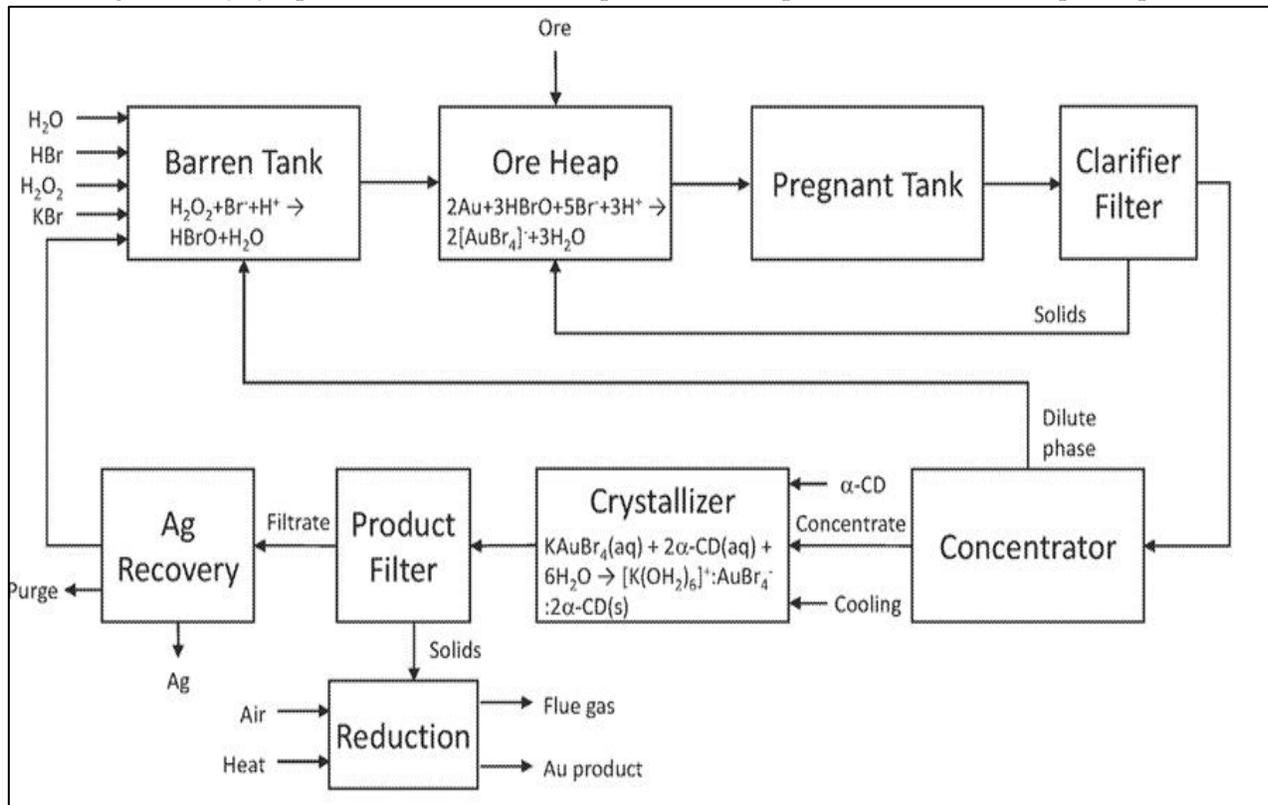
El metal alcalino se selecciona preferiblemente, el ión entre sodio y potasio y lo más preferiblemente es potasio. La sal de $AuBr_4$ con potasio tiene buenas características de formación de complejos con alfa ciclodextrina. Puede proporcionarse peróxido de hidrógeno para su uso en el proceso en forma de una solución acuosa que puede variar en concentración desde 5-100%.

A continuación, en la figura 24 se ilustra esquemáticamente el ciclo de lixiviación en pilas de un mineral de oro, donde se pueden observar las reacciones químicas que tienen lugar en el proceso, primeramente, el lixivante se genera en el tanque estéril donde tiene lugar a la primera reacción, posteriormente el contacto del lixivante con el mineral es por lixiviación que tiene lugar en un montón de mineral acumulado. El montón se forma depositando mineral en forma de material particulado, con tamaños de partícula controlados por medios convencionales que implican la reducción del tamaño de partícula lograda por medios mecánicos o químicos, y / o aglomeración, especialmente para minimizar la presencia de pequeñas partículas que pueden causar problemas en el flujo de lixivante a través del montón de mineral.

El lixiviante se agrega al montón, tiene niveles de control de pH y bromuro, desde la base del montón, el lixiviado se recoge para su control dado que la corriente puede contener partículas residuales, estas pueden recogerse por sedimentación o, si es necesario, pasando a través de un filtro para clarificar el licor.

Figura 24

Es un diagrama de flujo que indica las reacciones químicas clave que ocurren en cada etapa del proceso



Nota: Patente Cycladex (USA Patente n° WO 2017/158561 A1, 2016)

La prueba de lixiviación de oro "reemplazando" algo de bromuro de hidrógeno por bromuro de potasio como lixiviante cumple dos roles, primero el mantenimiento del ácido a condiciones y el suministro de bromuro ambos sean bajo $pH < 2$ y segundo el utilizar de KBr tiene una económica ventaja y también aporta potasio al lixiviado, que es esencial para co-precipitación de $AuBr_4$ con α -CD. El siguiente resultado se observa en la tabla 6 de una prueba mineral, es reduciendo la

cantidad de HBr y agregar KBr en su lugar puede ser hecho sin afectando negativamente las recuperaciones según las siguientes condiciones:

- ✓ Prueba 1: HBr solo ruta 600 g mineral + 722 ml agua, 150 ml 48% HBr (10% Br), 85 ml 35% H₂O₂, pH < 2, 6 h.
- ✓ Prueba 2: HBr más KBr ruta 600 g mineral + 722 ml agua, 135 gramo KBr, 27 ml 48% HBr obteniendo pH hasta 0,97, 85 ml 35% H₂O₂, 6 h.

Tabla 6

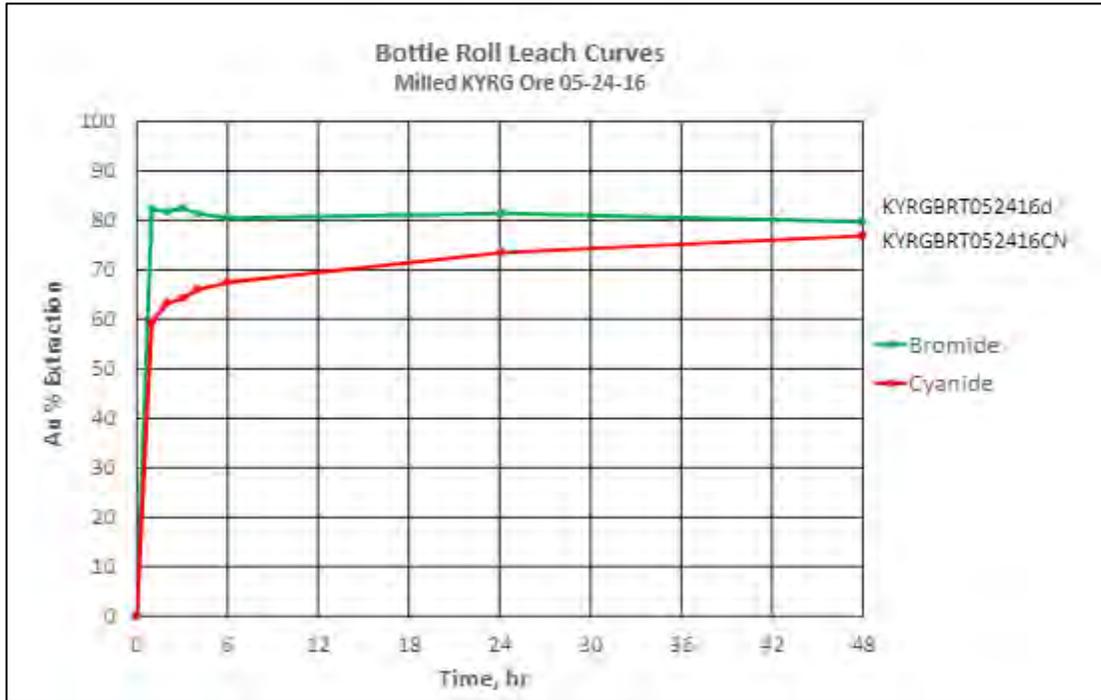
Comparación de resultados de prueba de lixiviación con HBr y KBr

Parámetros	Unidades	HBr solamente lixivante		HBr + KBr lixivante	
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 1	Prueba 2
Masa A u lixiviada de 600 g de mineral	mg Au	8.583	Mismo	16.1 66	Mismo
Masa A u lixiviada por masa de mineral	g Au / TM	14.3	Mismo	26.943	Mismo
Masa total de relaves secas	g mineral	571	Mismo	576	Mismo
Masa Au retenido en ½ AT de relaves	mg A u	0,048	0,063	0.0693	0.0893
Masa Au retenido en 571 g de relaves	mg A u	1,88	2,47	2.739	3.526
Masa Au, retenido + lixiviado basado en 600 g de mineral	mg A u	10,46	11.05	18.905	19.692
Grado de cabeza calculado	g Au / TM	17.4	18.4	31.503	32.803
Recuperación	%	82	78	86	82

Nota: Patente Cycladex (USA Patente nº WO 2017/158561 A1, 2016)

Figura 25

Lixiviación de mineral de Jerooy - Bromuro vs Cianuro



Nota: Cycladex Presentation to Columbia Gold Symposium(<https://docplayer.net/93384617-Cycladex-presentation-to-columbia-gold-symposium-november.html>)

Entre otras pruebas realizadas por la patente de Cycladex se observa en la figura 25, una de las comparaciones entre lixiviación con bromo de acuerdo al procedimiento mencionado en comparación a la lixiviación con cianuro en una prueba de botellas, la línea verde es resultado de la cinética de lixiviación con bromo se puede apreciar que en los primeras horas tuvo una mayor lixiviación de oro llegando mayor al valor de 80%, mientras la línea roja de lixiviación por cianuro logro en un tiempo de 48 horas llega a 78 % aproximadamente.

2.2.14. Peróxido de hidrogeno

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), es un compuesto químico con las propiedades de un líquido altamente polar, fuertemente unido al hidrógeno como el agua, es un líquido viscoso que es un potente oxidante.

A temperatura ambiente es un líquido incoloro con un olor acre o incluso desagradable y sabor amargo en pequeñas cantidades de gas de peróxido de hidrógeno se encuentran naturalmente en el aire.

El peróxido de hidrógeno es muy inestable y se descompone lentamente en oxígeno y agua, liberando grandes cantidades de calor, su velocidad de descomposición se puede incrementar considerablemente en presencia de catalizadores. Aunque no es inflamable, es un potente oxidante que puede provocar una combustión espontánea si entra en contacto con materiales orgánicos o algunos metales como el cobre, la plata o el bronce. (Palmer ,1966).

2.2.15. Efecto del ion común

Establece que en una solución química en donde varias especies se asocian de forma reversible entre sí por un proceso de equilibrio, incrementando la concentración de cualquiera de sus componentes disociados mediante la adición de otro químico que también lo contenga causará un incremento en la cantidad de asociación. Este resultado es una consecuencia del Principio de Le Chatelier por la reacción de equilibrio de asociación/disociación.

Este efecto es comúnmente visto como un efecto sobre la solubilidad de las sales y otros electrolitos débiles, adicionando una cantidad de uno de estos iones de la sal generalmente conduce a un aumento en la precipitación de la sal, la cual reduce la concentración de ambos iones de la sal hasta que el equilibrio de solubilidad es alcanzado. El efecto se basa en el hecho de que ambos, la sal original y el otro químico agregado tienen un ion en común. (Harris, 2007)-

CAPITULO III

HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis y Variables

3.1.1. Hipótesis general

Se extrae más del 70 % oro por lixiviación en columnas utilizando soluciones de bromuro de potasio y ácido bromhídrico del mineral aurífero de la unidad minera Utunsa – Anabi –Haqira Apurímac.

3.1.2. Hipótesis específicas

- ✓ La mineralogía y composición química de oro del mineral aurífero de la empresa Utunsa es adecuada para realizar el proceso de lixiviación en columnas.
- ✓ El consumo promedio de los reactivos cumple con los promedios prácticos de lixiviación en columnas.
- ✓ La ecuación cinética de lixiviación es directamente proporcional a la concentración de ácido bromhídrico y bromuro de potasio.
- ✓ El modelo matemático se ajusta al diseño factorial 2^3 donde interrelacionan de las variables más influentes en el proceso de lixiviación en columnas es la concentración de reactivos y tamaño de partícula.

3.2 Identificación de variables e indicadores

3.2.1. Variable dependiente

- ✓ Porcentaje de extracción del oro en la solución.

3.2.2. Variables independientes

- ✓ Concentración de ácido bromhídrico y bromuro de potasio

- ✓ Tiempo de lixiviación
- ✓ Tamaño de partícula del mineral

3.2.3. Variables Intervinientes

- ✓ Mineralogía del yacimiento
- ✓ Temperatura del medio (°C)

3.2.4. Indicadores

- ✓ Porcentaje de extracción (%)
- ✓ Gramos por litro (g/L)
- ✓ Grado de liberación (“)
- ✓ Días de lixiviación

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 7

Tabla de operacionalización de variables

Variable dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador	unidad
Extracción de oro por lixiviación	Es la cantidad de Oro, expresado en porcentaje, extraído del mineral, mediante el proceso de lixiviación en columnas para disolver la parte soluble de un mineral pulverizado.	La extracción de oro se obtiene de la solución lixivante teniendo en cuenta las variables tiempo, concentración de reactivos y tamaño de partícula.	50-80	-Porcentaje	%
VARIABLES INDEPENDIENTES					
Concentración de solución lixivante	Es la cantidad de la mezcla de los reactivos ácido bromhídrico y bromuro de potasio, que se encuentra disuelto en una cantidad dada de solución.	La concentración lixivante se determina por titulación cuando el mineral se encuentra a una granulometría adecuada, y utilizaremos 3 cantidades diferentes con 3 tamaños de partícula diferentes.	-Concentración del agente lixivante (10-20)	-Cantidad de masa por unidad de volumen del lixivante	(g/L)
Tiempo de lixiviación	Es la medición del contacto superficial de la partícula de un mineral con el agente lixivante para disolver la parte soluble.	Se utilizo una serie de columnas a diferentes tiempos de control de lixiviación para evaluar el oro disuelto.	-Tiempo (7-15)	-Días	Días
Tamaño de partícula	Es resultado de la reducción de tamaño utilizando juego de tamices ASTM.	Se utiliza una serie de tamices (mallas) con diferentes diámetros que son tamizados, se agrega el mineral, luego se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos.	-Tamaño de partícula ¾”, a ¼”	-Pulgadas	(“)

Nota : Elaboración propia

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Ámbito del estudio

4.1.1. Ubicación Geográfica De La Unidad Minera Utunsa-Anabi

La unidad minera Utunsa de la Compañía minera Anabí S.A.C, se ubica en el sur del Perú como se observa en la figura 26, en el flanco oriental de la cordillera occidental de los andes, aproximadamente a 20 Km al Oeste del pueblo de Santo Tomás, políticamente pertenece a la comunidad de Huanca, Provincia de Cotabambas, distrito de Haquira, departamento de Apurímac con una altitud entre los 4100 m.s.n.m y 4610 m.s.n.m, las comunidades aledañas a dicha unidad minera son: la Piscocalla y Pumallaqta. Los accesos para llegar a la unidad minera Utunsa se pueden apreciar en la tabla 8, detallando la distancia en Km y el tiempo que se requiere para llegar.

Tabla 8

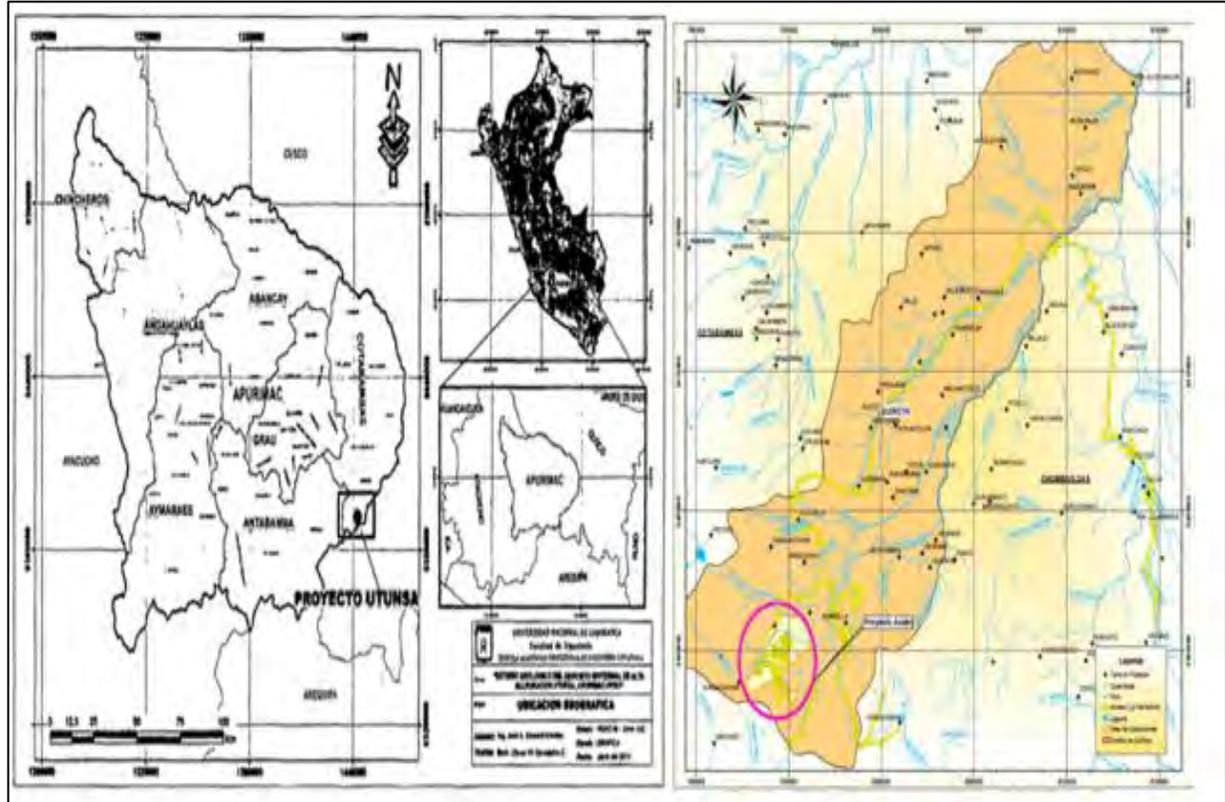
Accesos vía terrestre a la mina

Acceso	Distancia (Km)	Tiempo (h)
Cusco – Espinar (carretera asfaltada)	207	5.00
Espinar- Santo Tomas (carretera asfaltada)	85	3.5
Santo Tomas- Mina Utunsa (carretera)	91	3.2
Cusco – Challhuahuacho – Haquira –Utunsa	220	7.45

Nota: Elaboración propia

Figura 26

Ubicación geográfica de la Unidad minera Utunsa



Nota: Anabí S.A.C, 2011:15

4.1.2. Mineralización

La mina Utunsa -Anabí es un yacimiento epitermal de un ambiente de alta sulfuración, con alteraciones hidrotermales características de este tipo de yacimiento, las distintas alteraciones de minerales están en función de la temperatura, presentándose en forma de trazos con respecto al foco (punto caliente), emplazada en rocas volcánicas de composición sulfurada y oxidada por lo cual la mineralización de oro, ocurre principalmente en los fragmentos rocosos heterogéneos las que estuvieron en contacto con la parte intrusiva y las brechas hidrotermales en la zona volcánica.

Las principales alteraciones conocidas como sílice masiva 1 y la sílice masiva 2, donde se encuentra las leyes entre 0.4 – 1 g Au/t y sobre todo en los bordes del depósito, se encontró una alteración sulfurada, con leyes variando entre 0.2 – 0.3 g Au/t. (ANABI, 2018).

Existen 3 alteraciones bien definidas (ver figura 27) y son:

SM-1: Sílice masiva es de color pardo blanquecino, con una textura oquerosa (porosa), presenta óxidos de hierro principalmente hematita, gohetita y sulfatos como la jarosita en las oquedades y en las fracturas.

SM-2: Sílice masiva es de color blanquecino, con presencia de fluidizaciones de sílice crema, se presenta asociada a las brechas hidrotermales, es una alteración perbásico de textura obliterada, los halos restringidos son espesores reducidos donde se presenta óxidos de hierro principalmente hematita y gohetita en fracturas.

SA: Esta alteración se encuentra junto a la sílice masiva 2, dentro de sus ensambles mineralógicos se tiene a la sílice y a la Alunita, es de una alteración perbásico selectiva ya que conserva la textura de la roca, tiene presencia de óxidos de hierro en fracturas principalmente hematita y en menor cantidad gohetita.

Figura 27

Alteraciones mineralógicas por el tipo de mineral de Utunsa



Nota: Laboratorio Metalúrgico Anabí SAC, 2011:50

4.1.3. Sistema de lixiviación

El sistema de lixiviación la unidad minera Utunsa ocupa un área menor a 20 hectáreas, tiene una capacidad diseñada para la plataforma de 25 millones de toneladas métricas (peso seco del mineral) aproximadamente, para la construcción de las pilas se utiliza el sistema de relleno por montones como se puede observar en la figura 28. La solución enriquecida drena desde las pilas de lixiviación por gravedad hacia la zona de almacenamiento, ubicada en la parte inferior, la zona de almacenamiento de la solución está diseñada para contener por lo menos 13,500 m³ de solución enriquecida (PLS). La primera zona de almacenamiento es llamada poza de operaciones debido a que almacena la solución de alto contenido de oro y baja turbidez; la otra es llamada poza intermedia (ILS) almacena la solución con bajo contenido de oro y en ocasiones alta turbidez y la última poza es de menores eventos que almacena solución de baja ley. Posteriormente la solución de la poza de operaciones alimenta de solución rica a la planta de precipitación “Merrill Crowe”. (ANABI, 2018).

Figura 28

Apilamiento de mineral por montones Pad lixiviación



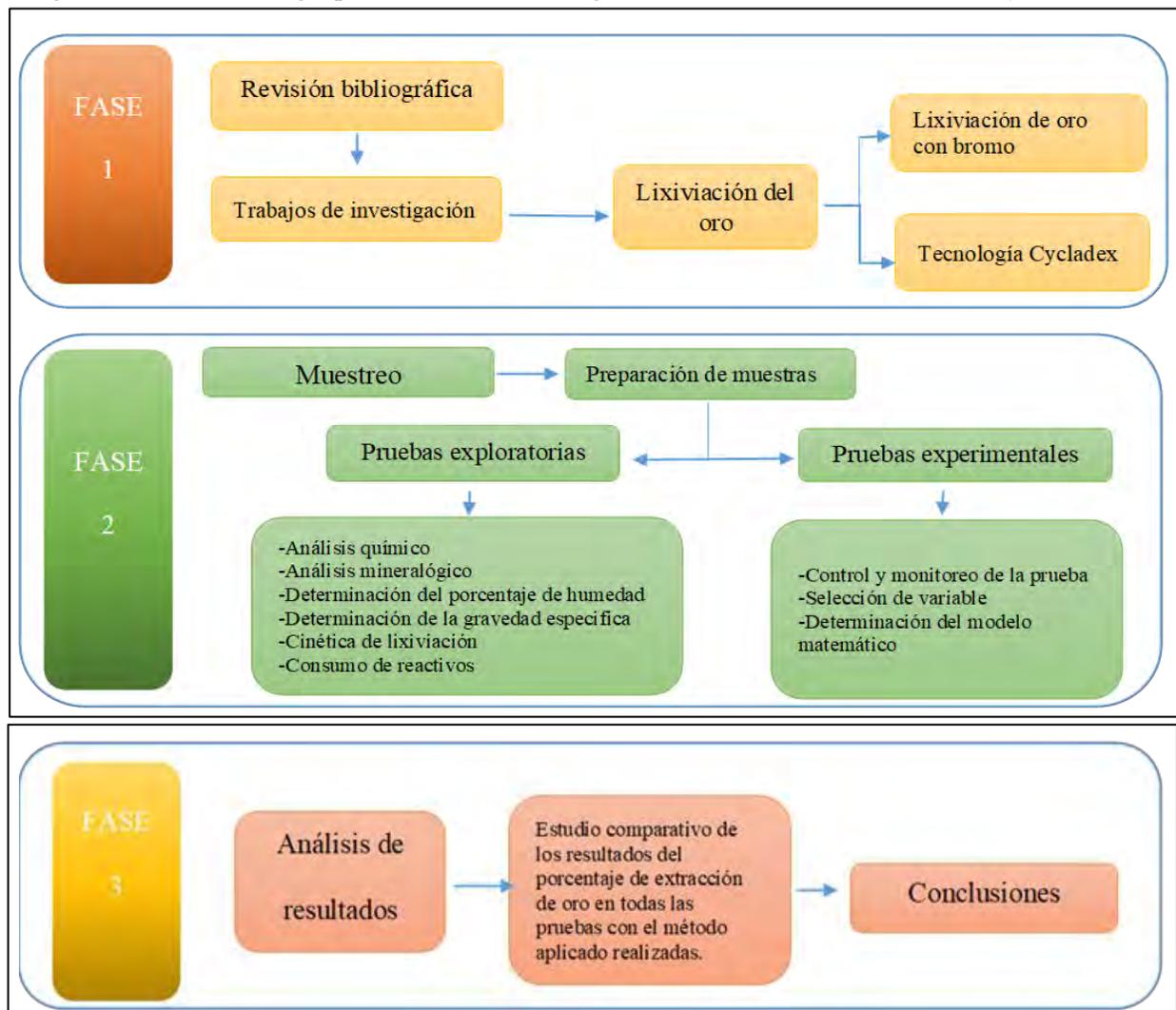
Nota: Elaboración propia

4.2 Diseño de investigación

Para este trabajo de investigación se solicitó a la Unidad Minera Utunsa-Anabi- Haquira - Apurímac, una determina muestra representativa de mineral de Pad lixiviación (SM-1), posteriormente fue llevado al laboratorio de hidrometalurgia de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. La metodología general utilizada para llevar a cabo la línea de investigación, se divide en tres fases, las cuales se presentan resumidas en el siguiente diagrama ver figura 29:

Figura 29

Diagrama de la metodología para el tema de investigación de lixiviación de oro con HBr y KBr



Nota: Elaboración propia

Se aplico el diseño factorial 2^3 con puntos centrales para evaluar el efecto de las variables en la respuesta, para considerar este diseño se realizó más de una réplica en el punto central para darnos una mayor confiabilidad de los resultados a obtenerse. Por tanto, tendremos un diseño factorial de 2 niveles y 3 factores el número de pruebas a realizar será un total de 8, pero para tener un mayor grado de confiabilidad en los resultados se le pueden agregar tres replicas en el punto central del diseño, lo cual nos daría un total de 11 pruebas. El trabajo de investigación se realizó de forma experimental, el cual tiene como objetivo la extracción del oro por lixiviación, se determinó la significancia relativa de las variables en estudio y de los modelos matemáticos empíricos. Eligiendo el diseño factorial de 2^3 con puntos centrales como se observa en la tabla 9. Donde: X_1, X_2, X_3 = son las variables independientes correspondientes a la concentración del lixivante, tamaño de partícula y el tiempo de lixiviación respectivamente.

Y = Es la variable respuesta correspondiente al porcentaje de extracción de oro en la lixiviación.

Tabla 9

Plan de pruebas experimentales mediante el diseño factorial 2^3

Con puntos centrales.

Nº	X_1	X_2	X_3	Y
1	-	-	-	Y_1
2	+	-	-	Y_2
3	-	+	-	Y_3
4	+	+	-	Y_4
5	-	-	+	Y_5
6	+	-	+	Y_6
7	-	+	+	Y_7
8	+	+	+	Y_8
9	0	0	0	Y_9
10	0	0	0	Y_{10}
11	0	0	0	Y_{11}

Nota: Elaboración Propia

4.2.1. Tipo de Investigación

Para evaluar el porcentaje de extracción de Oro en la lixiviación con los reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico. se realizó una investigación de tipo Experimental, el cual se basa en la manipulación de variables en condiciones controladas replicando un fenómeno concreto y observando el grado en que la o las variables implicadas y manipuladas que producen un efecto determinado (Causa) X hacia (efecto) Y. Para establecer diferentes hipótesis y contrastarlas a través de un método científico. De esta manera estudiar e identificar las variables o factores de mayor influencia sobre el proceso

4.2.2. Método de Investigación

-Análisis y síntesis. -Mediante el cual se recopilaron datos bibliográficos para comprender y entender el problema planteado, así como la esencia y naturaleza de sus partes, para posteriormente sintetizar e integrar el material a analizar.

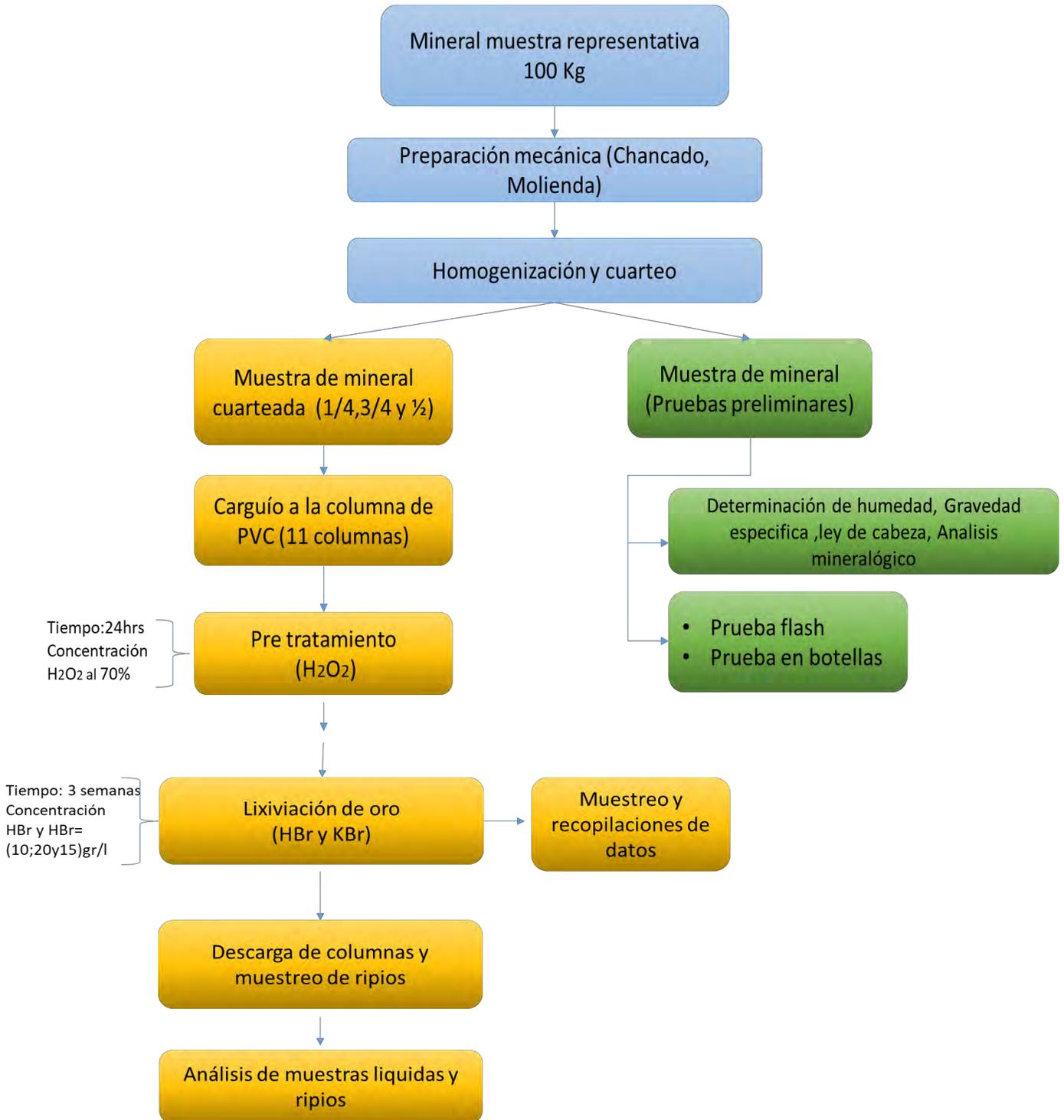
-Inducción y Deducción. - A partir de este método se pudo concluir la investigación hecha, partiendo de los datos y antecedentes obtenidos, en este caso es el comportamiento del mineral a utilizar.

-Método estadístico. – consistió en la toma de datos, estos datos provienen de toma de muestras, número de muestras que se realizaron, las variables que se toman en cuenta y la posterior comparación de los resultados que se obtuvieron.

-Diseño experimental. – El proceso del experimento se llevó a cabo mediante una serie de etapas debidamente ordenadas y controladas, en la figura 3, se observa el diagrama de inicio a fin del procedimiento experimental.

Figura 30

Diagrama del proceso experimental



Nota: Elaboración propia

4.2.3. Nivel de Investigación

El nivel de Investigación es descriptivo – explicativa por la siguiente razón:

Descriptivo: porque busca o pretende especificar las propiedades y características más importantes de algún fenómeno o fenómenos sometido a análisis, mostrando con precisión las dimensiones de este.

Explicativo: porque busca o pretende establecer las causas de los sucesos o fenómenos que son análisis de estudio.

4.3 Población de estudio

El material que se utilizó para realizar las pruebas experimentales correspondientes, fue mineral aurífero obtenido de la Unidad Minera Utunsa – Anabi –Haquira- Apurímac.

4.3.1. Tamaño de muestra

Se utilizó aproximadamente 100 Kg de muestra representativa de mineral para el desarrollo de las pruebas de laboratorio correspondientes.

4.3.2. Técnicas e instrumentos de recolección de información o datos

✓ **Técnicas**

- Recolección de información teórica y revistas de investigación.
- Pruebas experimentales de laboratorio.

✓ **Instrumentos**

- Avances teóricos, revisión de páginas web, revisión de seminarios de tesis.
- Balanzas, cizalla, tijeras, reactores, reactivos, instrumentos de laboratorio, etc.
- Cuestionarios, guías de análisis de observación, programas de diseño factorial 2³ (MINITAB Y EXCEL), Word.

CAPÍTULO V

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

5.1 Muestreo

Para el inicio de las pruebas experimentales se realizó el muestreo porque es una de las primeras operaciones de cuantificación en procesamiento de minerales, es muy fundamental en cualquier proceso metalúrgico, dependerá de que la porción empleada sea lo más parecida a las demás para que los resultados sean comparables entre sí, por ello se utilizó el método de cono y cuarteo, ver anexo N°4.

5.1.1. Preparación de muestras representativas

Tomando en cuenta los 100 Kg de mineral seco ver figura 31, se realizó la reducción de tamaño de partícula, dividida en 2 etapas: un chancado de mandíbulas y chancado secundario de cono. El mineral disponible para todo el conjunto de experimentos paso a ser muestreado como se observa en la figura 32, con el cual se realizaron las diversas pruebas, para cada una de las variables consideradas relevantes para el estudio. Además, algunas sub-muestras de mineral se usó para realizar otras pruebas preliminares de caracterización del mineral, en la tabla 10 se detalla equipos e insumos utilizados.

Figura 31

Muestra de mineral 100 Kg



Nota : Elaboración propio

Figura 32

Muestreo de mineral aurifero



Nota: Elaboración Propia

Tabla 10

Equipos e insumos utilizados

EQUIPOS	
<ul style="list-style-type: none">✓ Estructuras metálicas para soportar 11 Columnas de PVC de 1.5 m de alto y 2" de diámetro.✓ Baldes de plástico de 4 litros (22 unidades).✓ Harnero vibratorio Gilson✓ pH metler.✓ Sistema de Tamizaje del tipo Ro-Tap con tamices ASTM.✓ Balanza (0-100Kg).✓ Estufa de secado.✓ Cronómetro.✓ Termómetro✓ Pulverizador✓ Balanza digital✓ Estufa✓ Cronometro✓ Mesa de rodillos	
MATERIALES E INSUMOS	
<ul style="list-style-type: none">✓ Reactivos:✓ Ácido Bromhídrico (HBr).✓ Bromuro De Potasio (KBr).✓ Peróxido De Hidrogeno (H₂O₂)✓ Agua destilada.✓ Hidróxido de sodio✓ Naranja de metil	<ul style="list-style-type: none">✓ Insumos:✓ Probetas.✓ Plumón / rotulador.✓ Papel milimetrado.✓ Botellas para soluciones de lixiviación✓ Bolsas plásticas.✓ Palas.✓ Bandejas de aluminio.✓ Lona.

Nota: Elaboración propia

5.1.2. Muestra representativa para pruebas preliminares.

Para este procedimiento se tomaron muestras representativas del total de la muestra proveniente del chancado secundario, se obtuvo las siguientes muestras:

- ✓ Muestras de 5 Kg aproximadamente para análisis químico, medir el pH y la humedad natural.
- ✓ Muestras de 5 Kg aproximadamente para pruebas de lixiviación en botella.

Para obtener la muestra necesaria representativa se procedió de acuerdo al diagrama planteado ver figura 33, de cómo se realizó el muestreo para la presente investigación, se tomaron en cuenta el siguiente protocolo.

1.- Como primer paso contar con los protocolos de seguridad en los laboratorios, principalmente en relación con el uso de extractores de polvo y EPP.

2.- Pesar el mineral disponible para los ensayos de caracterización físicos y químicos.

3.- Apilar el mineral en el suelo del laboratorio.

4.-Aplicar el procedimiento de cono y cuarteo a través del paleo fraccionado, este procedimiento se encuentra descrito con mayor detalle en el Anexo N° 4

5.- Para obtener muestras representativas, se realizó la homogenización del mineral utilizando la técnica de roleo en paño. Luego se cuarteo, usando el partido de rifles y la técnica de las 4 esquinas, hasta obtener la reducción de la muestra al tamaño deseado.

7.-. Esta técnica se repitió hasta lograr la cantidad de muestra requerida.

5.1.3. Muestra Representativa para Carguío de Columnas de Lixiviación

Para esta etapa, se consideraron la totalidad del mineral y continuar con el procedimiento que permitió obtener la cantidad representativa y con el perfil granulométrico del mineral recibido para el carguío de las columnas.

El procedimiento utilizado fue diseñado propiamente, en la cual se realizó la homogenización y cuarteo de las muestras para cada columna de lixiviación como se observa en la figura 33. Las muestras de mineral se fueron ajustando con equipos de laboratorio teniendo en cuenta la granulometría de las variables a considerar, primero se procedió en un circuito de chancado para obtener un mineral a malla $-3/4''$, mientras que la segunda, fue procesada para obtener un mineral de malla $-1/4''$, y la última fase se obtuvo mineral chancado para malla $-1/2''$.

5.1.4. Homogenización y cuarteo de Muestras

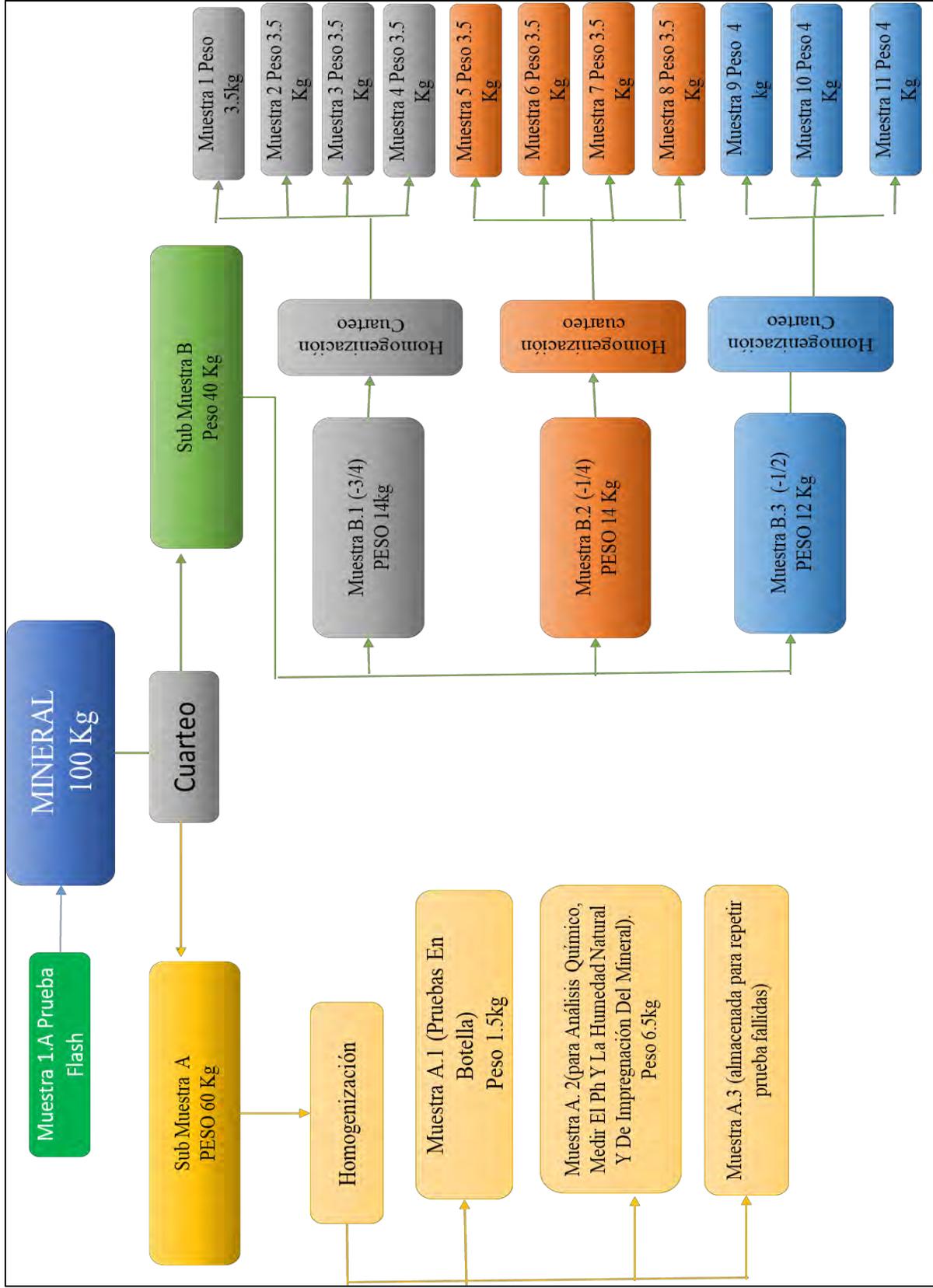
A continuación, mencionaremos los pasos:

1.- Obtenido el mineral chancado se procedió a realizar un tamizado del material grueso, el producto de material fue homogenizado y cuarteado en las mallas $1/2$, $3/4$ y $1/4$, respectivamente luego se realizó homogenización de 10 veces para sacar muestras representativas aproximadamente 4 Kg.

2.- La obtención de las muestras representativas, para las pruebas de lixiviación, se realizó mediante la homogenización del mineral, utilizando la técnica de roleo en paño. Luego se cuarteo, usando un partidador de rifles o cuarteo por cono.

Figura 33

Esquema de distribución de muestras cuarteadas para el procedimiento experimental



Nota: Elaboración propia

3.- Se llegó a obtener 11 muestras representativas para las pruebas en columnas todas clasificadas en su totalidad del mineral en las mallas mencionadas, cada muestra fue registrada en peso según el registro correspondiente.

4.- Una vez clasificada las muestras, se procedió a almacenar cada fracción obtenida en envases resistentes y herméticos con el objetivo de controlar la pérdida de fino, ver figura 34.

Figura 34

Material cuarteado y registrado para pruebas en columna



Nota: Elaboración propia

5.2 Pruebas Preliminares

Las pruebas preliminares se realizaron de acuerdo al siguiente orden:

- ✓ El análisis mineralógico
- ✓ Análisis químico de la muestra
- ✓ Determinación de porcentaje de humedad, pH natural, densidad aparente
- ✓ Determinación de gravedad específica
- ✓ Pruebas de lixiviación flash y botellas

5.2.1. Análisis mineralógico

La información sobre análisis mineralógico se pudo obtener por parte del laboratorio metalúrgico de la unidad minera Utunsa, el cual nos brindó un informe de los estudios de

microscopía electrónica, análisis mineralógico de grado de liberación, análisis químicos por icp óptico y análisis mineralógico por difracción de rayos x (drx) con tubo de cobalto. Por lo tanto, la muestra que se utilizó en las pruebas experimentales en columnas fue de la alteración sílice masiva 1 (SM-1), donde se pudo observar las siguientes especies mineralógicas presente en el mineral ver tabla 11 .

Tabla 11

Muestra SM-1 Análisis Mineralógico Por Difracción De Rayos X

Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	95
Alunita	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	3
Rutilio	TiO ₂	1
Jarosita	Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	<L.D
Bismutinita	Bi ₂ S ₃	<L.D

Nota: Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

El informe de laboratorio el Estudio de Microscopia Electrónica señalo lo siguiente ver tabla 12:

Tabla 12

Descripción Del Estudio Microscopia Electrónica SM-1

Mineralogía		Oro nativo, baritina, cuarzo
Minerales	Descripción	Tamaño de la partícula (um)
Baritina	Ocurre como granos libres. Se encuentra acompañado de cuarzo.	3.-4
Cuarzo	Se observa como granos libres. Presenta inclusiones de oro (Au).	8-12
Oro nativo	Dispuestos como partículas libres. Muestra contenido de plata (Ag). Ocurre incluido en cuarzo.	1-2

El orden de predominancia de los minerales analizados fue: Oro nativo > Baritina > Cuarzo Se aprecia oro nativo (Au) libre en la birqueta y como inclusión en cuarzo. En la tabla 13 se muestra el promedio en porcentaje, de la composición química elemental de los minerales identificados en la muestra.

Nota: Informe de laboratorio Anabí S.A.C:2018

Tabla 13

Composición química (%) de los minerales identificado en la Muestra SM-1

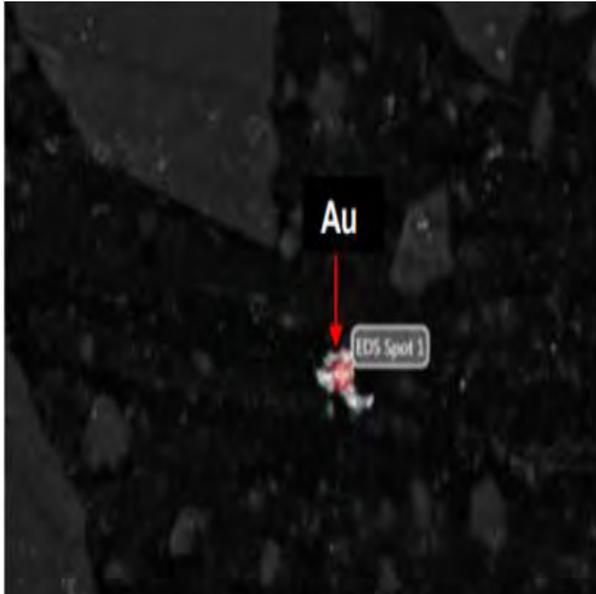
Minerales	Composición Química (%)						TOTAL
	Au	Ag	O	Ba	Si	S	
Baritina			23.31	59.12		17.58	100
Oro nativo	99.36	0.64					100
Cuarzo			43.26		56.74		100

Nota: Informe de laboratorio Anabí S.A.C:2018

A continuación, son presentadas imágenes de la muestra con sus respectivos análisis reales y elementales obtenidos con el microscopio electrónico de barrido ver figura 36 al 40:

Figura 36

Fotografía (a)microscopio electrónico de barrido



Nota: Se observa a) Región marcada con una partícula libre de Oro nativo (Au) con contenido de plata (Ag); (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag). Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

Figura 35

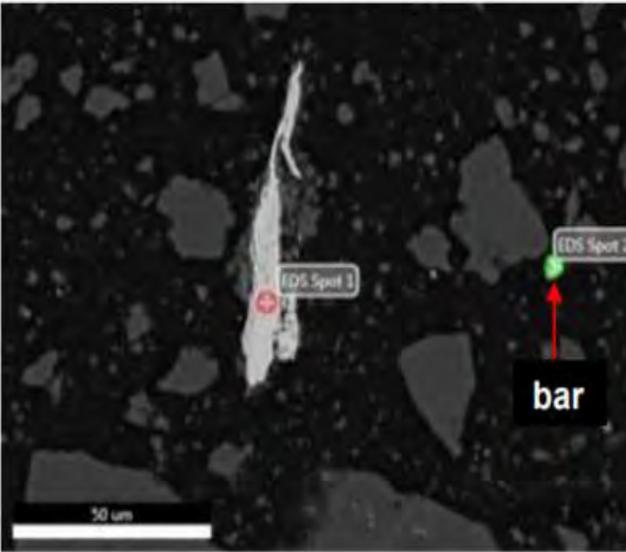
Fotografía (b)microscopio electrónico de barrido



Nota: Se observa. a) Región marcada con una partícula de Oro nativo (Au) con contenido de plata (Ag); (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag). Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

Figura 37

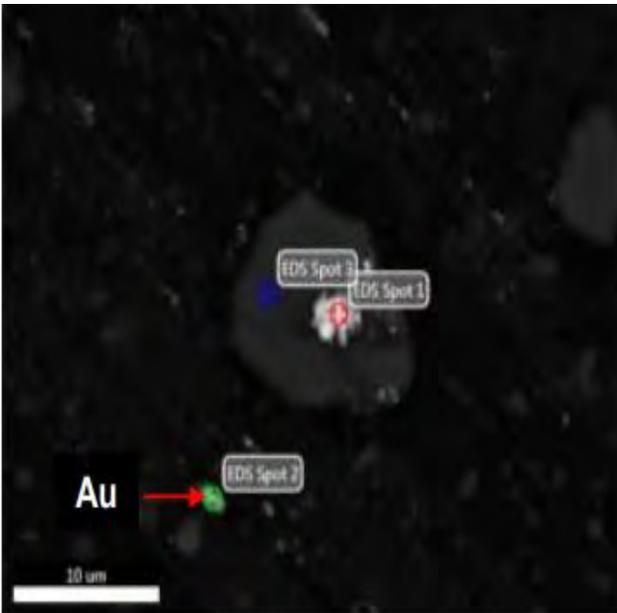
Fotografía (c)microscopio electrónico de barrido



Nota: Se observa a) Región marcada con una partícula libre de Baritina (bar) de aproximadamente 3μm; b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno (O), Azufre (S) y Bario (Ba) Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

Figura 39

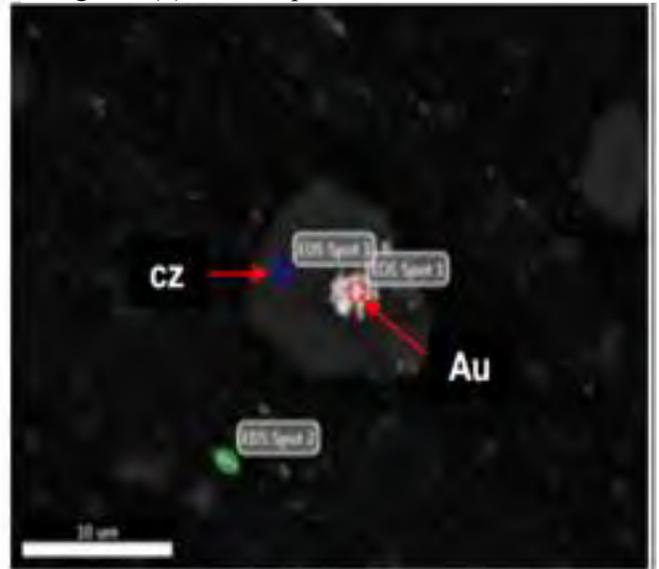
Fotografía (e)microscopio electrónico de barrido



Nota: Se observaa) Región marcada con una partícula libre de Oro nativo (Au) con contenido de plata (Ag) y con un tamaño aproximado de 1μm; b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag) Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

Figura 38

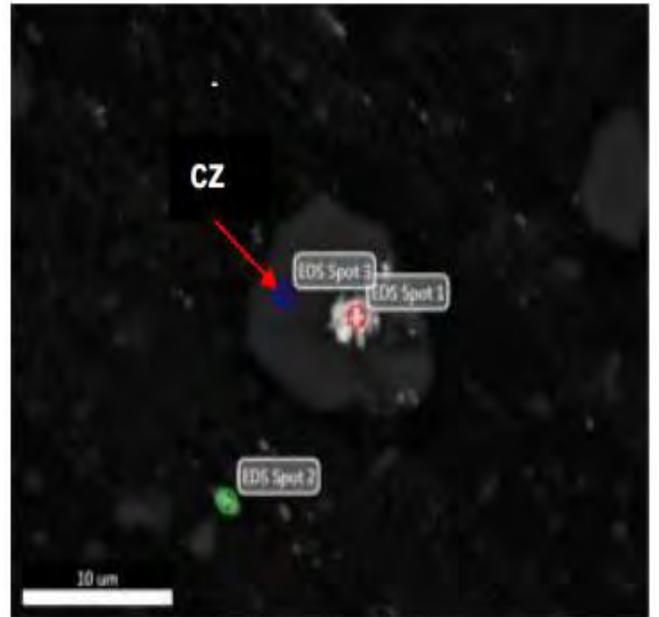
Fotografía (d)microscopio electrónico de barrido



Nota: Se observa a) Región marcada con una partícula de Oro nativo (Au) con contenido de plata (Ag), incluido en cuarzo (cz) y con un tamaño aproximado de 2μm; (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag). Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

Figura 40

Fotografía (f)microscopio electrónico de barrido



Nota: a) Región marcada por una partícula de Cuarzo (cz) de tamaño aproximado de 12μm y con una inclusión de oro nativo (Au); b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno (O) y Silicio (Si). Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

El contenido de oro en el mineral se presenta principalmente como oro nativo, el cual se encuentra totalmente ocluido en la ganga no metálica, con un tamaño granulométrico promedio de 1-2 [μm], en el estudio de icp óptico se determinó los siguientes elementos presentes, ver tabla 14:

Tabla 14

Análisis De Icp Óptico

Elementos		UNIDADES
Al	0.07	%
Sb	45	Ppm
As	83	Ppm
S	0.24	%
Ba	<1	Ppm
Be	<0.5	Ppm
Bi	91	Ppm
Cd	1	Ppm
Ca	<0.01	%
Co	1	Ppm
Cu	0.00388	%
Cr	125	Ppm
Sc	0.2	Ppm
Sn	<10	Ppm
Sr	10.9	Ppm
P	0.01	%
Ga	<10	Ppm
Fe	1	%
La	0.9	Ppm
Mg	0.01	%
Mn	68	Ppm
Mo	13.2	Ppm
Ni	61	Ppm
Ag	16	gr/tn
Pb	93	Ppm
K	0.06	%
Se	12.08	Ppm
Na	0.04	%
Ta	19	Ppm
Ti	<2	Ppm
Te	<10	Ppm
Tl	0.01	%
V	4	Ppm
Zn	0.0027	%

Nota: Informe de laboratorio Anabi S.A.C:2018

5.2.2. Análisis químico de la muestra

Como primer paso del análisis químico, fue determinar la ley de cabeza para saber el total de oro que es de interés de esta investigación tecnológica, la muestra es de 1 Kg aproximadamente que se envió al laboratorio químico L.A.S laboratorio (Anexo N°5), cuyo resultado se observa en la figura 41:

Figura 41

Ley de cabeza de mineral de oro

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*551 Au	
				g/TM	oz/TC
MN20002588	IM-001 MUESTRA CABEZA	No proporcionado por el cliente.	Cabeza	1.349	0,03188

Nota: Laboratorio Analíticos del Sur:2020:

5.2.3. Determinación de porcentaje de humedad, pH natural

Es importante determinar la humedad para poder realizar las dosificaciones necesarias de ácido y agua al mineral. Recordar que la dosificación de ácido se tiene que realizar al mineral seco. Se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$H = \frac{\text{Muestra (húmedo)} - \text{Muestra (seca)}}{\text{Muestra (seca)} \cdot 100} \quad \text{Ec.5.1}$$

Los resultados se observan en la tabla 15

Tabla 15

Determinación Del Porcentaje De Humedad

<i>Muestra</i>	<i>Peso húmedo (g)</i>	<i>Peso seco (g)</i>	<i>Humedad (%)</i>
1	100	99.00	1.00
2	100	98.90	1.10
Promedio	100	98.95	1.05

Nota: Elaboración propia

Posteriormente es la medición del pH natural del mineral con la finalidad de conocer la acidez que pueda presentar el mineral se obtuvo un resultado en promedio de 6.88

5.2.4. Determinación de la gravedad específica

La determinación de la gravedad específica del mineral, permitió hallar la densidad de la pulpa, con el que se pudo calcular el peso de la muestra, el volumen de ésta y el volumen de la solución lixivante para la prueba en botellas, ver figura 42. Empleamos el principio de Arquímedes por desplazamiento de volumen.

Figura 42

Procedimiento para determinación de la gravedad específica



Nota: Elaboración propia

La gravedad específica (adimensional) de los sólidos se da por la siguiente expresión:

$$G. E = \frac{W_m}{W_m + W_1 - W_2} \quad (\text{Ec.5.2})$$

Donde:

W_m : Peso del mineral

W_1 : Peso de la fiola + agua

W_2 : Peso de fiola + agua + mineral

Se realizaron 3 pruebas en las mismas condiciones para obtener un resultado más certero, como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16

Determinación de la gravedad específica

Nº Prueba	W _m	W ₁	W ₂	G.E
1	5	163.8	166.8	2.5
2	5	163.8	167	2.78
3	5	163.8	167	2.78
4	5	163.8	166.9	2.63
5	5	163.8	166.9	2.63
Promedio				2.664

Nota: Elaboración propia

Reemplazando en la Ec. 5.2

$$G. E = \frac{5}{5+163.8-166.9} \quad G.E=2.664$$

Este resultado nos permitió realizar los cálculos posteriores para las pruebas experimentales como: determinar la constante de equilibrio.

5.2.4.1.Preparación de pulpa para pruebas en agitador.

Para realizar la prueba de cinética en botellas se debe determinar un balance de pulpa lo cual hemos preparado la pulpa a porcentaje de solidos: 30 %

Si: G.E=2.664

Cálculo de K

$$K = \frac{GE-1}{GE} \quad (Ec.5.3)$$

$$K = \frac{2.664 - 1}{2.664}$$

$$K = 0.625$$

Se calculó la densidad de pulpa para 30 %de solidos

✓ Peso de la pulpa:

$$\%S * W * K = (W - 1000)100\% \quad (\text{Ec.5.4})$$

$$(30) W (0.625) /100= W-1000$$

$$W=1230.77 \text{ g/L}$$

✓ Peso de mineral (Ws)

$$W_s=W-1000/k \quad (\text{Ec.5.5})$$

$$W_s=(1230.77-1000)/0.625 \rightarrow W_s=369.232\text{g}$$

✓ Volumen mineral (Vs):

$$V_s=w/G_e \quad (\text{Ec.5.6})$$

$$V_s= 369.232/2.664$$

$$V_s=138.6 \text{ cm}^3$$

✓ Volumen de solución lixivante:

$$V \text{ solución} = V \text{ pulpa} - V_s \quad (\text{Ec.5.7})$$

$$V \text{ solución} = 1000-138.6$$

$$V \text{ solución} = 861.538 \text{ cm}^3$$

Con los datos obtenidos se elaboró la tabla 17 de balance de pulpa para 1000 ml y 1040 ml de pulpa (volumen del reactor de lixiviación) para 30% de sólidos.

Tabla 17

Balance de pulpa para 30 % de sólidos.

Producto	Porcentaje (%)	Para 1 L de pulpa		Para 1.040 L de pulpa	
		Peso(g)	Vol. (cm ³)	Peso (g)	Vol. (cm ³)
Mineral	30	369.232	138.6	384	144.15
Sol. lixivante	70	861.538	861.538	896	896
Pulpa	100	1230.77	1000	1280	1040

Nota: Elaboración propia

5.2.5. Prueba Flash de Lixiviación

Esta prueba se realizó en la Unidad Minera Utunsa, en el laboratorio metalúrgico para poder determinar el comportamiento del mineral con respecto a los reactivos ácido bromhídrico (HBr) y bromuro de potasio (KBr) y saber la máxima extracción de oro que se pueda obtener y posteriormente realizar pruebas que nos permita determinar variables influyentes y continuar con la investigación. Para esta prueba experimental se necesitó una muestra de mineral pulverizado con granulometría de -200 Malla, de alteración sílice masiva (SM-1), con un peso aproximado de 2 Kg, de los cuales se sacó una muestra para el análisis químico y realizar las pruebas flash en botella. El esquema del procedimiento de las muestras para hacer la prueba de lixiviación flash se presenta en la figura 43.

✓ Procedimiento de prueba flash

Figura 43

Esquema del procedimiento para prueba flash



Nota: Elaboración propio

La muestra inicial de 2 Kg después de ser pulverizada paso a ser cuarteada sucesivamente hasta obtener 3 submuestras de aproximadamente 500 g cada una, que se emplearon en 3 pruebas de lixiviación flash. Los rechazos se enviaron al laboratorio químico para determinar la ley de cabeza. Las tres pruebas de lixiviación flash se efectuaron bajo las siguientes condiciones ver tabla 18:

Tabla 18

Parámetros Para Realizar Pruebas Flash

Condiciones	
Ácido Bromhídrico: [HBr]	150 ml
Bromuro de Sodio: [KBr]	135 g
Peróxido de Hidrogeno	185 ml
Peso de Mineral	500 g
Volumen Solución:	1000 ml
Relación solida/liquido	1/2 aprox.
Agitación en rodillo	50 rpm
Tiempo de lixiviación	1 h

Nota: Elaboración propia

Para realizar la prueba se adiciono 1000 ml de solución preparada con ácido bromhídrico (HBr), bromuro de potasio (KBr) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂) de tal forma que se obtuvo una relación sólida/liquido de 1 / 2 aprox. El tiempo de lixiviación fue de 1 hora. Al final de la prueba se centrifugo la pulpa y el líquido se envió al laboratorio químico para determinar la ley de oro disuelto.

En la Figura 44, muestra las botellas de la prueba de lixiviación flash, posteriormente la pulpa paso a secar para poder enviar a laboratorio y obtener el análisis químico. Se obtuvieron los siguientes resultados en la tabla 19.

Figura 44

Prueba flash en unidad minera Utunsa



Nota: Elaboración propia

Tabla 19

Resultado De la Prueba Flash

REACTIVOS	ALTERACION	LEY DE CABEZA g/TM	LEY DEL RIPIO g/TM	EXTRACCION Au (%)	PROMEDIO (%)	
HBr+KBr	1	SM-1	0.470	0.103	78.09	78.72
	2	SM-1	0.470	0.098	79.15	
	3	SM-1	0.470	0.099	78.94	

Nota: Elaboración propia

Como se puede observar, se obtuvo una recuperación de 78.72% de extracción de Au promedio, lo que significa que los reactivos tuvieron una respuesta positiva con el mineral aurífero se puede ver anexo N°6 los resultados de laboratorio.

5.2.6. Prueba de botella

Esta prueba se realizó en el laboratorio de hidrometalurgia de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco, conociendo el resultado las pruebas flash se pasó a realizar prueba de lixiviación en botellas donde nos permitió evaluar la cinética de la

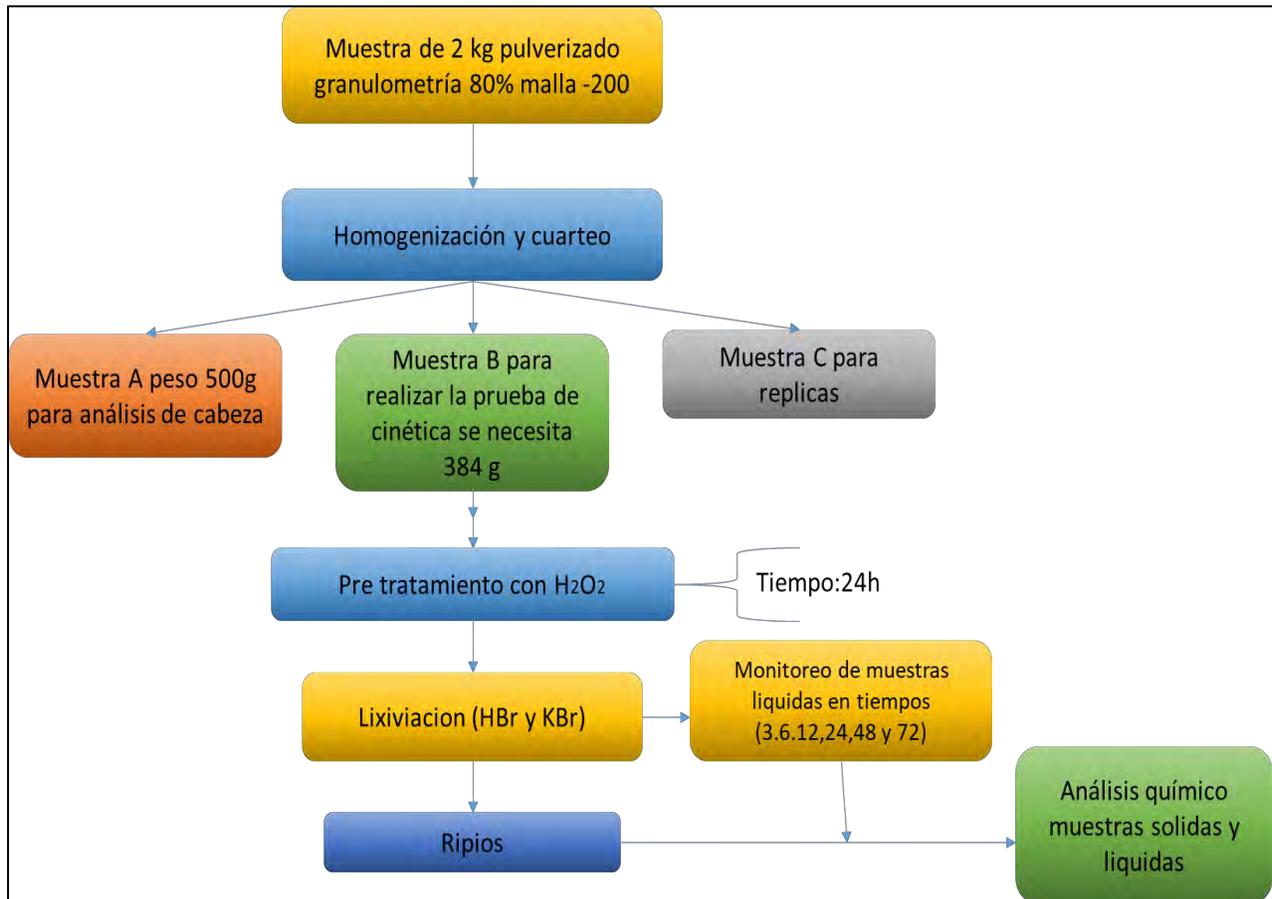
reacción y el consumo del agente lixivante para determinar los parámetros de tiempo y concentración óptimas que se aplicaron posteriormente a las pruebas de columnas.

Para el desarrollo de esta prueba se requirió lo siguiente:

- ✓ Primero para la prueba se necesitó mineral pulverizado con granulometría de 80% a -200 Malla, de alteración sílice masiva 1 (SM-1), con un peso de 2 Kg aproximadamente,
- ✓ Segundo la muestra inicial se cuarteo, de forma que se obtuvieron 3 grupos de submuestras de los cuales se sacaron muestras para el análisis químico y realizar las pruebas de lixiviación en botellas esquema del presenta en la siguiente figura 45.

Figura 45

Esquema del procedimiento de para determinar la cinética de lixiviación (prueba de botella)



Nota: Elaboración propia

✓ Procedimiento de Prueba en Botella

Los parámetros se presentan a continuación en la tabla 20:

Tabla 20

Parámetros para realizar prueba a en botellas

Código De Prueba:	BRT – 1
Descripción:	SM-1
Prueba N°	N°1
Concentración de Reactivo Kbr+Hbr	10(g/L)
Concentración de H₂O₂ 35% (pre tratamiento)	40(g/L)
Malla	80% -200 M
Tiempo (h):	72
pH Natural:	6.34
% Solidos:	30
% Humedad:	0.5
Peso Mineral Húmedo (g)	386
Peso Mineral Seco (g)	384
Peso Solución (g)	896
Peso Total pulpa (g)	1280

Nota: Elaboración propia

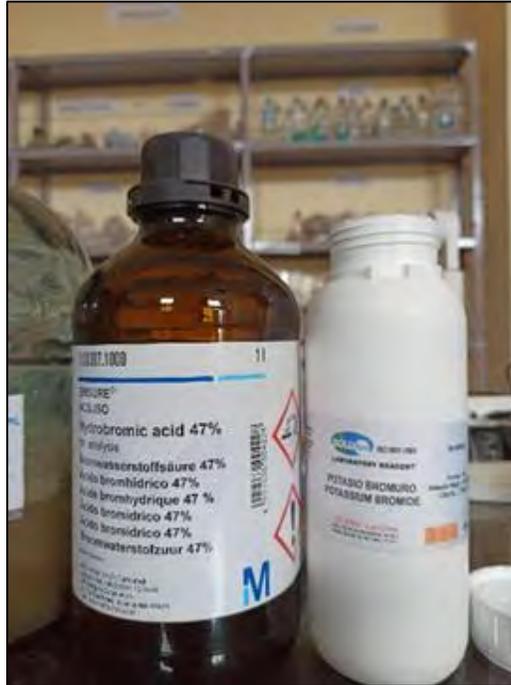
1.-Después de cuartear y pesada la muestra se procedió a tomar la botella y echar la cantidad de volumen de agua indicada.

2.-Luego se agregó el mineral pesado y se añadió la cantidad de peróxido de hidrogeno (100 ml) para un pre-tamiento, se colocó el reactor la mesa de rodillos con cuidado y se encendió por un tiempo de 24 horas.

3.-Pasado las 24 horas del pretratamiento con el peróxido se añadió la solución lixiviante (HBr +KBr) ver la figura 46.

Figura 46

Reactivo acido bromhídrico y bromuro de potasio



Nota: Elaboración propia

4.-Se realizó el control del consumo de reactivo y muestreo de solución lixiviada en los tiempos de 3,6,12,24,48 y 72 horas. Cada solución líquida fue de 25 ml almacenadas y codificadas en envases, con medición del pH.

5.- Transcurrido las 72 horas de lixiviación se procedió a parar la mesa de rodillos y retirar el reactor para lavar la pulpa, para este paso se utilizó floculante para sedimentar el mineral lixiviado, se secó con la estufa y luego codificada ver fotografías en el anexo N°8

6.-Teniendo lista los envases de muestras líquidas, el ripio junto al mineral de cabeza se procedió a enviar a laboratorio químico para sus respectivos análisis los resultados de laboratorio se observa en el anexo N°5, Se obtuvo los siguientes resultados ver tabla 21:

Tabla 21*Resultados prueba en botellas*

RESUMEN	
Metal	Au
Ley	1.349 (g/TM)
% Recuperación MAX	68.95 %
Consumo De Reactivos Hbr+Kbr	0.055 Kg/TM
Cabeza Ensayada	1.093 [g/TM]
Cola Ensayada	0.310 [g/TM]
Cabeza Calculada	1.064 [g/TM]
Recuperación Ensayada	71.64 [%]
Recuperación Calculada	70.86 [%]
Metal En Cabeza	0.418 [mg]
Metal En Solución	0.288 [mg]
Metal En Cola	0.118 [mg]
Metal Total	0.406 [mg]

Nota: Elaboración propia**Tabla 22***Porcentaje de extracción de oro en las pruebas de cinética de lixiviación.*

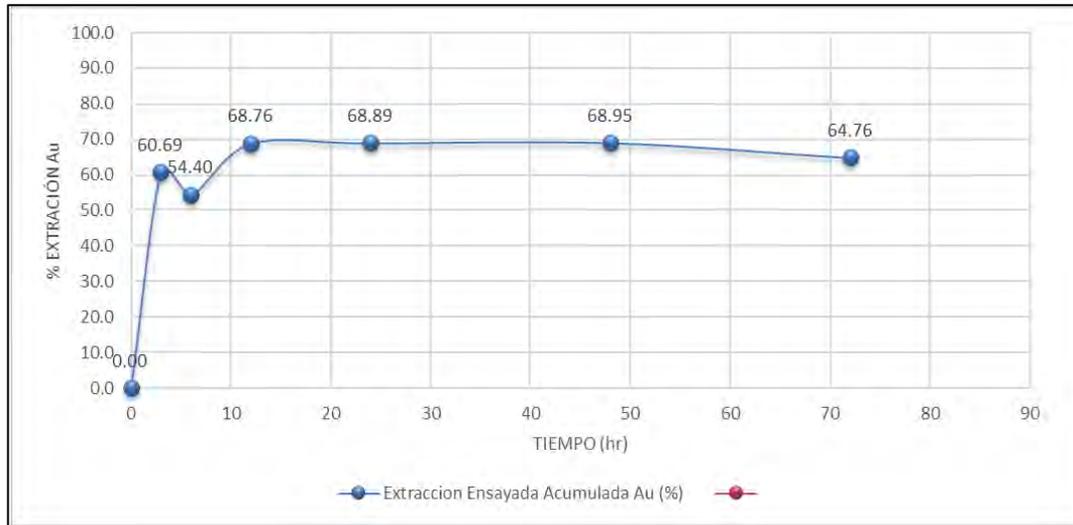
Horas de Lixiviación	HBr+KBR (gr/l)	pH	Oro									
			Solucion (ppm) Lab Quim	Solucion (ppm) Calculado	Solucion (mg)	Solucion (mg) Calculado	Descartado acumulado (mg)	Total (mg)	Total (mg) Calculado	Extraccion Ensayada Acumulada Au (%)	Extraccion Calculada Acumulada Au (%)	
0	10	1,10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0
3	8,90	0,99	0,290	0,290	0,021	0,021	0,009	0,021	0,021	0,021	60,69	62,4
6	10,52	0,85	0,250	0,250	0,018	0,018	0,016	0,026	0,026	0,026	54,40	55,9
12	9,00	0,74	0,310	0,310	0,022	0,022	0,026	0,038	0,038	0,038	68,76	70,7
24	9,40	0,67	0,300	0,300	0,021	0,021	0,035	0,047	0,047	0,047	68,89	70,8
48	10,20	0,66	0,290	0,290	0,021	0,021	0,043	0,055	0,055	0,055	68,95	70,9
72	10	0,75	0,260	0,260	0,018	0,018	0,051	0,062	0,062	0,062	64,76	66,5

Nota: Elaboración propia

El balance metalúrgico en la tabla 22 se detalla el porcentaje de extracción desde la hora 3 hasta 72 horas de tiempo de lixiviación y se observa que en el tiempo 48 horas se alcanzó la mayor extracción con un 68.95% de oro.

Figura 47

Cinética de lixiviación de prueba en botella



Nota: Elaboración propia

En la figura 47 se observa la cinética de lixiviación donde a un tiempo inicial de 3 horas llega a una extracción de 60.69 % de Au y aun tiempo final de 72 horas se llegó a una extracción de 64.76% de Au.

5.3 Prueba experimental

5.3.1. Prueba en Columnas

Para la prueba experimental en columnas que se realizó en el laboratorio de hidrometalurgia de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco, En la tabla 23 se observa a detalle las condiciones de los ensayos en columna de acuerdo diseño factorial 2^3 , las fotos del procedimiento ver en el Anexo N°8.

Tabla 23

Diseño factorial 2³ con puntos centrales en la prueba de lixiviación

Columna	Tamaño de partícula (")	Concentración de agente lixivante (g/L)	Tiempo de riego (días)
C-1	0.25	10	7
C-2	0.75	10	7
C-3	0.25	20	7
C-4	0.75	20	7
C-5	0.25	10	15
C-6	0.75	10	15
C-7	0.25	20	15
C-8	0.75	20	15
C-9	0.5	15	11
C-10	0.5	15	11
C-11	0.25	10	11

Nota: Elaboración propia

5.3.1.1. Carguío de la columna

La estructura metálica para la colocación de las columnas permite el montaje de 11 columnas y dispone de soportes para cada una de ellas ver figura 48. Una vez cuarteado el mineral, se procede a cargar cada una de ellas en forma manual, a través de embudos hacia la columna. Antes de iniciar el carguío se coloca una capa de grava en la base de columna a manera de filtro la altura promedio es de 1 cm. El mineral es depositado en la columna, con la precaución de no producir ninguna pérdida de carga o derrame del mineral.

Al finalizar el carguío del mineral, se deben preparar los recipientes de solución de alimentación en la parte superior, posicionar los recipientes de recepción de efluente en la parte inferior provistas de mangueras que alimentarán la solución lixivante.

Figura 48

Estructura metálica armada para proceso de lixiviación en columna



Nota: Elaboración propia

5.3.1.2. Pre tratamiento con peróxido de hidrogeno

Después de haber cargado las 11 columnas se procedió hacer el pre tratamiento por 24 horas con peróxido de hidrogeno (H_2O_2 al 35%) a una concentración de 40g/L en todas las columnas con el objetivo de oxidar el mineral y este en las condiciones adecuadas para la solución lixivante.

5.3.1.3. Preparación de Soluciones Lixiviantes

Para la preparación del agente lixivante de bromuro de potasio (KBr) más ácido bromhídrico (HBr) al 47% se realizó una titulación ácido – base de la solución lixivante para comprobar la concentración máxima que siente ambos reactivos al mezclarlos:

1. Tomamos una muestra del agente lixivante (KBr+ HBr) de 2 ml (alícuota), se depositó en un vaso precipitado y agitamos.
2. Agregamos una gota de indicador, anaranjado de metilo, de manera que la solución quede de color rosa, debido a la acidez de ésta.

3. Para titular se utiliza una solución de NaOH a 0,1 N, preparada con agua desionizada ver figura 49.
4. Esta solución es agregada en una bureta graduada en centésimas de 50 ml.

Figura 49

Titulación de solución lixivante



Nota: Elaboración propia

La función del NaOH es subir el pH de la solución, hasta llegar al viraje. El pH del viraje indica el cambio de color que tiene la solución titulada, dada por el indicador, que al inicio es de color rosa, a medida que se va agregando gota a gota la solución de NaOH llega a un color naranja en la que se finaliza la valoración.

Para determinar la concentración del ácido se usó la siguiente expresión:

$$\text{concentracion de } KBr + HBr = \frac{\text{ml de NaOH} \times 80.9119 \times \text{normalidad de NaOH}}{\text{Volumen de la alicuota}} \quad \text{Ec.5.8}$$

Se determinó que la fuerza agente lixivante fue de:

$$\text{concentracion de KBr} + \text{HBr} = \frac{109 \times 80.9119 \times 0.1}{2}$$

$$\text{concentracion de KBr} + \text{HBr} = 431 \text{ g/L}$$

✓ **Preparación de concentración a 10 ,15 y 20 g/L**

A partir de la concentración del agente lixiviante, se determina la concentración a 10,15 y 20 g/l, las cuales son las variables con las que vamos a trabajar. Utilizaremos la ecuación

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{Ec.5.9}$$

✓ **Cálculos para la preparación de agente lixiviante a 10 g/L**

Datos:

$$C_1 = 431 \text{ g/L}$$

$$V_1 = ? \text{ g/L}$$

$$V_2 = 4000 \text{ ml}$$

$$C_2 = 10 \text{ g/L}$$

Reemplazando los datos en la Ec 5.9

$$V_1 = \frac{10 \text{ g/l} \times 4000 \text{ ml}}{431 \text{ g/L}} = 92.80 \text{ ml}$$

✓ **Calculo para la preparación del agente lixiviante a 15 g/L**

Datos:

$$C_1 = 431 \text{ g/L}$$

$$V_1 = ? \text{ g/L}$$

$$V_2 = 4000 \text{ ml}$$

$$C_2 = 15 \text{ g/L}$$

Reemplazando los datos en la Ec 5.9

$$V_1 = \frac{15 \text{ g/l} \times 4000 \text{ ml}}{431 \text{ g/L}} = 139.2 \text{ ml}$$

Calculo para la preparación del agente lixiviante a 20 g/L

Datos:

$$C_1 = 431 \text{ g/L}$$

$$V_1 = ? \text{ g/L}$$

$$V_2 = 4000 \text{ ml}$$

$$C_2 = 20 \text{ g/L}$$

Reemplazando los datos en la Ec 5.9

$$V_1 = \frac{20 \text{ g/L} \times 4000 \text{ ml}}{431 \text{ g/L}} = 185.05 \text{ ml}$$

Después de obtener los datos de la cantidad de agente lixiviante agregar a cada reactor columna se procede a monitorear manteniendo las condiciones para cada columna y muestreando la solución PLS enriquecida codificar y almacenar como se observa en la figura 50.

Figura 50

Muestras codificadas y almacenadas para laboratorio



Nota: Elaboración propia

5.3.1.1. Ejecución Pruebas Metalúrgicas De Laboratorio

El período de evaluación en las columnas de Lixiviación fue por un período de 7 a 15 días, el resultado del análisis de laboratorio se presenta en el Anexo N°7

✓ Prueba N°1:

Tabla 24

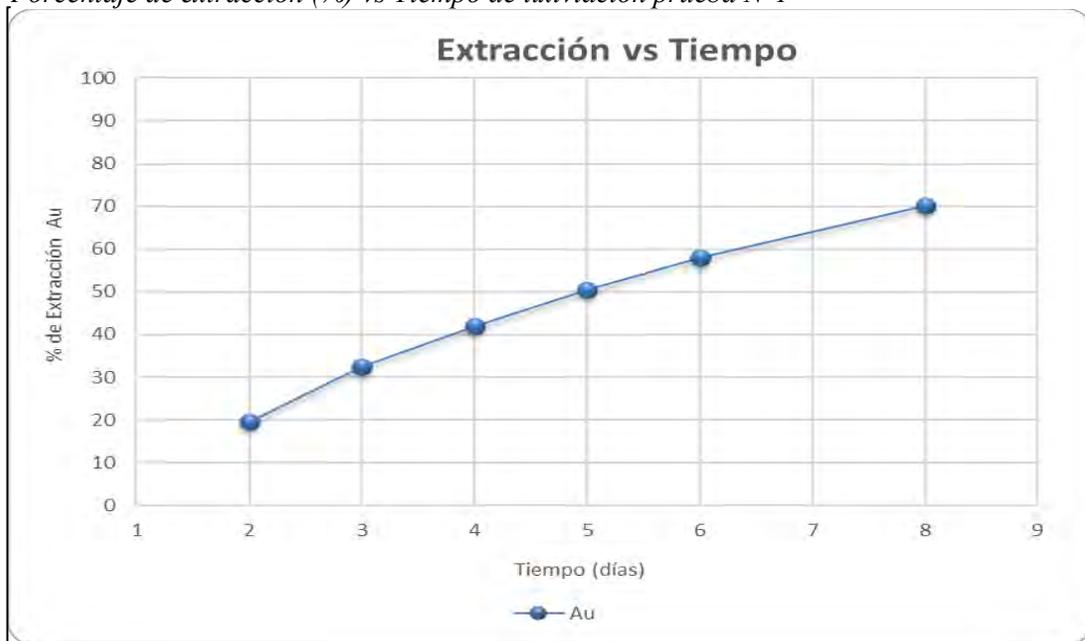
Condiciones de operación para columna N°1

PRUEBA EN COLUMNA #1					
Datos Operacionales					
Código de Prueba			C- 01		
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m2
Peso de Mineral Húmedo	3.5	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- ¼	"	pH natural	6.55	
Porcentaje de Humedad	0.5	%	KBr	360.00	g
Peso de Mineral Seco	3.47	Kg	HBr	180.00	ml
Diámetro de Columna	5.1	cm	Concentración de HBr +KBr	10	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.050	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.85	m	Hora de Inicio de la Prueba	12/11/2020 11:20	
Altura Final de Mineral	0.84	m	Hora de Inicio de Drenado	12/11/2020 17:45	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,006	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	6.43	horas
Velocidad de Percolación	3.17	m/día	Volumen Retenido	0.20	L
Agua en Mineral	0.04	L	% Humedad de Saturación	6.77	%
% Compactación	1.18	%	Tiempo	7	días

Nota: Elaboración propia

Figura 51

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°1



Nota: Elaboración propia

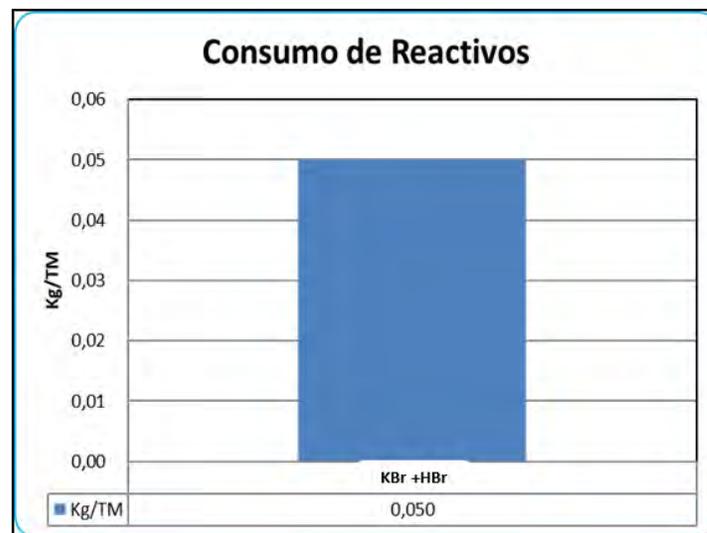
Tabla 25

Resultados de la columna N°1

Fecha	Dia	Solucion de Riego				Solucion Pregnant					Extraccion Au							
		Volume n (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+ KBr Adicio n (ml)	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	pH	KBr+ HBr (g/L)	Ley (ppm) Au	Diario (mg)	Acumula do (mg)	Acumula do (g/TM)	% Diario	% Acumul ado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
17/nov	0	4,00	1,15	1,52	90,20													
18/nov	1	4,00	2,30	1,50	40,83	1,76	1,76	1,60	11,0	0,522	0,92	0,92	0,26	27,61	27,61	19,59	19,50	
19/nov	2	4,00	3,45	1,31	44,06	1,92	3,68	1,35	9,0	0,333	0,61	1,52	0,44	18,27	45,88	32,55	32,40	
20/nov	3	4,00	4,59	1,42	43,58	1,80	5,48	1,58	8,5	0,312	0,44	1,97	0,56	13,35	59,24	42,03	41,83	
21/nov	4	4,00	5,74	1,18	46,49	1,92	7,40	1,61	10,0	0,263	0,40	2,36	0,68	12,05	71,28	50,58	50,34	
22/nov	5	4,00	6,89	1,22	41,40	1,71	9,11	1,65	9,2	0,228	0,37	2,73	0,78	11,06	82,35	58,43	58,15	
23/nov	6	4,00	8,04	1,42	38,74	1,60	3,32	10,71	1,50	8,7	0,183	0,59	3,32	0,95	17,65	100,00	70,95	70,22
24/nov	7	4,00	8,04	1,42	41,65	1,72		12,43	1,43	9,5								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h	
Au (g/TM)	1,349	4,70	Au (g/TM) 0,390		1,36	0,511	ml/min
						0,735	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion Au (Cabeza Analizada)	% Extracción Au (Cabeza calculada)	% ExtracciónAu (Cnbeza -ripios)
70,95	70,22	71,09



Nota: Elaboración propio

✓ Prueba N°2

Tabla 26

Condiciones de operación para columna N°2

PRUEBA EN COLUMNA #2					
Datos Operacionales					
Codigo de Prueba	C-02				
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m ²
Peso de Mineral Húmedo	3.49	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 3/4	"	pH natural	6.5	
Porcentaje de Humedad	0.50	%	KBr	380.00	g
Peso de Mineral Seco	3.47	Kg	HBr	200.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	10	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total HBr+KBr	0.028	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.84	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 11:41	
Altura Final de Mineral	0.83	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:30	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,024	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.83	Horas
Velocidad de Percolación	3.46	m/día	Volumen Retenido	0.18	L
Agua en Mineral	0.02	L	% Humedad de Saturación	5.62	%
% Compactación	1.19	%	Tiempo	7	Días

Nota: Elaboración propia

Figura 52

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°2



Nota: Elaboración propia

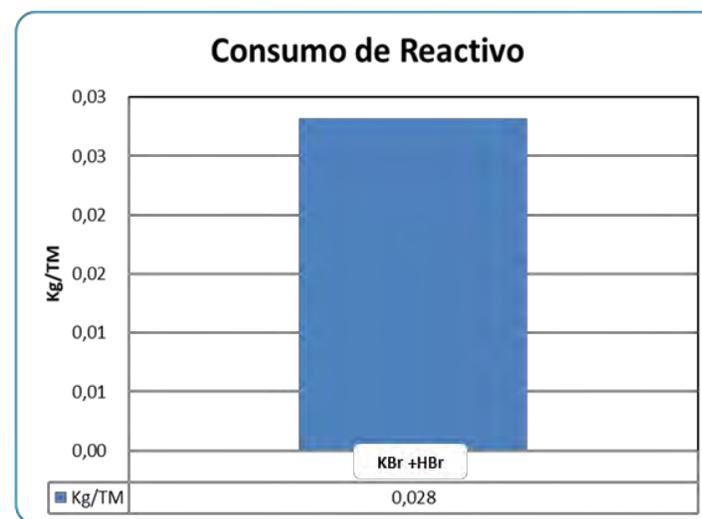
Tabla 27

Resultados de la columna N°2

Fecha	Dia	Solucion de Riego				Solucion Pregnant					Extraccion Au							
		Volumen (L)	Ratio Liquid o / Solido	pH	HBr+ KBr	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	pH	HBr+ KBr (g/L)	Ley (ppm)	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
					Total (ml)					Au								
17/nov	0	4,00	1,17	1,52	92,80													
18/nov	1	4,00	2,34	1,50	127,60	1,50	1,50	1,60	8,2	0,467	0,70	0,70	0,20	21,49	21,49	15,71	14,95	
19/nov	2	4,00	3,51	1,31	169,83	1,82	3,32	1,35	9,8	0,356	0,65	1,35	0,39	19,87	41,36	30,25	28,78	
20/nov	3	4,00	4,68	1,42	211,59	1,80	5,12	1,58	10,2	0,317	0,57	1,92	0,55	17,50	58,86	43,04	40,97	
21/nov	4	4,00	5,85	1,18	256,14	1,92	7,04	1,61	10,0	0,287	0,55	2,47	0,71	16,90	75,76	55,40	52,73	
22/nov	5	4,00	7,02	1,22	297,90	1,80	8,84	1,65	10,9	0,231	0,42	2,89	0,83	12,75	88,52	64,73	61,60	
23/nov	6	4,00	8,19	1,42	337,35	1,70	3,20	10,54	1,50	10,6	0,117	0,37	3,26	0,93	11,48	100,00	73,13	69,60
24/nov	7	4,00		1,42	372,15	1,50		12,04	1,67	9,8								

Ley de Cabeza		Cont. Met.	Ley de Colas		Cont. Met.	Flujo	0,031	l/h
Au (g/TM)	1,349	0,67	Au (g/TM)	0,345	0,17		0,511	ml/min
							0,735	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza ripios)
73,13	69,60	71,83



Nota: Elaboración propio

✓ PRUEBA N°3

Tabla 28

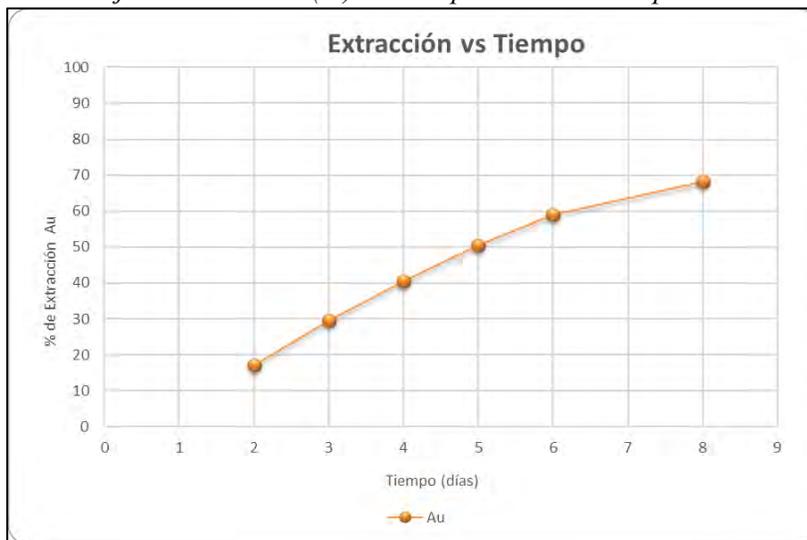
Condiciones de operación para columna N°3

PRUEBA EN COLUMNA #3					
Datos Operacionales					
Código de Prueba	C-03				
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m ²
Peso de Mineral Húmedo	3.49	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 1/4	"	pH natural	6.4	
Porcentaje de Humedad	0.80	%	KBr	320.00	g
Peso de Mineral Seco	3.46	Kg	HBr	180.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	20	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total HBr+KBr	0.102	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.82	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 11:54	
Altura Final de Mineral	0.81	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:44	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,067	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.84	horas
Velocidad de Percolación	3.37	m/día	Volumen Retenido	0.18	L
Agua en Mineral	0.03	litros	% Humedad de Saturación	5.93	%
% Compactación	1.22	%	Tiempo	7	días

Nota : Elaboración propia

Figura 53

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°3



Nota: Elaboración propio

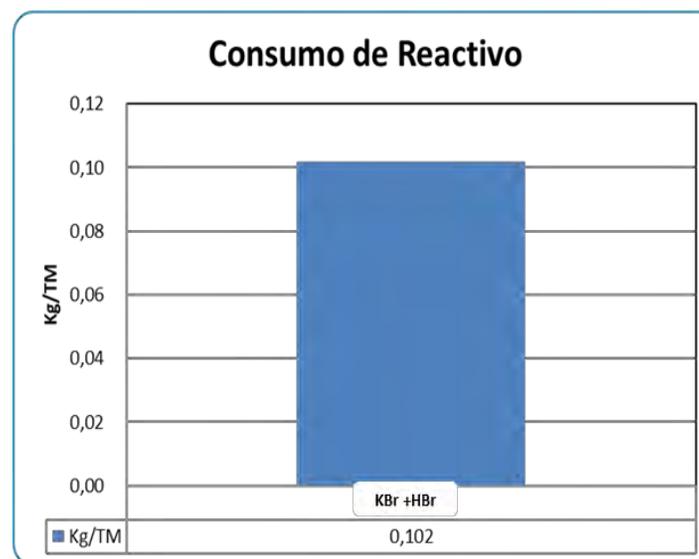
Tabla 29

Resultados de la columna N°3

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant					Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr Adicion (ml)	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	pH	HBr+KBr (g/L)	Ley (ppm) Au	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
17/nov	0	4,00	4,00	1,17	1,52	182,05													
18/nov	1	4,00	8,00	2,34	1,50	38,40	1,66	1,66	1,60	17,4	0,479	0,79	0,79	0,23	24,88	24,88	17,21	16,97	
19/nov	2	4,00	12,00	3,51	1,31	42,23	1,82	3,48	1,35	18,4	0,321	0,58	1,38	0,40	18,33	43,21	29,89	29,48	
20/nov	3	4,00	16,00	4,68	1,42	41,76	1,80	5,28	1,58	21,0	0,286	0,51	1,89	0,55	16,15	59,36	41,07	40,51	
21/nov	4	4,00	20,00	5,85	1,18	39,91	1,72	7,00	1,61	19,5	0,272	0,47	2,36	0,68	14,68	74,04	51,22	50,52	
22/nov	5	4,00	24,00	7,02	1,22	44,08	1,90	8,90	1,65	19,0	0,207	0,39	2,75	0,79	12,34	86,38	59,76	58,94	
23/nov	6	4,00	28,00	8,19	1,30	29,23	1,26	2,80	10,16	1,45	18,0	0,155	0,43	3,19	0,91	13,62	100,00	69,18	68,24
24/nov	7	4,00			1,35	35,73	1,54		11,70	1,75	19,5								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas		Cont. Met. (mg.)	Flujo			
Au (g/TM)	1,349	6,88	Au (g/TM) 0,410	2,09		0,031	l/h	
						0,511	ml/min	
					0,735	l/dia		

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza ripios)
69,18	68,24	68,87



Nota: Elaboración propio

✓ PRUEBA N°4

Tabla 30

Condiciones de operación para columna N°4

PRUEBA EN COLUMNA #4					
Datos Operacionales					
Código de Prueba	C-04				
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m ²
Peso de Mineral Húmedo	3.51	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 3/4	"	pH	1.5	
Porcentaje de Humedad	0.80	%	KBr	360.00	g
Peso de Mineral Seco	3.48	Kg	HBr	260.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	20	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.094	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.81	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 11:36	
Altura Final de Mineral	0.80	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:28	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,104	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.88	h
Velocidad de Percolación	3.31	m/día	Volumen Retenido	0.18	L
Agua en Mineral	0.03	L	% Humedad de Saturación	5.93	%
% Compactación	1.23	%	Tiempo	7	días

Nota: Elaboración propio

Figura 54

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°4



Nota: Elaboración propio

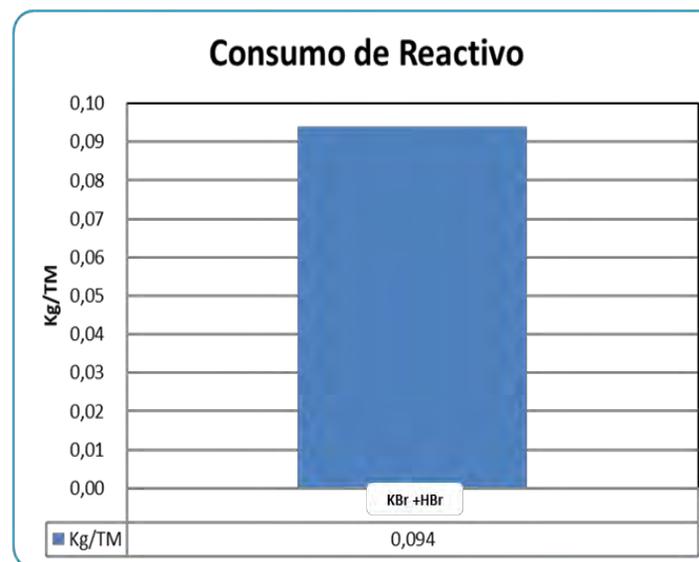
Tabla 31

Resultados de la columna N°4

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant					Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	pH	HBr+KBr	Ley (ppm)	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
						Adicion (ml)				(g/L)	Au								
17/nov	0	4,00	4,00	1,16	1,52	185,02													
18/nov	1	4,00	8,00	2,33	1,50	70,53	1,52	1,52	1,60	19,6	0,456	0,69	0,69	0,20	20,63	20,63	15,16	14,76	
19/nov	2	4,00	12,00	3,49	1,31	85,85	1,85	3,37	1,35	18,5	0,358	0,66	1,36	0,39	19,71	40,35	29,65	28,86	
20/nov	3	4,00	16,00	4,65	1,42	71,93	1,55	4,92	1,58	20,1	0,288	0,45	1,80	0,52	13,29	53,63	39,42	38,36	
21/nov	4	4,00	20,00	5,81	1,18	75,17	1,62	6,54	1,61	19,5	0,283	0,46	2,26	0,64	13,65	67,28	49,45	48,12	
22/nov	5	4,00	24,00	6,98	1,22	85,85	1,85	8,39	1,65	19,2	0,228	0,42	2,68	0,76	12,56	79,84	58,67	57,10	
23/nov	6	4,00	28,00	8,14	1,42	0,87	1,56	3,34	9,95	1,50	20,5	0,201	0,68	3,36	0,96	20,16	100,00	73,49	71,42
24/nov	7	4,00			1,42	0,87	1,78		11,73	1,22	19,8								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h
Au (g/TM)	1,349	4,70	1,21		0,511	ml/min
					0,735	l/día

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion Au (Cabeza ripios)
73,49	71,52	74,80



Nota: Elaboración propio

✓ PRUEBA N°5

Tabla 32

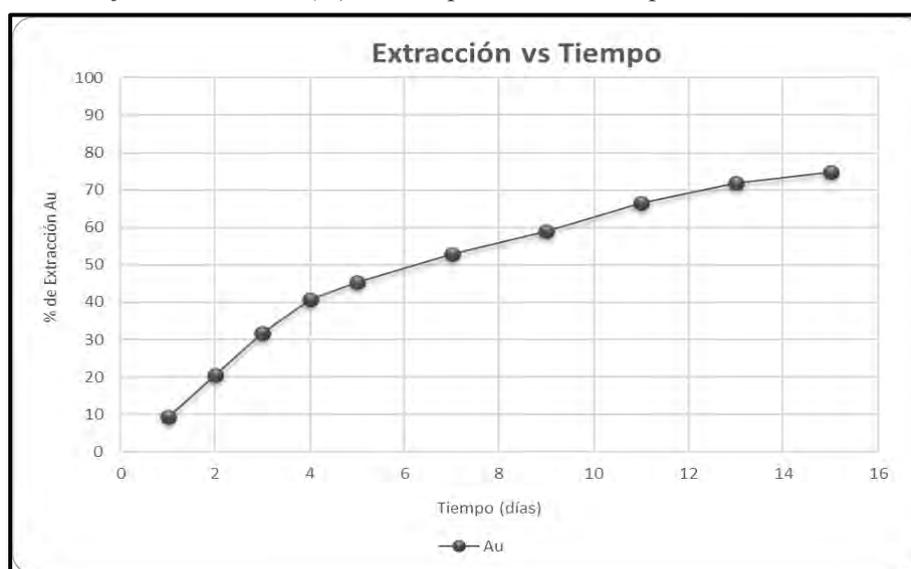
Condiciones de operación para columna N°5

PRUEBA EN COLUMNA #5					
Datos Operacionales					
Código de Prueba	C-05				
Muestra	SM-1		Area Columna	0.00204	m2
Peso de Mineral Húmedo	3.50	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m2
Tamaño de Partícula	- 1/4	"	pH	1.5	
Porcentaje de Humedad	2.00	%	KBr	360.00	g
Peso de Mineral Seco	3.43	Kg	HBr	250.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	10	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.059	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.85	m	Hora de Inicio de la Prueba	12/11/2020 11:29	
Altura Final de Mineral	0.84	m	Hora de Inicio de Drenado	12/11/2020 17:45	
Densidad Bulk Inicial Seca	1,975	Kg/m3	Tiempo de Drenado	6.28	h
Velocidad de Percolación	3.25	m/día	Volumen Retenido	0.19	L
Agua en Mineral	0.07	L	% Humedad de Saturación	7.49	%
% Compactación	1.18	%	Tiempo	15	días

Nota: Elaboración propio

Figura 55

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°5



Nota: Elaboración propio

Tabla 33

Resultados de la columna N°5

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant					Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+ KBr	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	pH	KBr+ HBr (g/L)	Ley (ppm)	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
						Adicion (ml)				Au									
17/nov	0	4,00	4,00	1,17	1,52	96,85													
18/nov	1	4,00	8,00	2,33	1,50	0,00	1,16	1,16	1,60	9,11	0,376	0,44	0,44	0,13	12,49	12,49	9,48	9,33	
19/nov	2	4,00	12,00	3,50	1,31	0,00	1,62	2,78	1,35	11,00	0,346	0,52	0,96	0,28	14,91	27,40	20,80	20,47	
20/nov	3	4,00	16,00	4,66	1,42	0,00	1,92	4,70	1,58	10,00	0,295	0,53	1,48	0,43	15,08	42,48	32,24	31,73	
21/nov	4	4,00	20,00	5,83	1,18	0,00	1,67	6,37	1,61	9,80	0,276	0,42	1,90	0,54	12,06	54,53	41,39	40,73	
22/nov	5	4,00	24,00	7,00	1,22	0,00	1,80	8,17	1,65	10,50	0,142	0,22	2,12	0,61	6,17	60,71	46,07	45,35	
23/nov	6	4,00	28,00	8,16	1,42	0,87	1,41	3,10	9,58	1,50	10,30	0,126	0,35	2,47	0,71	10,04	70,75	53,70	52,85
24/nov	7	4,00	32,00	9,33	1,42	0,87	1,69		11,27	1,60	10,90								
25/nov	8	4,00	36,00	10,50	1,42	0,87	1,32	2,90	12,59	1,50	10,10	0,124	0,29	2,76	0,79	8,32	79,07	60,01	59,06
26/nov	9	4,00	40,00	11,66	1,42	0,87	1,58		14,17	1,60	10,60								
27/nov	10	4,00	44,00	12,83	1,42	0,87	1,42	3,12	15,59	1,70	10,10	0,115	0,35	3,11	0,89	9,95	89,02	67,57	66,50
28/nov	11	4,00	48,00	13,7931	1,42	0,87	1,70		17,29	1,45	9,90								
29/nov	12	4,00	52,00	14,9425	1,42	0,87	1,27		18,56	1,50	11,10								
30/nov	13	4,00	56,00	16,092	1,42	0,87	1,52	2,8	20,08	1,40	10,10	0,107	0,25	3,36	0,96	7,25	96,27	73,07	71,91
01/dic	14	4,00	60,00	17,2414	1,42	0,87	1,23	2,7	21,31	1,45	10,12	0,063	0,13	3,49	1,00	3,73	100,00	75,90	74,70
02/dic	15	4,00	64,00	18,3908	1,42	0,87	1,47		22,78	1,50	10,40								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h	
Au (g/TM)	1,349	6,88	Au (g/TM) 0,320		1,63	0,5	ml/min
						0,74	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza ripios)
75,90	74,70	76,28



Nota: Elaboración propio

✓ PRUEBAN°6

Tabla 34

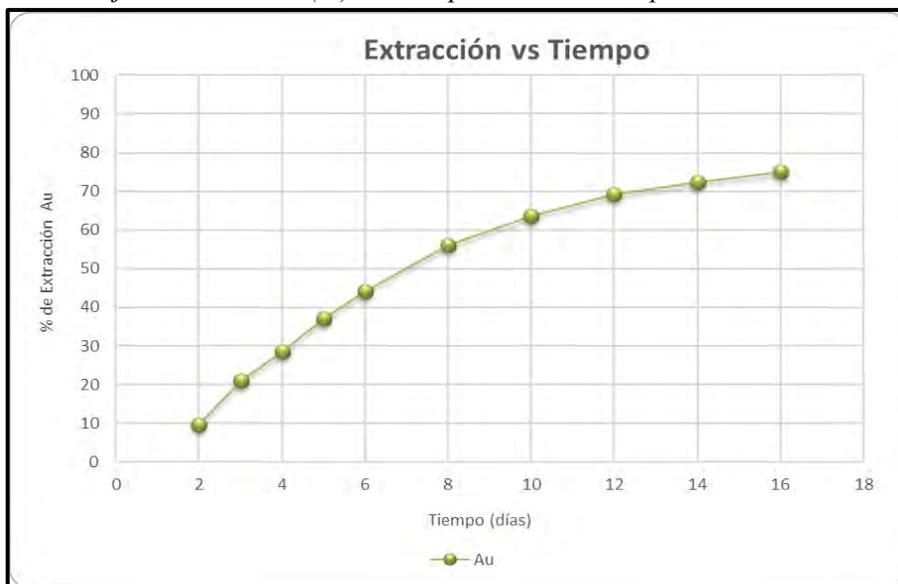
Condiciones de operación para columna N°6

PRUEBA EN COLUMNA #6					
Datos Operacionales					
Codi go de Prueba	C-06				
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m2
Peso de Mineral Húmedo	3.51	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 3/4	"	pH natural	5.5	
Porcentaje de Humedad	0.80	%	KBr	360.00	g
Peso de Mineral Seco	3.48	Kg	HBr	200.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	10	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total deHBr+KBr	0.082	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.85	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 11:59	
Altura Final de Mineral	0.84	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:39	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,005	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.68	h
Velocidad de Percolación	3.59	m/día	Volumen Retenido	0.17	L
Agua en Mineral	0.03	l	% Humedad de Saturación	5.76	%
% Compactación	1.18	%	tiempo	15	días

Nota: Elaboración propio

Figura 56

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°6



Nota: Elaboración propio

Tabla 35

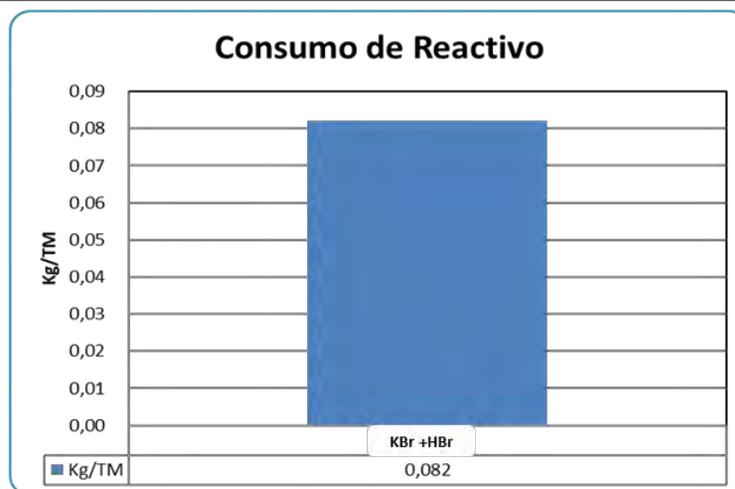
Resultados de la columna N°6

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant					Extraccion Au						
		Volume n (L)	Volum en Acumulado	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr Adicion (ml)	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	pH	HBr+KBr (g/L)	Ley (ppm) Au	Di ario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Di ario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)
17/nov	0	4,00	4,00	1,16	1,52	92,80												
18/nov	1	4,00	8,00	2,33	1,50	20,88	0,90	0,90	1,60	8,7	0,495	0,45	0,45	0,13	12,64	12,64	9,46	9,48
19/nov	2	4,00	12,00	3,49	1,31	35,27	1,52	2,42	1,35	9,2	0,359	0,55	0,99	0,28	15,49	28,13	21,06	21,10
20/nov	3	4,00	16,00	4,65	1,42	25,75	1,11	3,53	1,58	9,3	0,311	0,35	1,34	0,38	9,80	37,93	28,39	28,45
21/nov	4	4,00	20,00	5,81	1,18	35,27	1,52	5,05	1,61	8,3	0,262	0,40	1,73	0,49	11,30	49,23	36,85	36,93
22/nov	5	4,00	24,00	6,98	1,22	33,41	1,44	6,49	1,65	8,1	0,236	0,34	2,07	0,59	9,64	58,87	44,07	44,16
23/nov	6	4,00	28,00	8,14	1,42	25,94	1,12	7,61	1,50	7,9	0,215	0,56	2,63	0,75	15,86	74,74	55,94	56,07
24/nov	7	4,00	32,00	9,30	1,42	34,39	1,48	9,09	0,95	9,2	0,158	0,35	2,63	0,75	15,86	74,74	55,94	56,07
25/nov	8	4,00	36,00	10,47	1,20	21,95	0,95	10,04	1,70	10,0	0,158	0,35	2,98	0,85	9,86	84,60	63,32	63,47
26/nov	9	4,00	40,00	11,63	1,20	29,10	1,25	11,29	1,70	10,3	0,158	0,35	2,98	0,85	9,86	84,60	63,32	63,47
27/nov	10	4,00	44,00	12,79	1,20	25,44	1,10	12,39	1,65	11,0	0,104	0,27	3,25	0,92	7,53	92,13	68,96	69,11
28/nov	11	4,00	44,00	12,64	1,31	33,72	1,45	13,84	1,35	10,9	0,104	0,27	3,25	0,92	7,53	92,13	68,96	69,11
29/nov	12	4,00	48,00	13,79	1,42	28,93	1,25	15,09	1,58	9,2	0,053	0,15	3,40	0,97	4,36	96,49	72,22	72,38
30/nov	13	4,00	52,00	14,93	1,18	38,35	1,65	16,74	1,61	10,0	0,053	0,15	3,40	0,97	4,36	96,49	72,22	72,38
01/dic	14	4,00	56,00	16,08	1,22	27,44	1,18	17,92	1,65	10,3	0,045	0,12	3,52	1,00	3,51	100,00	74,85	75,02
02/dic	15	4,00	60,00	18,02	1,42	36,37	1,57	19,49	1,55	10,5	0,045	0,12	3,52	1,00	3,51	100,00	74,85	75,02

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h	
Au (g/TM)	1,349	Au (g/TM)	0,340		1,73	0,511	ml/min
	6,88					0,735	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza ripios)
74,85	75,02	74,05

Nota: Elaboración propio



✓ PRUEBA N°7

Tabla 36

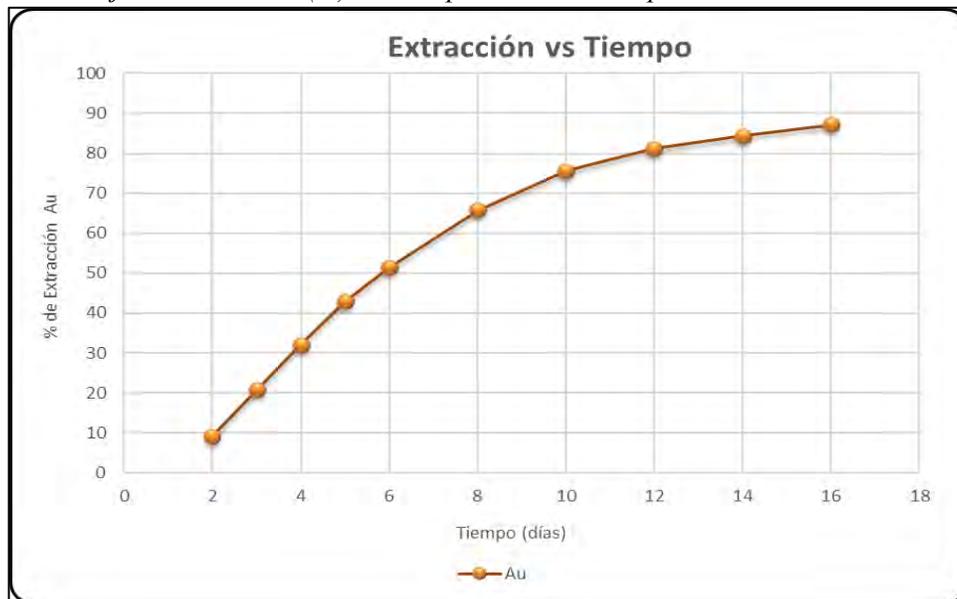
Condiciones de operación para columna N°7

PRUEBA EN COLUMNA #7					
Datos Operacionales					
Código de Prueba			C-07		
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m ²
Peso de Mineral Húmedo	3.53	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 1/4	"	pH natural	5.5	
Porcentaje de Humedad	0.80	%	KBr	380.00	g
Peso de Mineral Seco	3.50	Kg	HBr	250.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	20	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.132	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.85	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 11:49	
Altura Final de Mineral	0.84	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:35	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,017	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.78	h
Velocidad de Percolación	3.53	m/día	Volumen Retenido	0.18	L
Agua en Mineral	0.03	L	% Humedad de Saturación	5.81	%
% Compactación	1.18	%	tiempo	15.00	días

Nota: Elaboración propio

Figura 57

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°7



Nota: Elaboración propio

Tabla 37

Resultados de la columna N°7

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant						Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr (g/L)	Ley (ppm) Au	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)
						Adicion (ml)														
17/nov	0	4,00	4,00	1,16	1,52	185,05														
18/nov	1	4,00	8,00	2,31	1,50	53,60		1,16	1,16	0,33	1,60	15,7	0,374	0,43	0,43	0,12	10,57	10,57	9,14	9,14
19/nov	2	4,00	12,00	3,47	1,31	75,17		1,62	2,78	0,79	1,35	16,9	0,336	0,54	0,98	0,28	13,32	23,89	20,67	20,67
20/nov	3	4,00	16,00	4,63	1,42	78,89		1,70	4,48	1,28	1,58	21,4	0,316	0,54	1,51	0,43	13,14	37,03	32,04	32,04
21/nov	4	4,00	20,00	5,78	1,18	79,81		1,72	6,20	1,77	1,61	20,0	0,297	0,51	2,02	0,57	12,48	49,51	42,83	42,84
22/nov	5	4,00	24,00	6,94	1,22	71,93		1,55	7,75	2,21	1,65	18,6	0,260	0,40	2,43	0,69	9,86	59,37	51,36	51,37
23/nov	6	4,00	28,00	8,09	1,32	53,83	1,16	2,90	8,91	2,54	1,50	20,1	0,233	0,68	3,10	0,88	16,53	75,91	65,67	65,67
24/nov	7	4,00	32,00	9,25	1,42	80,74	1,74		10,65	3,04	1,95	21,0								
25/nov	8	4,00	36,00	10,41	1,20	51,97	1,12	2,80	11,77	3,36	1,70	19,0	0,166	0,46	3,57	1,01	11,37	87,28	75,51	75,51
26/nov	9	4,00	40,00	11,56	1,30	77,96	1,68		13,45	3,84	1,30	21,0								
27/nov	10	4,00	44,00	12,72	1,40	39,91	0,86	2,15	14,31	4,09	1,50	22,0	0,115	0,25	3,81	1,08	6,05	93,33	80,74	80,75
28/nov	11	4,00	48,00	13,707	1,21	59,86	1,29		15,60	4,46	1,18	21,4								
29/nov	12	4,00	52,00	14,857	1,30	47,33	1,02	2,6	16,62	4,75	1,00	20,0	0,056	0,14	3,96	1,12	3,49	96,82	83,76	83,77
30/nov	13	4,00	56,00	16,000	1,20	71,00	1,53		18,15	5,18	1,83	18,6								
01/dic	14	4,00	60,00	17,143	1,15	49,19	1,06	2,7	19,21	5,49	1,65	20,1	0,049	0,13	4,09	1,16	3,18	100,00	86,51	87,09
02/dic	15	4,00	64,00	18,286	1,20	73,78	1,59		20,80	5,94	1,48	21,0								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h	
Au (g/TM)	1,349	6,88	0,182		0,93	0,511	ml/min
						0,735	l/da

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza r ipios)
86,51	87,09	86,51

Nota:Elaboración propio



✓ PRUEBAN°8

Tabla 38

Condiciones de operación para columna N°8

PRUEBA EN COLUMNA #8					
Datos Operacionales					
Código de Prueba			C-08		
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m ²
Peso de Mineral Húmedo	3.54	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 3/4	"	pH natural	5.25	
Porcentaje de Humedad	0.80	%	KBr	370.00	g
Peso de Mineral Seco	3.51	Kg	HBr	200.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	20	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.136	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.82	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 12:02	
Altura Final de Mineral	0.81	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:55	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,096	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.89	h
Velocidad de Percolación	3.34	m/día	Volumen Retenido	0.18	L
Agua en Mineral	0.03	L	% Humedad de Saturación	5.90	%

Nota: Elaboración propio

Figura 58

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°8



Nota: Elaboración propio

Tabla 39

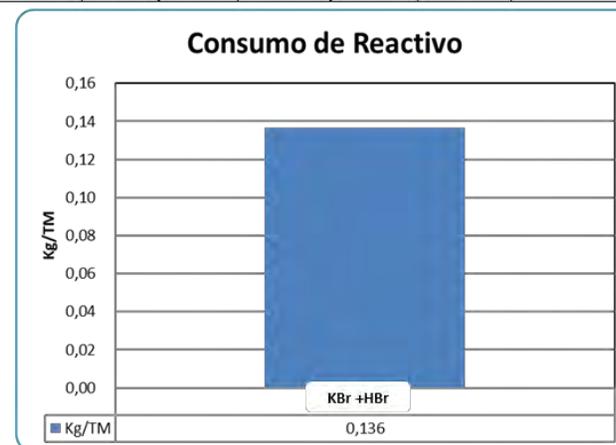
Resultados de la columna N°8

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant						Extraccion Au							
		Volume n (L)	Volume n Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr Adicion (ml)	Volume n (L)	Volume n Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	KBr+HBr (g/L)	Ley (ppm) Au	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
17/nov	0	4,00	4,00	1,15	1,52	185,05														
18/nov	1	4,00	8,00	2,31	1,50	22,16	0,96	0,96	0,27	1,60	16,58	0,568	0,54	0,54	0,15	13,29	13,29	11,42	11,45	
19/nov	2	4,00	12,00	3,46	1,31	32,95	1,42	2,38	0,68	1,35	17,00	0,359	0,51	1,05	0,30	12,49	25,78	22,16	22,21	
20/nov	3	4,00	16,00	4,61	1,42	37,12	1,60	3,98	1,13	1,58	20,63	0,367	0,59	1,64	0,47	14,39	40,16	34,52	34,61	
21/nov	4	4,00	20,00	5,77	1,18	35,27	1,52	5,50	1,57	1,61	21,06	0,285	0,43	2,07	0,59	10,61	50,78	43,64	43,75	
22/nov	5	4,00	24,00	6,92	1,22	33,64	1,45	6,95	1,98	1,65	22,25	0,246	0,36	2,43	0,69	8,72	59,50	51,14	51,27	
24/nov	7	4,00	32,00	9,22	1,42	32,58	1,40	2,60	2,72	0,95	22,91	0,199	0,52	2,95	0,83	12,66	72,16	62,02	62,18	
25/nov	8	4,00	36,00	10,38	1,20	30,95	1,33	2,90	10,88	3,10	1,70	18,21	0,175	0,51	3,45	0,98	12,43	84,60	72,71	72,89
26/nov	9	4,00	40,00	11,53	1,20	36,33	1,57	2,90	12,45	3,55	1,10	19,01								
27/nov	10	4,00	44,00	12,97	1,20	29,35	1,27	2,75	13,71	3,91	1,12	22,00	0,119	0,33	3,78	1,07	8,02	92,61	79,60	79,80
28/nov	11	4,00	48,00	13,68	1,42	34,45	1,49	2,75	15,20	4,33	1,58	21,06								
29/nov	12	4,00	52,00	14,81	1,18	27,22	1,17	2,6	16,37	4,66	1,61	22,25	0,075	0,19	3,97	1,12	4,69	97,30	83,63	83,83
30/nov	13	4,00	56,00	15,95	1,22	31,95	1,38	2,6	17,75	5,06	1,65	18,99								
01/dic	14	4,00	60,00	17,09	1,42	33,62	1,45	3,2	19,19	5,47	1,50	22,91	0,035	0,11	4,08	1,15	2,70	100,00	85,95	86,16
02/dic	15	4,00	64,00	18,23	1,42	39,47	1,70	3,2	20,90	5,95	1,95	18,21								

Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	lh	
Au (g/TM)	1,349	4,74	0,190		0,190	0,511	ml/min
						0,735	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion Au (Cabeza rtipos)
85,95	86,16	85,92

Nota: Elaboración propio



✓ PRUEBAN°9

Tabla 40

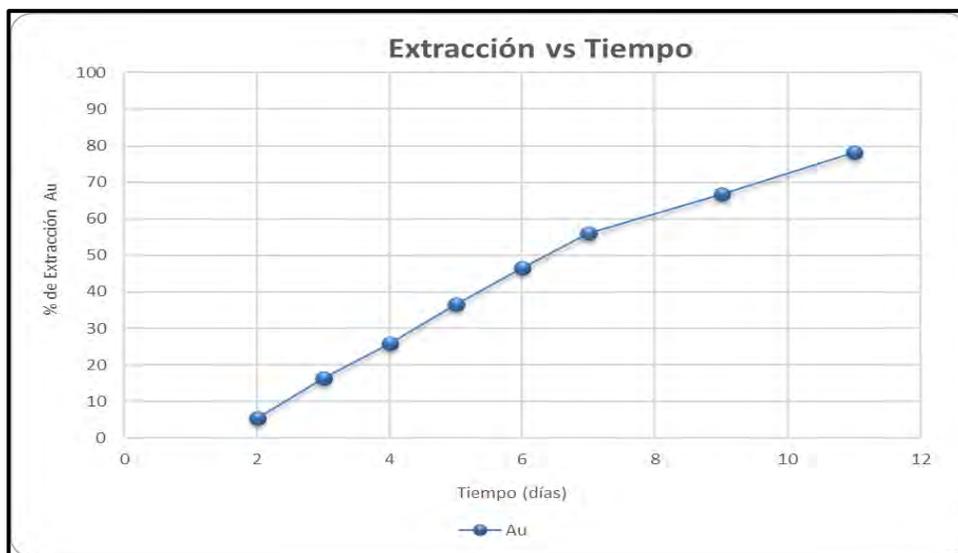
Condiciones de operación para columna N°9

PRUEBA EN COLUMNA #9					
Datos Operacionales					
Código de Prueba			C-09		
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m2
Peso de Mineral Húmedo	3.53	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	-0.500		pH	1.5	
Porcentaje de Humedad	0.80	%	KBr	350.00	g
Peso de Mineral Seco	3.50	Kg	HBr	180.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	15	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.094	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.82	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 12:10	
Altura Final de Mineral	0.81	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 18:01	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,090	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.86	h
Velocidad de Percolación	3.36	m/día	Volumen Retenido	0.18	L
Agua en Mineral	0.03	L	% Humedad de Saturación	5.89	%
% Compactación	1.22	%	tiempo	11	días

Nota: Elaboración propio

Figura 59

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°9



Nota: Elaboración propio

Tabla 41

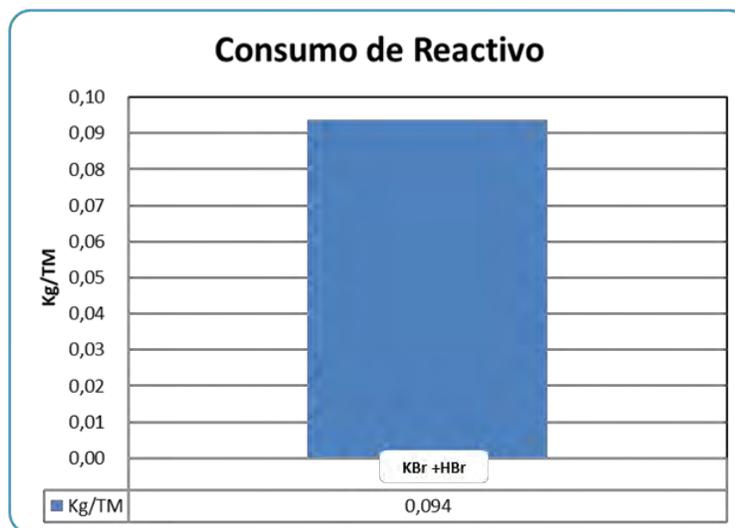
Resultados de la columna N°9

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant						Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr Adicion (ml)	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr (g/L)	Ley (ppm) Au	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
17/nov	0	4,00	4,00	1,16	1,52	139,02														
18/nov	1	4,00	8,00	2,31	1,50	26,28	0,76	0,76	0,22	1,60	13,2	0,339	0,26	0,26	0,07	6,85	6,85	5,51	5,42	
19/nov	2	4,00	12,00	3,47	1,31	66,82	1,92	2,68	0,76	1,35	14,0	0,269	0,52	0,77	0,22	13,81	20,66	16,61	16,35	
20/nov	3	4,00	16,00	4,63	1,42	55,68	1,60	4,28	1,22	1,58	15,0	0,281	0,45	1,22	0,35	12,03	32,69	26,28	25,87	
21/nov	4	4,00	20,00	5,78	1,18	59,86	1,72	6,00	1,71	1,61	15,1	0,293	0,50	1,73	0,49	13,48	46,16	37,12	36,54	
22/nov	5	4,00	24,00	6,94	1,22	57,77	1,66	7,66	2,19	1,65	14,8	0,285	0,47	2,20	0,62	12,65	58,82	47,30	46,55	
23/nov	6	4,00	28,00	8,09	1,42	22,83	0,66	1,60	8,31	2,37	1,50	15,5	0,298	0,48	2,68	0,76	12,75	71,57	57,56	56,65
24/nov	7	4,00	32,00	9,25	1,42	32,85	0,94		9,26	2,64	1,95	14,1								
25/nov	8	4,00	36,00	10,41	1,20	34,25	0,98	2,40	10,24	2,93	1,70	15,2	0,216	0,52	3,19	0,90	13,87	85,44	68,71	67,62
26/nov	9	4,00	40,00	11,43	1,42	49,28	1,42		11,66	3,33	1,61	15,0								
27/nov	10	4,00	44,00	12,57	1,18	39,24	1,13	2,8	12,78	3,65	1,65	15,1	0,198	0,54	3,74	1,06	14,56	100,00	80,42	78,16
28/nov	11	4,00	48,00	13,71	1,22	56,47	1,62		14,41	4,12	1,50	14,8								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h	
Au (g/TM)	1,349	4,72	Au (g/TM) 0,290		1,02	0,511	ml/min
						0,735	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza ripios)
80,42	78,16	78,50

Fuente: Elaboración propio



✓ PRUEBAN°10

Tabla 42

Condiciones de operación para columna N°10

PRUEBA EN COLUMNA #10					
Datos Operacionales					
Código de Prueba	C-10				
Muestra	SM-1	Área Columna	0.00204	m2	
Peso de Mineral Húmedo	3.52 Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²	
Tamaño de Partícula	- 1/2 "	pH natural	6.2		
Porcentaje de Humedad	0.95 %	KBr	320.00	g	
Peso de Mineral Seco	3.49 Kg	HBr	180.00	ml	
Diámetro de Columna	5.10 cm	Concentración de HBr +KBr	15	g/L	
Altura de Columna	100 cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.077	Kg/TM	
Altura Inicial de Mineral	0.85 m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 12:24		
Altura Final de Mineral	0.84 m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 17:55		
Densidad Bulk Inicial Seca	2,008 Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.53	h	
Velocidad de Percolación	3.69 m/día	Volumen Retenido	0.17	L	
Agua en Mineral	0.03 L	% Humedad de Saturación	5.76	%	
% Compactación	1.18 %	tiempo	11	días	

Nota: Elaboración propio

Figura 60

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°10



Nota: Elaboración propio

Tabla 43

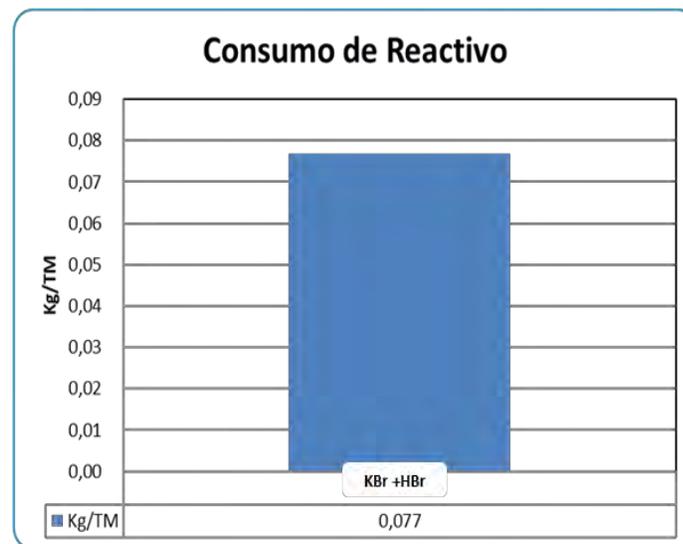
Resultados de la columna N°10

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant						Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr	Ley (ppm)	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
						Adicion (ml)					Br (g/L)									Au
17/nov	0	4,00	4,00	1,16	1,52	139,02														
18/nov	1	4,00	8,00	2,32	1,50	35,15	1,01	1,01	0,29	1,60	14,2	0,320	0,32	0,32	0,09	8,90	8,90	6,91	6,87	
19/nov	2	4,00	12,00	3,48	1,31	59,86	1,72	2,73	0,78	1,35	16,6	0,298	0,51	0,84	0,24	14,12	23,02	17,87	17,77	
20/nov	3	4,00	16,00	4,64	1,42	63,34	1,82	4,55	1,30	1,58	14,4	0,279	0,51	1,34	0,39	13,99	37,01	28,73	28,57	
21/nov	4	4,00	20,00	5,80	1,18	63,34	1,82	6,37	1,83	1,61	15,0	0,248	0,45	1,79	0,51	12,43	49,45	38,39	38,16	
22/nov	5	4,00	24,00	6,96	1,22	58,82	1,69	8,06	2,31	1,65	12,9	0,235	0,40	2,19	0,62	10,94	60,39	46,88	46,61	
23/nov	6	4,00	28,00	8,12	1,42	33,62	0,97	2,30	9,03	2,59	1,50	14,6	0,279	0,64	2,83	0,81	17,68	78,07	60,60	60,25
24/nov	7	4,00	32,00	9,28	1,42	46,43	1,33		10,36	2,97	1,50	15,4								
25/nov	8	4,00	36,00	10,44	1,42	43,12	1,24	2,95	11,60	3,32	1,50	16,0	0,190	0,56	3,39	0,96	15,44	93,51	72,59	72,17
26/nov	9	4,00	40,00	11,46	1,18	59,55	1,71		13,31	3,81	1,58	15,1								
27/nov	10	4,00	44,00	12,61	1,22	45,31	1,30	3,1	14,61	4,19	1,61	14,2	0,076	0,24	3,63	1,03	6,49	100,00	77,63	77,18
28/nov	11	4,00	48,00	13,75	1,42	62,58	1,80		16,41	4,70	1,65	13,2								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	l/h	
Au (g/TM)	1,349	6,88	Au (g/TM) 0,300		1,53	0,511	ml/min
						0,735	l/dia

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion de Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion de Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion de Au (Cabeza ripios)
77,63	77,18	77,76

Nota: Elaboración propio



✓ PRUEBANº11

Tabla 44

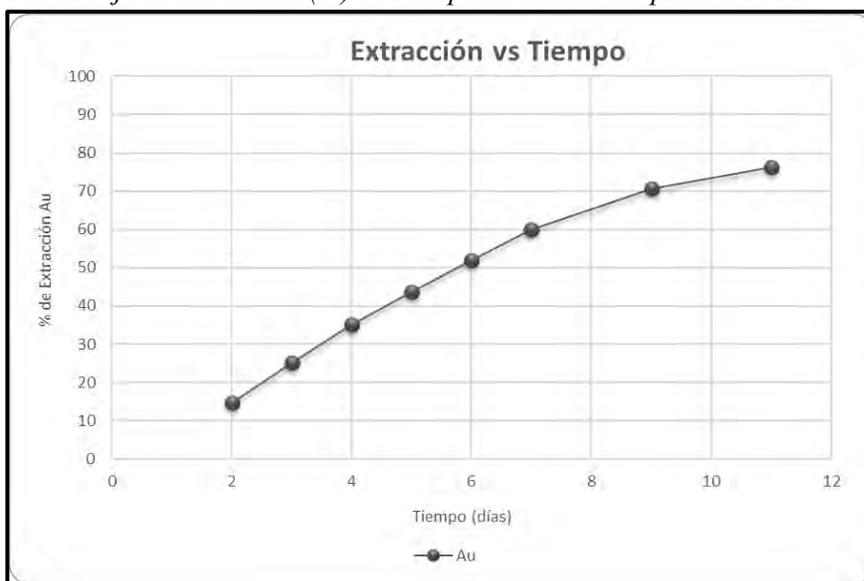
Condiciones de operación para columna N°11

PRUEBA EN COLUMNA #11					
Datos Operacionales					
Código de Prueba			C-11		
Muestra	SM-1		Área Columna	0.00204	m ²
Peso de Mineral Húmedo	3.52	Kg	Ratio de Flujo	15	L/h*m ²
Tamaño de Partícula	- 1/2	"	pH natural	5.5	
Porcentaje de Humedad	0.89	%	KBr	380.00	g
Peso de Mineral Seco	3.49	Kg	HBr	185.00	ml
Diámetro de Columna	5.10	cm	Concentración de HBr +KBr	15	g/L
Altura de Columna	100	cm	Consumo Total de HBr+KBr	0.154	Kg/TM
Altura Inicial de Mineral	0.85	m	Hora de Inicio de la Prueba	17/11/2020 12:42	
Altura Final de Mineral	0.84	m	Hora de Inicio de Drenado	17/11/2020 18:05	
Densidad Bulk Inicial Seca	2,009	Kg/m ³	Tiempo de Drenado	5.39	h
Velocidad de Percolación	3.78	m/día	Volumen Retenido	0.17	L
Agua en Mineral	0.03	L	% Humedad de Saturación	5.58	%
% Compactación	1.18	%	tiempo	11	día

Nota: Elaboración propio

Figura 61

Porcentaje de extracción (%) vs Tiempo de lixiviación prueba N°11



Nota: Elaboración propio

Tabla 45

Resultados de la columna N°11

Fecha	Dia	Solucion de Riego					Solucion Pregnant						Extraccion Au							
		Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+KBr	Volumen (L)	Volumen Acumulado (L)	Ratio Liquido / Solido	pH	HBr+	Ley	Diario (mg)	Acumulado (mg)	Acumulado (g/TM)	% Diario	% Acumulado	Extraccion Au (Cabeza Calculada)	Extraccion Au (Cabeza Analizada)	
						Adicion (ml)					KBr (g/L)									Au
17/nov	0	4,00	4,00	1,16	1,52	139,02														
18/nov	1	4,00	8,00	2,32	1,50	61,08	1,76	1,76	0,50	1,60	13,8	0,396	0,69	0,69	0,20	19,26	19,26	14,58	14,68	
19/nov	2	4,00	12,00	3,48	1,31	49,42	1,42	3,18	0,90	1,35	14,3	0,348	0,49	1,19	0,34	13,69	32,95	24,95	25,12	
20/nov	3	4,00	16,00	4,64	1,42	62,65	1,80	4,98	1,42	1,58	14,2	0,261	0,47	1,66	0,47	13,02	45,97	34,81	35,05	
21/nov	4	4,00	20,00	5,80	1,18	56,38	1,62	6,60	1,88	1,61	15,1	0,251	0,41	2,07	0,58	11,27	57,24	43,34	43,64	
22/nov	5	4,00	24,00	6,96	1,22	62,65	1,80	8,40	2,39	1,65	15,3	0,216	0,39	2,45	0,69	10,77	68,01	51,49	51,86	
23/nov	6	4,00	28,00	8,12	1,42	35,97	1,03	1,95	9,43	2,69	1,50	14,7	0,195	0,38	2,83	0,80	10,54	78,55	59,47	59,89
24/nov	7	4,00	32,00	9,28	1,42	31,90	0,92		10,35	2,95	1,95	13,8								
25/nov	8	4,00	36,00	10,44	1,20	57,18	1,64	3,10	11,99	3,42	1,70	12,3	0,166	0,51	3,35	0,95	14,26	92,81	70,27	70,76
26/nov	9	4,00			1,31	50,71	1,46		13,45	3,83	1,58	13,4								
27/nov	10	4,00			1,42	52,57	1,51	2,85	14,96	4,26	1,61	13,9	0,091	0,26	3,61	1,02	7,19	100,00	75,71	77,55
28/nov	11	4,00			1,18	46,62	1,34		16,30	4,64	1,65	15,2								

Ley de Cabeza	Cont. Met. (mg.)	Ley de Colas	Cont. Met. (mg.)	Flujo	0,031	L/h	
Au (g/TM)	1,349	4,71	Au (g/TM) 0,330		1,15	0,511	ml/min
						0,735	L/día

RESUMEN DE EXTRACCIONES		
% Extraccion Au (Cabeza Calculada)	% Extraccion Au (Cabeza Analizada)	% Extraccion Au (Cabeza rípios)
75,71	77,55	75,54

Nota: Elaboración propio

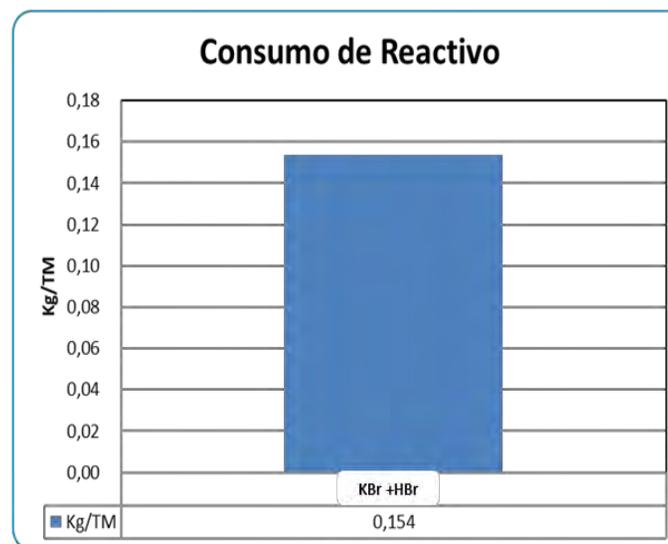
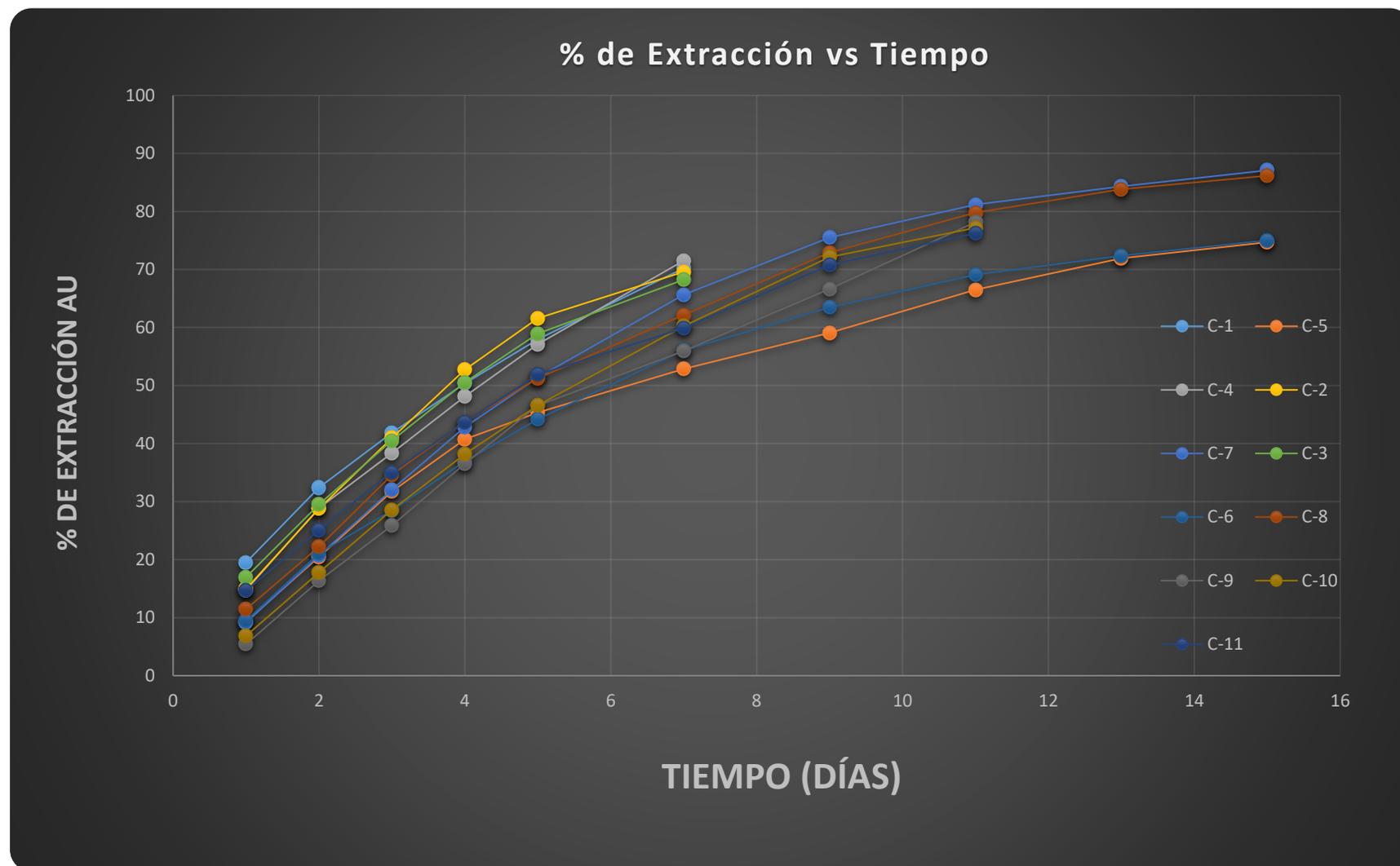


Figura 62

Resumen de las curvaturas de cinética de extracción del oro



Nota: Elaboración propio

Tabla 46*Tabla de resumen de las pruebas experimentales*

Columnas	Resumen	
	(%) de	Consumo
	Extracción	Total de
	Au	HBr+KBr
		(Kg/TM)
C-1	70.22	0.050
C-2	69.60	0.028
C-3	68.24	0.102
C-4	71.52	0.094
C-5	74.70	0.059
C-6	75.02	0.082
C-7	87.09	0.132
C-8	86.16	0.136
C-9	78.16	0.094
C-10	77.18	0.077
C-11	77.55	0.154

Nota: Elaboración propio

Se puede apreciar en la tabla 46 el resumen de las pruebas de lixiviación en columna, en la prueba C-7 se obtuvo la mayor % de extracción de oro con 87.09% de cabeza calculada y obteniendo un consumo total de reactivo lixivante de 0.132 Kg/TM. En la prueba C-3 se obtuvo un % de extracción mínima de 68.87 % de oro con un consumo de agente lixivante de 0.102 Kg/TM.

CAPITULO VI

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 Diseño factorial 2^3 con puntos centrales con Minitab.

El objetivo de este diseño factorial es conocer el efecto de los tres factores en dos niveles cada uno sobre las respuestas de calidad, es decir, lo que se busca es estudiar la relación de factores y la respuesta, las pruebas del proceso de lixiviación en columnas nos permitirá recolectar la información referente a las bondades metalúrgicas del mineral llegue a poseer. Para los cálculos de diseño factorial se efectuaron ocho corridas de este diseño 2^3 con puntos centrales en total se realizó 11 pruebas metalúrgicas (8 combinadas y 3 puntos centrales). A continuación, en la tabla 47 se muestra las variables evaluados en el proceso, indicando sus mínimos y máximo.

Tabla 47

Niveles de Variables

	Variables	Nivel inferior (-)	Nivel intermedio (0)	Nivel superior (+)
A	Tamaño de partícula (")	0.25	0.5	0.75
B	Concentración de reactivo (g/L)	10	15	20
C	Tiempo (días)	7	11	15

Nota: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 48 se muestra la planificación del diseño experimental (con una sola prueba en los extremos y tres pruebas central). La matriz en escala codificada comprende las columnas (X_1 , X_2 y X_3), que corresponden a los 3 factores en estudio expresadas en escala natural (**A**, **B** y **C**). Se observa también, que han sido dispuestas en el orden estándar, cada columna empieza por el signo -, y se alternan los signos - y +. Naturalmente, la respuesta del diseño está condicionada por los objetivos del experimento de recuperar oro mediante lixiviación y con los datos del experimento final se llena la columna % de recuperación.

Tabla 48*VARIABLES EN ESCALA NATURAL Y CODIFICADA CON REPLICAS EN EL CENTRO*

Columnas	Escala codifica			Escala natural			Respuesta (Y)
	X1	X2	X3	A	B	C	
C-1	-1	-1	-1	0.25	10	7	70.22
C-2	1	-1	-1	0.75	10	7	69.6
C-3	-1	1	-1	0.25	20	7	68.24
C-4	1	1	-1	0.75	20	7	71.4
C-5	-1	-1	1	0.25	10	15	74.7
C-6	1	-1	1	0.75	10	15	75.02
C-7	-1	1	1	0.25	20	15	87.09
C-8	1	1	1	0.75	20	15	86.16
C-9	0	0	0	0.5	15	11	78.16
C-10	0	0	0	0.5	15	11	77.18
C-11	0	0	0	0.5	15	11	77.55

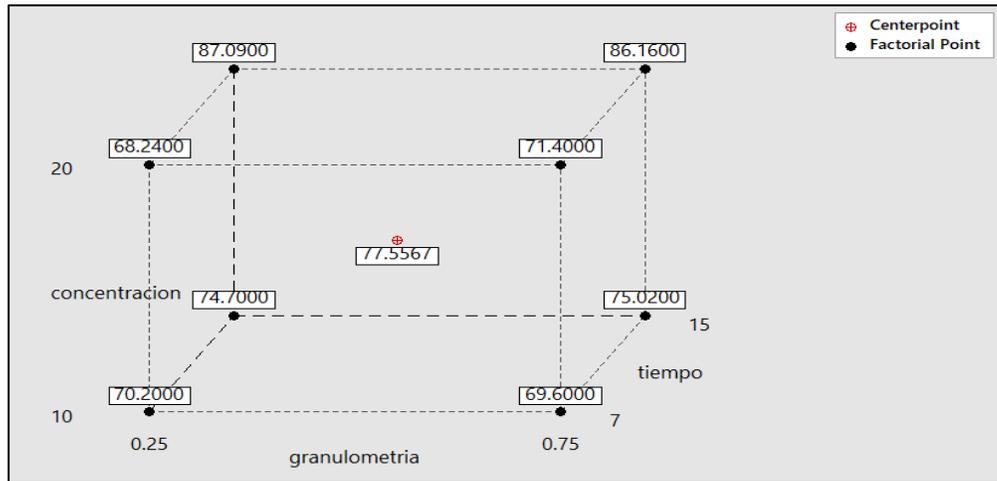
Nota: Elaboración propia

6.1.1. Representación geométrica de las combinaciones

La región experimental ahora es un cubo regular cuyos vértices son los ocho tratamientos, este modelo nos ha permitido estudiar siete efectos, que son las siguientes: tres principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC, en general, se puso interés en estudiar los efectos principales y las interacciones dobles, observando que, es preferible asegurarse que la interacción ABC mantiene un valor mínimo. Se analizó la influencia de los factores controlables sobre la variable respuesta, en la parte experimental se aleatorizó las pruebas experimentales con la finalidad de eliminar el efecto de otros factores al proceso de lixiviación del oro. La figura 63, constituye un modelo que ha permitido analizarlos efectos e implicancias de factores controlables de influencia en la variable respuesta mediante el diseño factorial 2^3 con puntos centrales se estudió el efecto de tres factores en dos niveles cada uno.

Figura 63

Representación geométrica de las variables en 2³ puntos centrales



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

6.2 Cálculo de efectos

Para saber cuantitativamente cuanto afecta las variables sobre la respuesta o criterio de optimización de un proceso, se determinó el cálculo de los efectos las cuales se definen como la diferencia entre los valores de las respuestas. Que se detallan en la siguiente tabla 49:

Tabla 49

Efectos estimados para la extracción del oro (unidades codificadas)

Termino	Efectos
Promedio	
A: Tamaño de partícula	0.482
B: Concentración de lixivante	5.838
C: Tiempo	10.878
A*B	0.633
A*C	-0.788
B*C	5.927
A*B*C	-1.258

Nota: Elaboración propia

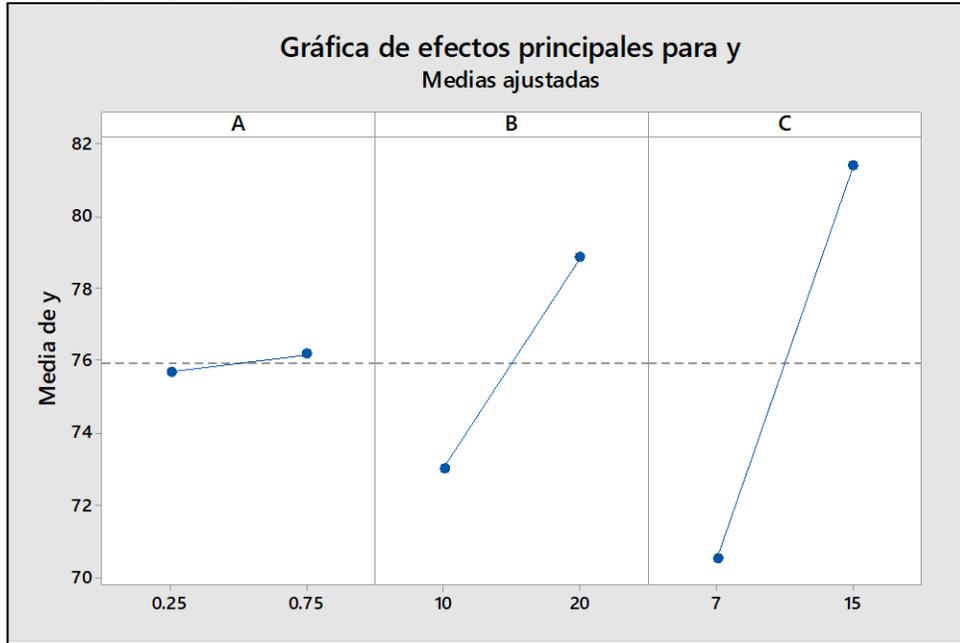
La interpretación de los efectos fue la siguiente:

- ✓ El efecto de tamaño de partícula es de 0.482, es decir el tamaño de partícula entre más menor sea aumenta el porcentaje de extracción del oro, por tanto, es un factor que influye en el proceso de lixiviación.
- ✓ El efecto de la concentración del lixivante es 5.838, es decir cuando pasa de 10 a 20 la concentración, aumenta el porcentaje de extracción del oro, por tanto, es un factor que influye en este proceso.
- ✓ El efecto en el tiempo es de 10.878, es un factor influyente dentro del proceso cuanto más tiempo pase se extraerá más oro.
- ✓ En la interacción entre tamaño de partícula y concentración fue de 0.633 se puede decir que la interacción no es muy significativa.
- ✓ El efecto de interacción entre tamaño de partícula y el tiempo resulta que la extracción permanecerá constante
- ✓ El efecto entre la interacción de concentración y tiempo es de 5.92 esto indica que entre mayor consumo de concentración en el tiempo se obtendrá mayor recuperación de oro.

Como se puede observar en la siguiente figura 64, el efecto de tamaño de partícula es menor con respecto a las otras variables. Mientras tanto en la concentración del lixivante y el tiempo son la variable con mayor influencia estadísticamente.

Figura 64

Efectos principales para la extracción de oro



Nota: Elaboración propia (software Minitab)

6.3 Análisis de varianza

Para determinar el significado real de los efectos de las variables tomadas en consideración, el análisis de varianza se aplica para evaluar la significancia de los efectos en el diseño experimental, mediante este análisis se verifica cuál de las siguientes variables ya indicadas son realmente importantes en esta investigación. El mecanismo correcto de medir los efectos de las variables en estudio y de interacciones se realiza mediante el teorema de Cochran. Si se cumple la relación definida en dicha ecuación o también cuando $p\text{-valor} < 0.05$, los valores se muestran en la tabla 50.

Tabla 50*Análisis de la varianza para extracción*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	7	380.732	54.390	13.27	0.029
Lineal	3	305.258	101.753	24.82	0.013
A	1	0.466	0.466	0.11	0.758
B	1	68.153	68.153	16.63	0.027
C	1	236.640	236.640	57.73	0.005
Interacciones de 2 términos	3	72.311	24.104	5.88	0.090
A*B	1	0.800	0.800	0.20	0.689
A*C	1	1.240	1.240	0.30	0.621
B*C	1	70.271	70.271	17.14	0.026
Interacciones de 3 términos	1	3.163	3.163	0.77	0.444
A*B*C	1	3.163	3.163	0.77	0.444
Error	3	12.297	4.099		
Curvatura	1	11.807	11.807	48.21	0.020
Error puro	2	0.490	0.245		
Total	10	393.029			

Nota: Elaboración propia (uso de software Minitab)

R-Cuadrada=98.95%

R-Cuadrada(ajustada)=94.75% el 94 % de la variabilidad es explicada por el modelo propuesto.

Error estándar = 1.44237

En la tabla 50, se observa la tabla ANOVA donde la variabilidad de recuperación de oro, se prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadro medio contra un estimado

de error experimental en este caso, 3 efectos tienen un valor-p menor que 0.05, indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

Después de la prueba de significancia estadística de cada efecto comparado la media al cuadrado contra una estimación del error experimental los efectos de la concentración del lixivante (B) y el tiempo(C) y la interacción de (B*C) tienen los p-valores inferiores a 0.05 indicando que son significativos al 95% de nivel de confianza.

El estadístico R-cuadrado indica que su modelo así ajustado explica el 98.95% de la variabilidad del porcentaje de extracción de oro, el estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes es 94.75% de variabilidad al modelo propuesto y por tanto la estimación en el error estándar muestra una desviación normal del modelo a un 1.44237.

6.4 Modelo matemático

Una vez determinado los efectos y teniendo en cuenta el análisis de varianza se pasa a obtener un modelo matemático lineal siendo una representación lógica y cualitativa al proceso de lixiviación en la extracción del oro donde la interrelación de las variables con el sistema factorial con el fin de predecir el fenómeno en cuestión. Para obtener el modelo matemático lineal, de la siguiente manera forma:

Para ello determinaremos el coeficiente de regresión usando la siguiente ecuación:

$$[B] = ([X^T] * [X])^{-1}([X^T] * [Y]) \quad (\text{Ec6.1})$$

A continuación, se muestran la determinación de los coeficientes estimados en el modelo matemático ver tabla 51 al 54.

Tabla 51

Matriz de diseño y traspuesto de matriz

[X]								[X ^T]							
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1

Nota: Elaboración propia

Tabla 52

Producto de las matrices [X^T][X] [X^T][X] -I

[X ^T][X]								[X ^T][X] -I							
8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0	0	0	0	0	0	0
0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0	0	0	0	0	0
0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0	0	0	0	0
0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0	0	0	0
0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0	0
0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125	0
0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0.125

Nota: Elaboración propia

Tabla 53

Productos de las matrices [X] -I[X^T] *Y*

Y(respuesta)	[X ^T] *Y	B=[X ^T][X] -I*[X ^T] *Y
70.2	602.41	75.301
69.6	1.95	0.244
68.24	23.37	2.921
71.4	43.53	5.441
74.7	2.51	0.314
75.02	-1.95	-0.396
87.09	23.69	2.961
86.16	-5.01	-0.626

Nota: Elaboración propio

Tabla 54*Coefficiente de estimación para Y(respuesta)*

Término	Escala codificada	Escala natural
constante	75.301	85.6
A	0.244	19.1
B	2.921	1.859
C	5.441	1.602
A*B	0.314	1.63
A*C	-0.396	1.48
B*C	2.961	0.2107
A*B*C	-0.626	0.125

Nota: Elaboración propia

Ecuación del modelo matemático a escala codificada:

$$Y = 75.304 + 0.241 A + 2.919 B + 5.439 C + 0.316 A*B - 0.394 A*C + 2.964 B*C - 0.629 A*B*C$$

Ecuación del modelo matemático a escala natural:

$$Y = 86.3 - 19.2 A - 1.864 B - 1.61 C + 1.64 A*B + 1.49 A*C + 0.2111 B*C - 0.126 A*B*C$$

6.5 Análisis de residuos

El modelo matemático debe predecir adecuadamente el fenómeno investigado, entonces el análisis de residuos se efectuará para saber cuan distanciados se encuentran los valores que se predicen con el modelo de los valores experimentales se calcula de la siguiente forma, ver tabla 55 al 57.

Tabla 55

Análisis de residuos

N°	Y Observado	Y Estimado	Y Obs-Y est	(Y Obs-Y est) ²
1	70.22	70.852	0.631	0.39879
2	69.60	70.257	0.656	0.43099
3	68.24	68.888	0.648	0.41990
4	71.40	72.068	0.668	0.44622
5	74.70	75.368	0.667	0.44556
6	75.02	75.693	0.672	0.45226
7	87.09	87.760	0.670	0.44890
8	86.16	86.860	0.700	0.49000

Nota: Elaboración propio

Tabla 56

Maximización el porcentaje de extracción de Au

N°	A	B	C	A*B	A*C	B*C	A*B*C	Y	Y
								Observado	Estimado
1	0.25	10	7	2.5	1.75	70	17.5	70.22	70.852
2	0.75	10	7	7.5	5.25	70	52.5	69.60	70.257
3	0.25	20	7	5	1.75	140	35	68.24	68.888
4	0.75	20	7	15	5.25	140	105	71.40	72.068
5	0.25	10	15	2.5	3.75	150	37.5	74.70	75.368
6	0.75	10	15	7.5	11.25	150	112.5	75.02	75.693
7	0.25	20	15	5	3.75	300	75	87.09	87.760
8	0.75	20	15	15	11.25	300	225	86.16	86.860
9	0.5	15	11	7.5	5.5	165	82.5	78.16	75.968
10	0.5	15	11	7.5	5.5	165	82.5	77.18	75.968
11	0.5	15	11	7.5	5.5	165	82.5	77.55	75.968

Nota: Elaboración propia

La maximización de extracción del Au fue de Valor optimo: 87.760%

Tabla 57

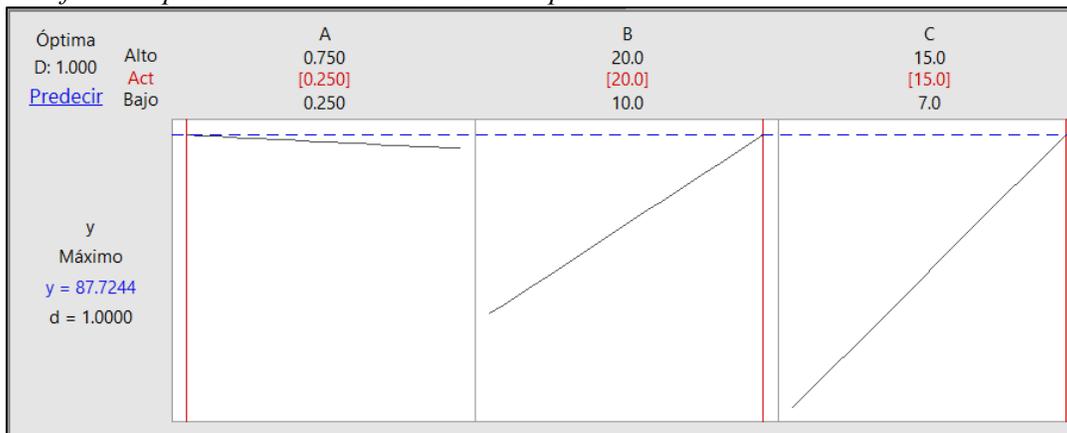
Factores óptimos para la extracción de Au.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tamaño de partícula	0.25	0.75	0.25
Concentración lixivante	10	20	20
Tiempo	7	15	15

Nota: Elaboración propia (software Minitab)

Figura 65

Grafica de optimización de las tres variables para el modelo



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Se observa la figura 65, la combinación de los niveles de los factores la cual maximiza la extracción del oro sobre la región indicada pues de acuerdo a lo establecido esta optimización se puede obtener cuando el tamaño de partícula (A) sea menor a un 0.25 o 1/4 pulgadas, una concentración de lixivante (B) a 20 g/L y un tiempo (C) de 15 días.

6.6 Análisis de correlaciones múltiple.

En este caso tenemos tres variables cuantitativas una de ellas es dependiente y se desea medir el grado de asociación respecto a la variable dependiente entonces, se realizará el coeficiente de determinación, en este coeficiente mide la asociación en este caso plana y al ser una prueba

paramétrica requiere para su uso que ambas variables tengan distribuciones normales analizando el ANOVA a una estandarización mejor para el diseño experimental, la ecuación se reduce a:

$$Y_c = B_0 + B_1 * B + B_2 * C + B_3 * B * C$$

Para obtener los coeficientes de la ecuación anterior utilizaremos los siguientes datos de entrada en la tabla 58:

Tabla 58

Ajuste para la validación del modelo de regresión

B	C	B*C	Y(respuesta)
10	7	70	70.22
10	7	70	69.6
20	7	140	68.24
20	7	140	71.4
10	15	150	74.7
10	15	150	75.02
20	15	300	87.09
20	15	300	86.16
15	11	165	78.16
15	11	165	77.18
15	11	165	77.55

Nota: Elaboración propia

Con los datos obtenidos se obtuvo el siguiente resultado por el método de correlación y regresión:

$$y = 76.68 - 1.046 B - 0.863 C + 0.1482 B * C$$

En la tabla 59 se muestra el valor óptimo de extracción del Au del 87.27%, cuando la concentración del lixivante es de 20 g/L y un tiempo de 15 días.

Tabla 59*Valor óptimo de extracción del Au*

B	C	B*C	Y(respuesta)	Y estimado
				BC
10	7	70	70.22	70.553
10	7	70	69.6	70.553
20	7	140	68.24	70.467
20	7	140	71.4	70.467
10	15	150	74.7	75.505
10	15	150	75.02	75.505
20	15	300	87.09	87.275
20	15	300	86.16	87.275
15	11	165	78.16	75.95
15	11	165	77.18	75.95
15	11	165	77.55	75.95

Nota: Elaboración propia

Esta última ecuación pronosticada se valida mediante la tabla 60.

Tabla 60*Análisis de varianza para la regresión de las variables B y C*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	375.063	125.021	48.71	0.000
Lineal	2	304.793	152.396	59.38	0.000
B	1	68.153	68.153	26.56	0.001
C	1	236.640	236.640	92.20	0.000
Interacciones de 2 términos	1	70.271	70.271	27.38	0.001
B*C	1	70.271	70.271	27.38	0.001
Error	7	17.965	2.566		
Curvatura	1	11.807	11.807	11.50	0.015
Falta de ajuste	4	5.669	1.417	5.79	0.153
Error puro	2	0.490	0.245		
Total	10	393.029			

Nota: Elaboración propia (software Minitab)

R- cuadrada =95.43%

R-cuadrada (ajustado para g.l) = 93.47%

Error estándar del est=1.60202

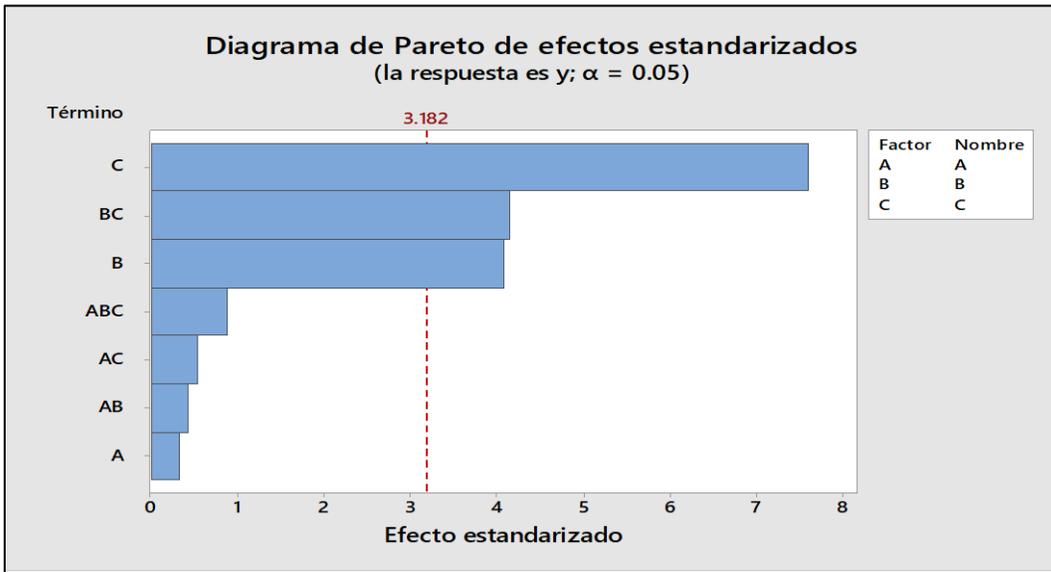
Se puede detallar que para las pruebas experimentales el R-cuadrada es 93.47% de la variabilidad de la concentración de oro es explicada por su relación de concentración de reactivo y el tiempo de lixiviación. Entonces se podría usar la ecuación de correlación estimada para poder predecir la extracción de oro puesto que el modelo es válido por el análisis de varianza.

6.7 Análisis de reportes gráficos

El empleo de reportes gráficos estadísticos nos permite observar de una manera más clara y simple el análisis de los efectos de cada factor, para generar dichos gráficos se utilizó Minitab. El gráfico más sencillo que nos mostró el efecto es el de Pareto estandarizado, se muestra a continuación en la figura 66, donde se observa que las variables B (Concentración de lixivante) y variable C (tiempo) son influyentes dentro del modelo siendo significativas, mientras la variable A (tamaño de partícula) y la interacción con ella dentro del modelo no son significativas, además las interacciones de las tres variables no son significativas para el modelo.

Figura 66

Diagrama de Pareto estandarizado para la extracción del oro

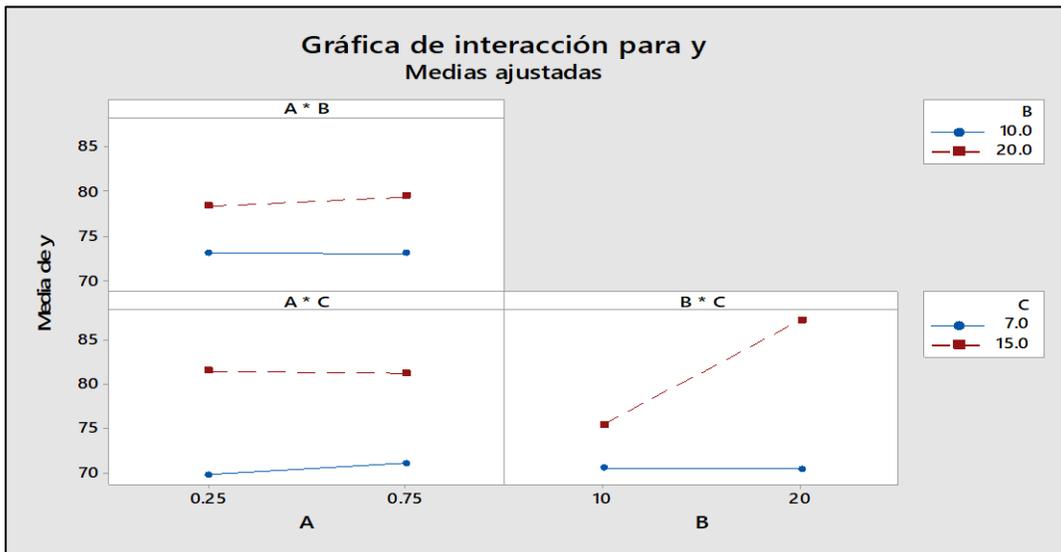


Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Otro gráfico que se muestra a continuación es la interacción de las variables dentro del modelo.

Figura 67

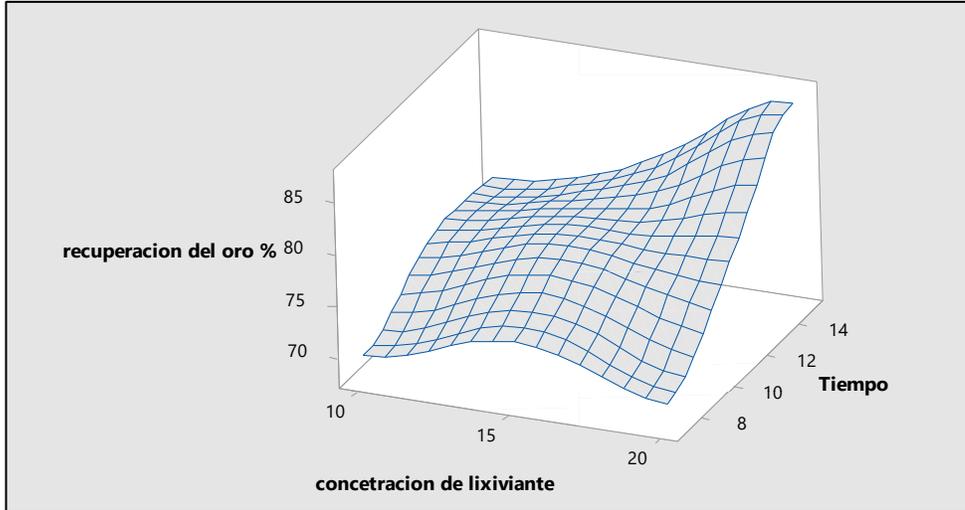
Gráfica de interacciones para el porcentaje de extracción del oro



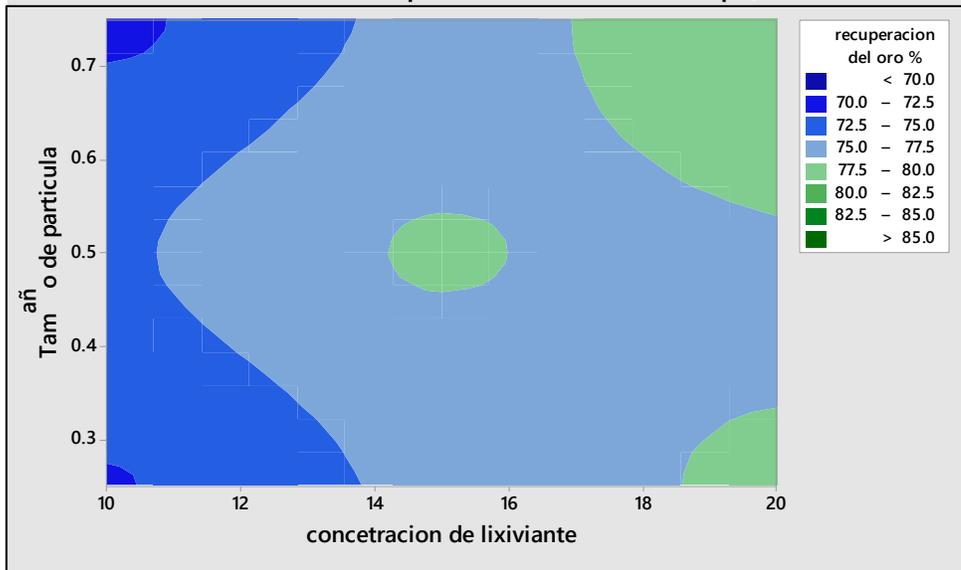
Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Se puede observar que la figura 67, la interacción entre la variable B (concentración de lixiviante) y la variable C (tiempo) tienen a ser mayor influencia estadísticamente para obtener un efecto máximo.

Gráfica de superficie de recuperación del vs. Tiempo; concentración de

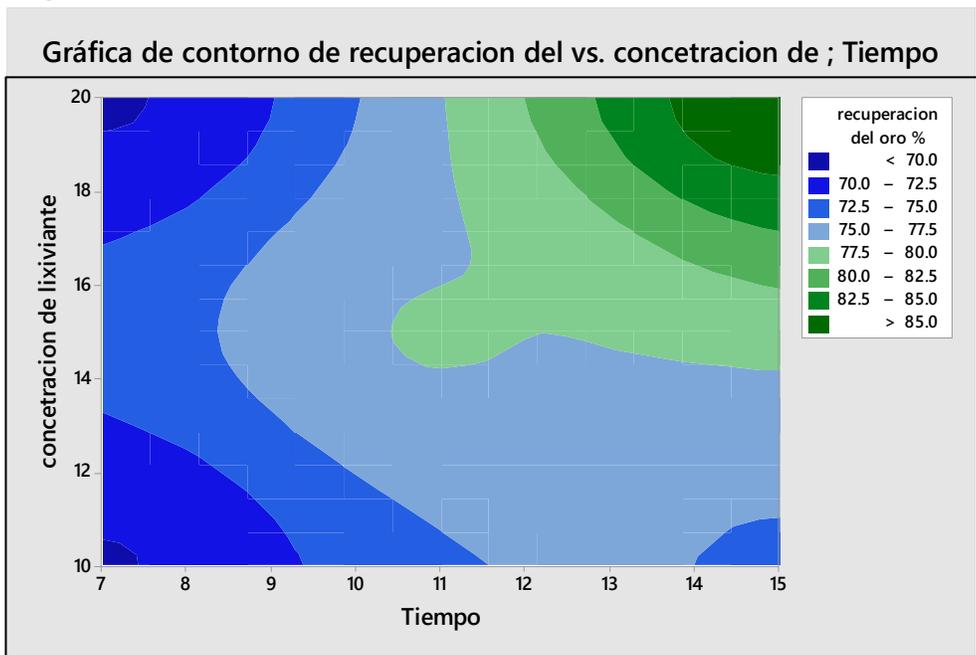


Gráfica de contorno de recuperación vs. Tamaño de pa; concentración



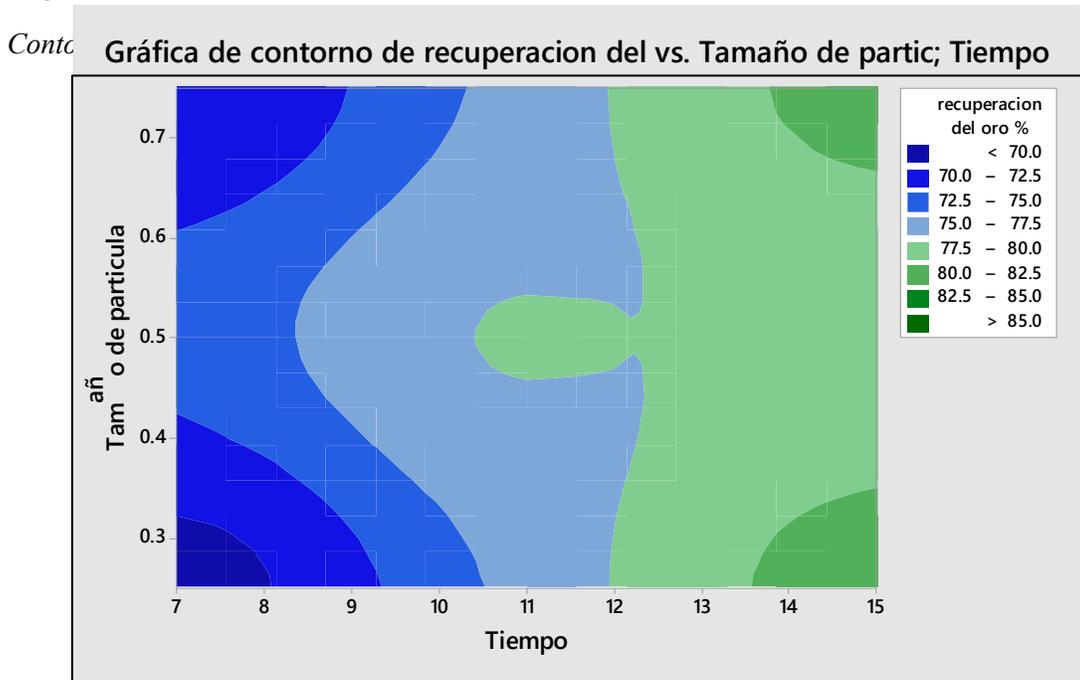
Nota : Elaboración propia (software Minitab)

Figura 70



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

Figura 71



Nota: Elaboración propia (Software Minitab)

6.8 Discusión De Resultados

1. El resultado obtenido mediante el análisis químico del mineral aurífero, nos dio como resultado de 1.349 g/TM de ley representativa, esto indica que existe una excelente cantidad de oro para lixiviar.
2. Logramos revisar el informe de laboratorio metalúrgico de la unidad minera Utunsa, realizada en el año 2018 sobre el análisis mineralógico del mineral aurífero sílice masiva 1(SM-1), en resumen, se encontro las siguientes especies mineralógicas como: Cuarzo, Alunita, Rutilio, Jarosita y Bismutinita por difracción de rayos x. En la prueba de microscopia electrónica se pudo encontrar el orden de predominancia de los minerales analizados fue: Oro nativo > Baritina > Cuarzo, por tanto, el contenido de oro en el mineral se presenta principalmente como oro nativo, el cual se encuentra totalmente ocluido en la ganga no metálica, con un tamaño granulométrico promedio de 1-2 [μm]. concluyendo que el oro nativo (Au) se encuentra libre y también como inclusión en cuarzo.
3. En la unidad minera Utunsa se realizó una prueba preliminar prueba flash con los reactivos bromuro de potasio (KBr), acido bromhídrico (HBr) y agua oxigenada (H_2O_2) obteniendo un resultado óptimo de 78.72% de extracción de oro.
4. Conociendo los resultados de la prueba flash se realizó una prueba en botellas, obteniendo información sobre el consumo de la concentración y cinética de lixiviación, donde la extracción del oro fue de (extracción Ensayada) 71.64% y (Extracción Calculada) 70.86%, para una concentración de 10 g/L y un tiempo de 72 horas.
5. Conociendo las variables del diseño factorial 2^3 puntos centrales, se procedió a realizar 11 pruebas en columnas el % de extracción que se obtuvo en la siguiente tabla:

Tabla A Resumen de % de extracción de pruebas en columnas

Columna	%de Recuperación
C-1	70.22
C-2	69.6
C-3	68.24
C-4	71.4
C-5	74.7
C-6	75.02
C-7	87.09
C-8	86.16
C-9	78.16
C-10	77.18
C-11	77.55

Nota: Elaboración propia

Se obtuvo la mayor % de recuperación en la columna C-7 con 87.09%, donde las variables involucradas fueron, tamaño de partícula (1/4”), concentración 20g/l y un tiempo de 15 días

6. De acuerdo al diseño factorial en su análisis a partir de los resultados se puede deducir sus efectos de las variables mas influyentes con las siguientes observaciones:
 - ✓ El efecto concentración del lixivante es 5.838, al pasar de 10 a 20 de concentración aumenta el porcentaje de extracción del oro. por lo tanto, es un factor que influye en este proceso.
 - ✓ El efecto de tiempo es de 10.878 influye de mayor manera y es un factor influyente dentro del proceso cuanto más tiempo pase se extraerá más oro.
 - ✓ El efecto entre la interacción de concentración y tiempo es de 5.92 esto indica que entre mayor consumo de concentración en el tiempo se obtendrá mayor recuperación de oro.
7. En la tabla ANOVA 50, la variabilidad de recuperación del oro para cada uno de los efectos. En este caso, 3 efectos tienen un valor-p menor que 0.05, indicando que son

significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%. En este caso los efectos de concentración (B), tiempo (C) y la interacción de concentración (B) y tiempo (C).

8. Se obtuvieron los siguientes modelos matemáticos:

1. Ecuación del modelo matemático a escala codificada:

$$Y = 75.304 + 0.241 A + 2.919 B + 5.439 C + 0.316 A * B - 0.394 A * C + 2.964 B * C - 0.629 A * B * C$$

2. Ecuación del modelo matemático a escala natural:

$$Y = 86.3 - 19.2 A - 1.864 B - 1.61 C + 1.64 A * B + 1.49 A * C + 0.2111 B * C - 0.126 A * B * C$$

CONCLUSIONES

1. Se extrae el 87.09% de oro, del mineral aurífero de la Unidad minera Utunsa – Anabí–Haquira- Apurímac, aplicando los reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico en una concentración del 20 g/L, tiempo de lixiviación de 15 días y tamaño de partícula 1/4”.
2. De acuerdo al informe de laboratorio metalúrgico de la unidad minera Utunsa (2018), el análisis mineralógico de sílice masiva 1(SM-1) se concluyó en las siguientes especies mineralógicas presentes como: Cuarzo, Alunita, Rutilio, Jarosita y Bismutinita. estos ensayos fueron realizados por difracción de rayos x. En la prueba de microscopia electrónica se pudo encontrar el orden de predominancia de los minerales analizados fue: Oro nativo > Baritina > Cuarzo. Se aprecia oro nativo (Au) libre y como inclusión en cuarzo, con un tamaño granulométrico promedio de 1-2 [μm].
3. El consumo del agente lixivante (KBr+HBr) en el proceso de lixiviación por columnas C-7 que obtuvo la mayor % de extracción de oro con 87.09% de cabeza ensayada, obteniendo un consumo total de reactivo lixivante de 0.132 Kg/TM.
En la prueba C-3 se obtuvo un % de extracción mínima de 68.87 % de oro con un consumo de agente lixivante de 0.102 Kg/ TM.
4. Las variables más influyentes en el proceso de lixiviación por columnas del mineral aurífero son: concentración del lixivante (KBr + HBr) y el tiempo de lixiviación.

5. El modelo matemático que mejor se ajusta al proceso de lixiviación por columnas del mineral aurífero es:

$$\begin{aligned} \text{Y\% de extracción} &= 86.3 - 19.2 A - 1.864 B - 1.61 C + 1.64 A * B + 1.49 A * C \\ \text{de oro} &+ 0.2111 B * C - 0.126 A * B * C \end{aligned}$$

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la comunidad metalurgista:

1. Estudiar la adición de peróxido del hidrogeno en el curado usando una mayor concentración para darle mayor oxigenación y evaluar el comportamiento sobre la extracción de Au.
2. Realizar más pruebas en botellas y columnas con diferente tamaño de partículas y concentración del lixiviaste (HBr+KBr) debido que es una nueva forma de lixiviación sustentable ambientalmente y económicamente.
3. Realizar las pruebas de recuperación de oro con alfa-ciclodextrina, siendo el proceso posterior a la lixiviación y así conocer más variables para obtener una buena extracción del oro.
4. Realizar las pruebas en columnas bajo estándares establecidos en laboratorios para obtener mayor certeza en los resultados de extracción del oro.
5. Dar mayor interés en investigación en las nuevas tecnologías que sean alternativas al uso del cianuro, debido a un contexto socio-ambiental es muy complicado el desarrollo de minería aurífera con cianuro.
6. Utilizar el modelo matemático obtenido por el software MINITAB para combinar las variables y optimizar el proceso.

BIBLIOGRAFIA

Libros

- ✓ Aylmore, M. (2005). *Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores* (Vol 15). Amsterdam. M.D Adams.
- ✓ Dadgar, A., 1989. Refractory Concentrate Gold Leaching: Cyanide vs Bromine, *Journal of Metals*; Vol. 41, 12, pp 37 - 41.
- ✓ Delahay, Pourbaix, & Rysselberghe, V. (1951). Potential- pH Diagram of Lead and its Applications to the Study of Lead Corrosion and to the Lead Storage Battery. *Journal of the Electrochemical Society*, 98, 57-64
- ✓ Franco Jimenez, J. A. (1991). *Geología - Minería Metalúrgica del oro* (Segunda ed.). Lima: Grafotécnica editores e Impresores S. R. L.
- ✓ Hagelstein, K; Logsdon, M ; y Mudder, T. (2001). *El manejo del cianuro en la extracción de oro* (1ra Ed). Canadá. Consejo Internacional de metales y medio ambiente.
- ✓ Hernández, S. (2014). *Metodología de la investigación*. México.
- ✓ Hiskey, J.B. and Atlury, V.P., 1988. Dissolution Chemistry of Gold and Silver in Different Lixiviants. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Review 4*, pp 95 – 134.
- ✓ Ilyas, S., & Lee, J.-C. (2018). *Gold Metallurgy And The*. Taylor & Francis Group.
- ✓ Marsden, J. O & House, C. I. (2006). *the chemistry of gold extraction* (2da Ed). Colorado – USA. Society for mining, metallurgy and exploration, Inc.

- ✓ Marsden, J. O., & House, C. L. (2009). *The Chemistry Of Gold Extraction* (Segunda Edición Ed.). Littleton, Colorado, USA.
- ✓ McQuinston Jr, F., & Shoemaker, R. (1975). *Gold and Silver Cyanidation Plant Practice*. New York.
- ✓ Misari Chuquipoma, F. S. (2010). *Metalúrgia del oro* (1era Ed). Lima: San Marcos E. I. R. L.
- ✓ Pesic, B. and Sergent, R.H., 1993. Reaction Mechanism of Gold Dissolution with Bromine Metallurgical and Materials Transactions B., Vol. 24B, pp 419 - 424.
- ✓ Quijano, J.A., Salazar, F. X., Pesic, B. and Sergent, R.H., 1993. Recuperación de Oro Usando Bromo. Memorias de la XX Convención de la AIMMGM, en Acapulco, Gro. México, pp 726 - 730.
- ✓ Qi, P.H. and Hiskey, J.B., 1991. Dissolution Kinetics of Gold in Iodide Solutions. Hydrometallurgy, Vol. 27, pp 47 - 62.
- ✓ Trindade, R; Rocha, P y Barbosa, J, (1994). *la disolución de oro en bromuro oxidado soluciones*. Hidrometalurgia.
- ✓ Vargas Gallardo, J. (2015). *Metalúrgia del oro y la plata* (Segunda edición ed.). Lima: San Marcos E. I. R.L.
- ✓ Yañez M. : "Lixiviación de Oro con Soluciones de Bromuro Cúprico y Bromuro de Sodio". Tesis de Ingeniería Química, Universidad de Sonora, 1995.

Textos Virtuales

- ✓ Bernal Alava, G. L. (2018). *Elementos de química básica*. BOGOTA, COLOMBIA : 3 CIENCIAS. Recuperado de: https://issuu.com/3ciencias/docs/quimica_basica

- ✓ *Lenntech Water Treatment Solutions*. (12 de JUNIO de 2020). Obtenido de Lenntech tabla periodica: https://www.lenntech.es/referencias_tabla-_periodica.htm.
- ✓ Torres Escudero, L (11/02/19) *bromuro de potasio (kbr): estructura, propiedades físicas y químicas*, Recuperado de:<https://www.lifeder.com/bromuro-potasio/>.

Otros

- ✓ Harris, D. C. (2007). *Analisis Quimico Cuantitativo* (tercera ed.). barcelona: Editorial Reverte S.A.
- ✓ Instituto Nacional de Seguridad e higiene en el trabajo. (2011). *documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional del bromuro de hidrógeno*. Documentación Límites Exposición Profesional.
- ✓ Melashvili, M; Fleming, C; Dymov, I; Manimaran, M y O'Day, J. (2014). *estudio de lixiviación oro con bromo y bromuro, y la influencia de sulfuro de minerales en esta reacción* (Artículo) Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo.
- ✓ Pettman, R. B., & Arnold, D. F. (17 De Marzo De 2016). *Usa Patente N° Wo 2017/158561 Al*.
- ✓ Ros Moreno, A. (2017). *Recopilación Sobre La Metalurgia Del Oro*. Cartagena, Murcia.
- ✓ Royal Chemical. (2016). *Ficha técnica de reactivo goldmax*. Royal Chemical.
- ✓ Sousa, R; Futuro, A; Fiúza, A; Vila, M y Dinis, M. (2018). *el bromo lixiviación como un método alternativo para la disolución de oro*, (Artículo) en *Minerales Ingeniería*, Polo de la Universidade do Porto, Facultad de Ingeniería, Portugal.

Tesis

- ✓ Chávez C. y Menejes D. (2013), *Evaluación de variables del proceso de cianuración en columna de minerales auríferos de Mollepiña - provincia de Grau – Apurímac. (Investigación tecnológica)*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.

- ✓ C., A. C., B., O. J., & R., M. O. (2007). *Hidrometalurgia Aplicada Linea De Metales Preciosos. Notas De Asignacion*. Universidad Nacional De Colombia Sede Medellin Facultad De Minas Escuela De Ingenieria De Materiales, Medellin, Colombia .

- ✓ Hofmann Vázquez, P. R. (2008). T E S I S Ingeniero De Minas Y Metalurgista. *Aplicación Del Amoniaco Como Lixivante Ecológico De Minerales Auroargentíferos*”. Universidad Nacional Autónoma De Mexico, Facultad De Ingenieria, Mexico D.F, Mexico .

- ✓ Loayza A. y Quispe N. (2013), *Evaluación de variables del proceso de cianuración en columnas en el yacimiento minero Huisamarca, Quiñota – Chumbivilcas. (Investigación Tecnológica)*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.

- ✓ Palma, R. A. (2019). “Lixiviación Cianurada De Minerla De Oro En Columnas A Nivel Planta Piloto . *Tesis De Investigacion*. Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile .

- ✓ Vazquez, P. R. (Marzo De 2008). *Aplicación Del Amoniaco Como Lixivante Ecológico De Minerales Auroargentíferos. Universidad Nacional Autónoma De Mexico*. Mexico D.F.

ANEXOS

Anexo N°1 Ficha Técnica De Bromuro De Hidrogeno



Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas Derecho a Saber

Personal de
Emergencias
Referencia rápida

Nombre común: BROMURO DE HIDRÓGENO

Sinónimos: Ácido hidrobromico anhidro; monobromuro de hidrógeno

Núm. CAS: 10035-10-6

Fórmula molecular: HBr

Núm. Derecho a Saber: 1011

Descripción: Gas incoloro con un olor fuerte e irritante, que se encuentra como gas comprimido licuado o en solución

DATOS SOBRE LOS RIESGOS	
Evaluación 3 - Salud 0 - Incendio 0 - Reactividad Núm. DOT: UN 1048 (anhidro) UN 1788 (solución) Núm. de Guía: 125 (UN 1048) 154 (UN 1788) Categoría de riesgo: 2.3 (gas tóxico)	Lucha contra incendios Utilice un agente extintor adecuado para el tipo de fuego circundante. El bromuro de hidrógeno no arde por sí mismo. NO UTILICE AGUA directamente sobre el bromuro de hidrógeno . Utilice agua para abatir los vapores. AL INCENDIARSE, SE PRODUCEN GASES TÓXICOS. AL INCENDIARSE, LOS RECIPIENTES PUEDEN EXPLOTAR. Utilice agua rociada para mantener fríos los recipientes expuestos al incendio. NO permita que el agua entre en los recipientes.
Reactividad El bromuro de hidrógeno reacciona de forma violenta con BASES FUERTES (tales como HIDRÓXIDO DE SODIO e HIDRÓXIDO DE POTASIO); AMINAS; OZONO; AGENTES OXIDANTES (tales como PERCLORATOS, PERÓXIDOS, PERMANGANATOS, CLORATOS, NITRATOS, CLORO, BROMO y FLÚOR) y muchos COMPUESTOS ORGÁNICOS, causando incendios y explosiones. El bromuro de hidrógeno reacciona con METALES (tales como COBRE, LATÓN y CINC) para liberar <i>hidrógeno</i> gaseoso, que es inflamable y explosivo.	
FUGAS Y DERRAMES Distancias de aislamiento: Derrame pequeño: 30 metros (100 pies) Derrame grande: 300 metros (1000 pies) Incendio: 800 metros (0.5 millas) Cubra el derrame de líquido con cal seca, arena o cenizas de sosa y deposítelo en recipientes herméticos para su eliminación. NO elimine al alcantarillado los derrames por lavado. Detenga el flujo de gas. Si la fuga proviene de un cilindro y no puede detenerse en el lugar, retire el cilindro hasta un lugar sin riesgo al aire libre y repare la fuga o espere a que el cilindro quede vacío. Gire hacia arriba el cilindro que tiene la fuga para prevenir el escape del gas en forma líquida. Neutralice los derrames de agua con cal, cenizas de sosa o bicarbonato de sodio. El bromuro de hidrógeno es tóxico para la vida acuática.	PROPIEDADES FÍSICAS Umbral de olor: 2 ppm Punto de inflamación: No inflamable Presión de vapor: >760 mm Hg a 68 °F (20 °C) Densidad relativa: 3.5 (gas), 2.7 (solución) Solubilidad en agua: Soluble Punto de ebullición: -88.2 °F (-66.8 °C) (gas), 165 °F (74 °C) (solución) Punto de congelación: -121 °F (-85 °C) (gas) Temperatura crítica: 193.6 °F (89.8 °C) (gas) Potencial de ionización: 11.62 eV Peso molecular: 80.92
LÍMITES DE EXPOSICIÓN OSHA: 3 ppm, TWA 8 h NIOSH: 3 ppm, límite superior ACGIH: 2 ppm, límite superior IDLH: 30 ppm Los valores PAC son: PAC-1 = 3.3 ppm PAC-2 = 72.8 ppm PAC-3 = 397 ppm	EQUIPO DE PROTECCIÓN Gautes: Neopreno, Viton y Barrier® (penetración >8 h para uso con ácidos inorgánicos) Overol (mono): Tychem® BR, Responder® y TK® (penetración >8 h) Respiratoria: Autónomo
EFFECTOS SOBRE LA SALUD Ojos: Graves irritaciones, quemaduras y la posibilidad de daño ocular Piel: Graves irritaciones y quemaduras El contacto con el <i>líquido</i> podría causar congelación. Inhalación: Irritación de la nariz, la garganta y el pulmón, con tos e intensa falta de aire (edema pulmonar) Dolor de cabeza, náusea y vómitos	PRIMEROS AUXILIOS Y DESCONTAMINACIÓN Retire a la víctima del lugar de exposición. Enjuague los ojos con abundante agua por al menos 30 minutos. Retire las lentes de contacto, si las usa. Busque de inmediato atención médica. Quite rápidamente la ropa contaminada y lave la piel contaminada con abundante agua. Busque de inmediato atención médica. En caso de contacto con el bromuro de hidrógeno licuado sumerja la parte afectada en agua tibia. Inicie la respiración artificial si se ha detenido respiración y, en caso necesario, la reanimación cardiopulmonar. Traslade sin demora a la víctima a un centro de atención médica. Se recomienda observación médica, ya que los síntomas pueden tardar en aparecer.

Anexo N°2 Ficha Técnica De Bromuro De Potasio

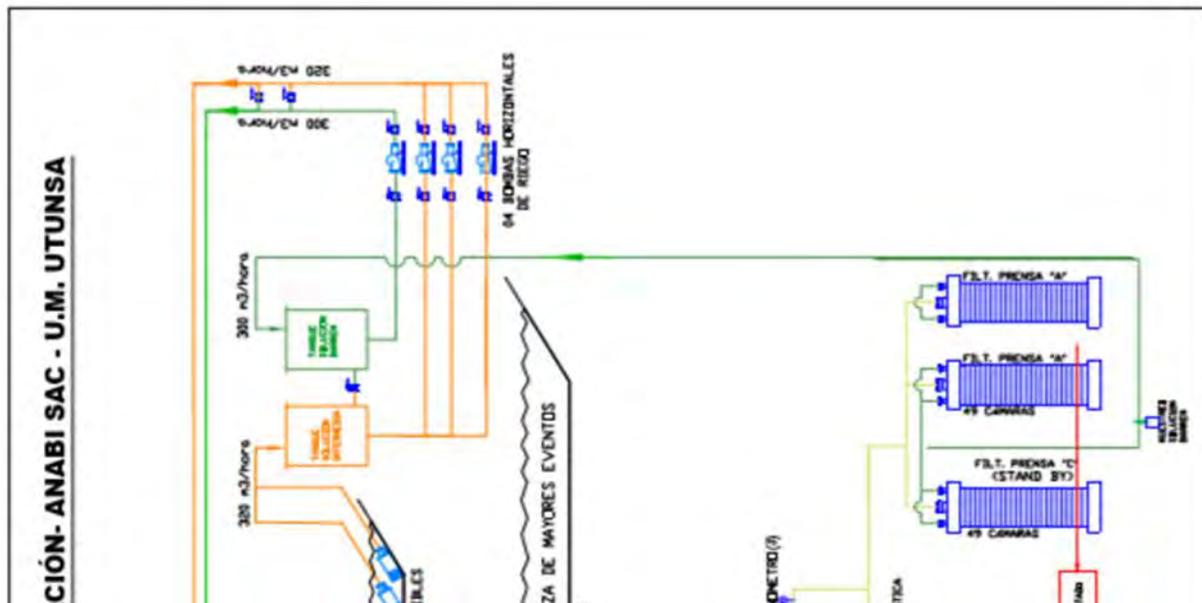
HOJAS DE DATOS DE SEGURIDAD BROMURO DE POTASIO(KBr)

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante:	
1) Nombre de la sustancia química peligrosa o mezcla.	Bromuro de Potasio
2) Otros medios de identificación.	Mono bromuro de potasio
3) Uso recomendado de la sustancia química peligrosa o mezcla, y restricciones de uso.	Su mayor utilidad es en la industria fotográfica Es utilizado como anticonvulsivo en veterinaria Como aderezo en vegetales.
4) Datos del proveedor o fabricante.	
5) Número de teléfono en caso de emergencia.	01 722 212 0565
SECCIÓN 2. Identificación de los peligros:	
1) Clasificación de la sustancia química peligrosa o mezcla	H319 LESIONES OCULARES GRAVES O IRRITACIÓN OCULAR - Categoría 2
2) Elementos de la señalización, incluidos los consejos de prudencia y pictogramas de precaución.	 Indicación
3) Otros peligros que no contribuyen en la clasificación.	Los bromuros se absorben fácilmente en el tubo digestivo. Reemplazan al ión cloruro en los líquidos extracelulares. La semivida es de unos 12 días. Pueden detectarse en la leche materna y en el feto.
SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes:	
1) Para sustancias	
i. Identidad química de la sustancia;	Hidrocarburos
ii. Nombre común, sinónimos de la sustancia química peligrosa o mezcla;	Sal de Bromuro de Potasio
iii. Al menos el Número CAS, y número ONU, entre otros,	CAS No: 7758-02-3 Número CE: 231-830-3
iv. Impurezas y aditivos estabilizadores que estén a su vez clasificados y que contribuyan a la clasificación de la sustancia,	Estabilizador no específico
SECCIÓN 4. Primeros auxilios:	
1) Descripción de los primeros auxilios	CONTACTO OCULAR: Lave los ojos inmediatamente con abundante agua, por lo menos 15 minutos, elevando los párpados superior e inferior ocasionalmente. Busque atención médica inmediatamente CONTACTO DÉRMICO: Lave la piel inmediatamente con agua abundante por lo menos 15 minutos. Quítese la ropa y zapatos

	<p>Contaminados. Lave la ropa antes de usarla nuevamente. Limpie los zapatos completamente antes de usarlos de nuevo. Busque atención médica si se presenta irritación</p> <p>INHALACION: Coloque la persona al aire fresco. Busque atención médica en caso de cualquier dificultad respiratoria</p> <p>INGESTIÓN: Induzca el vómito inmediatamente como lo indica el personal médico. Nunca administre nada por la boca a una persona</p> <p>Inconsciente. Consiga atención médica.</p>
2) Síntomas y efectos más importantes, agudos y crónicos,	Efectos irritantes, tos, insuficiencia respiratoria, vómitos, convulsiones, cansancio, ataxia (alteraciones de la coordinación motriz), confusión, coma.
SECCIÓN 5. Medidas contra incendios:	
1) Medios de extinción apropiados	Usar medios de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores. Medios de extinción no apropiados. No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.
2) Peligros específicos de las sustancias químicas peligrosas o mezclas,	No combustible. Posibilidad de formación de vapores peligrosos por incendio en el entorno. El fuego puede provocar emanaciones de: bromuro de hidrógeno.
3) Medidas especiales que deberán seguir los grupos de combate contra incendio	Permanencia en el área de riesgo sólo con sistemas de respiración artificial e independiente del ambiente. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada. Otros datos Reprimir los gases/vapores/neblinas con agua pulverizada. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.
SECCIÓN 6. Medidas que deben tomarse en caso de derrame accidental o fuga accidental:	
1) Precauciones personales, equipos de protección y procedimientos de emergencia	Utilizar equipo de protección individual. Evitar la formación de polvo, evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Asegúrese de una ventilación
2) Precauciones relativas al medio ambiente	Para la protección del <u>medio ambiente</u> debe evitarse que el producto penetre en cauces de agua y en el sistema de <u>alcantarillado</u>
3) Métodos y materiales para la contención y limpieza de derrames o fugas.	Evitar respirar el polvo. No dejar el producto en un sistema de alcantarillado. Recoger y reparar eliminación sin originar polvo. Limpiar y traspalar. Guardar en contenedores cerrados para su eliminación.
SECCIÓN 7. Manejo y almacenamiento:	
1) Precauciones que se deben tomar para garantizar un manejo seguro	Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Es sensible al aire y a la humedad.
2) Condiciones de almacenamiento seguro, incluida cualquier incompatibilidad.	Mantenga en un recipiente fuertemente cerrado, almacene en un área fresca, seca y ventilada. Proteja del daño físico y de la humedad. Aísle de toda fuente de calor o ignición. Evite almacenarlo en pisos de madera. Separe de materiales incompatibles, combustibles, orgánicos u otros materiales fácilmente oxidables. Los recipientes de este material pueden ser peligrosos al vaciarse puesto que retienen residuos del producto (polvo, sólidos); observe todas las advertencias y precauciones listadas para el producto.
SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección personal:	

1) Parámetros de control	Información no disponible
2) Controles técnicos apropiados	CONDICIONES DE VENTILACIÓN: Se recomienda un sistema de escape local y/o general para las exposiciones de empleados debajo de los Límites de Exposición Aérea. En general, se prefiere la ventilación de extractor local debido a que puede controlar las emisiones del contaminante en su fuente, impidiendo dispersión del mismo al lugar general de trabajo.
3) Medidas de protección individual, como equipo de protección personal, EPP.	EQUIPO DE PROTECCIÓN RESPIRATORIA: Si se excede el límite de exposición, se puede usar un respirador semi facial contra polvos/neblinas hasta diez veces el límite de exposición o la concentración máxima de utilización que especifica el organismo de control apropiado o el fabricante del respirador, lo que sea más bajo. Se puede usar un respirador facial. EQUIPO DE PROTECCIÓN OCULAR: Lave la piel inmediatamente con agua abundante por lo menos 15 minutos. Quítese la ropa y zapatos contaminados. Lave la ropa antes de usarla nuevamente. Limpie los zapatos completamente antes de usarlos de nuevo. Busque atención médica si se presenta irritación. EQUIPO DE PROTECCIÓN DÉRMICA: Usar ropa de protección adecuada y guantes de hule resistentes para evitar el contacto. En caso de contacto, lavarse rápidamente. Lavar la ropa y limpiar el equipo contaminado antes de usar lo de nuevo.
SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas:	
Olor y apariencia	Es una <u>sal</u> de color blanco
Masa Molar	119.002 g/mol
Solubilidad(es)	<u>Agua, Etanol, Glicerol</u>
Punto de fusión	734 °C
Punto de ebullición	1,435 °C
Ph	5.0-6 a 119 g/L a 25°C (77°F)
Estado de agregación a 25°C y 1 atm.	

Anexo N°3 Flow Sheet Utunsa.



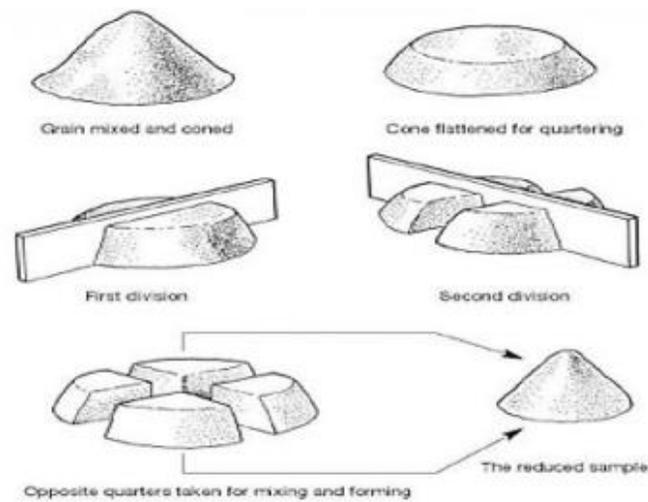
AnexoNº4 Técnica de Cono y Cuarteo

Para llevar a cabo esta técnica es necesario seguir los siguientes 3 pasos:

- i. El material se extiende en una placa lisa de fierro o una superficie de concreto fácil de limpiar. Luego se apila en forma cónica colocando cada palada exactamente en el ápex. Esta operación se repite 5 veces con el propósito de dar a las partículas una

distribución homogénea respecto a un eje de revolución, esto es, homogeneidad giratoria o simetría respecto al eje vertical.

- ii. El material se distribuye por medio de una pala para formar, primero, un cono truncado y, después, un pastel circular plano, respetando lo más posible la simetría lograda en el primer paso.
- iii. El pastel circular se divide en 4 partes a lo largo de dos diagonales perpendiculares entre sí. Dos cuartos opuestos se separan como muestra y el par restante es el rechazo.



Anexo N°5 Las Análisis De Cabeza Y Ripios Prueba Botellas



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-MN-20-01503

Fecha de emisión: 05/03/2020

Página 1 de 1

Señores: DANNY VARGAS HUAMAN
Dirección: CUSCO
Atención: DANNY VARGAS HUAMAN
Recepción: 03/03/2020
Realización: 03/03/2020
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

*551 Método de Ensayo a fuego para Oro por reconocimiento Absorción atómica

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*551 Au	
				g/TM	oz/TC
MN20002568	IM-001 MUESTRA CABEZA	No proporcionado por el cliente.	Cabeza	1.349	0,03188
MN20002569	IM-002 MUESTRA RIPIO	No proporcionado por el cliente.	Ripio	0.310	0,03935

Fin del informe


Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

"a"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b"<Valor Numérico">=Límite 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 sólo 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 16005



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticossur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-20-00130

Fecha de emisión: 5/03/2020

Página 1 de 1

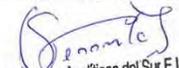
Señores: DANNY VARGAS HUAMAN
Dirección: CUSCO
Atención: DANNY VARGAS HUAMAN
Recepción: 3/03/2020
Realización: 3/03/2020
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

*968 Método de ensayo para Oro por colección en plomo - Absorción Atómica

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*968
				Au ppm
SS20000627	PLS-001 T:3h	No proporcionado por el cliente.	Solucion Ácida	0.29
SS20000628	PLS-002 T:6h	No proporcionado por el cliente.	Solucion Ácida	0.25
SS20000629	PLS-003 T:12h	No proporcionado por el cliente.	Solucion Ácida	0.31
SS20000630	PLS-004 T:24h	No proporcionado por el cliente.	Solucion Ácida	0.30
SS20000631	PLS-005 T:48h	No proporcionado por el cliente.	Solucion Ácida	0.29
SS20000632	PLS-006 T:72h	No proporcionado por el cliente.	Solucion Ácida	0.26

Fin del informe


Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Inq. Químico C.I.P. 19474

"a<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite 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 sólo 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 16011

Anexo N°6 Resultados De Pruebas Flash

Anabi S.A.C.

5/6

Pág. 1



INFORME DE ENSAYO LQ-LMS00264-2019

CLIENTE : LABORATORIO METALURGICO
 PRODUCTO : MUESTRA SOLIDA
 RESPONSABLE DE ENTREGA : Ing. Roger Varas

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

DOCUMENTO DE REFERENCIA : N° 489 LABMET - PMC - ANABI 2019
 CANTIDAD DE MUESTRAS : 9
 PRESENTACIÓN : Muestras solidas codificadas
 PROCEDENCIA : Laboratorio Metalurgico
 FECHA DE RECEPCIÓN : 04/08/2019 2T
 FECHA DE ANALISIS : 04/08/2019 2T
 FECHA DE REPORTE : 04/08/2019 2T

ORDEN	CODIGO DE MUESTRA	RESULTADOS					
		Au (g/t)					
1	IM-6629	0.103					Ripio Flash Prueba con KBr
2	IM-6630	0.064					Ripio Flash Prueba con NaCN
3	IM-6631	0.098					Ripio Flash Prueba con KBr
4	IM-6632	0.070					Ripio Flash Prueba con NaCN
5	IM-6633	0.099					Ripio Flash Prueba con KBr
6	IM-6634	0.068					Ripio Flash Prueba con NaCN
7	IM-6635	0.522					Patron a -200m
8	IM-6636	0.470					Cabeza Pruebas KBr
9	IM-6637	0.344					Cabeza Pruebas KBr

MATRIZ

METODO DE ENSAYO

TIEMPO DE CUSTODIA DE CONTRAMUESTRA

UTUNSA, lunes, 5 de Agosto de 2019

LABORATORIO QUÍMICO
 Ing. Karla Lujan

Anexo N°7 Resultados De Pruebas En Columnas



INFORME DE ENSAYO
RCJ-INFORME-1473

REV. 2.1

Página 1 de 1

A solicitud de	: DANNY VARGAS HUAMAN	
Por cuenta de	: DANNY VARGAS HUAMAN	
Tipo de muestra	: Muestra Mineral	
Tipo de Análisis	: Reconocimiento	
		Cantidad de Muestras : 11
		Fecha de Recepción : 23/12/2020
		Fecha de Ensayo : Del 26/12/2020 Al 26/12/2020
Referencia	: Factura – Nota de Servicio	

Métodos : FIRE ASSAY (Vía Seca)




ING. MICHAEL CALDERO ROMERO
CIP N° 233781
Responsable Lab. Química



INFORME DE ENSAYO RCJ-INFORME-1477

A solicitud de	: DANNY VARGAS HUAMAN	Cantidad de Muestras	: 88
Por cuenta de	: DANNY VARGAS HUAMAN	Fecha de Recepción	: 23/12/2020
Tipo de muestra	: Solución	Fecha de Ensayo	: Del 23/12/2020
Tipo de Análisis	: Lectura por Absorción Atómica		Al 28/12/2020
Referencia	: Nota de Servicio		
Métodos		: Absorción Atómica	

ID. Laboratorio	ID. Cliente	Au FFAA mg/L 0.001	ID. Laboratorio	ID. Cliente	Au FFAA mg/L 0.001	ID. Laboratorio	ID. Cliente	Au FFAA mg/L 0.001
MIN-20/03378	C-1A	0.522	MIN-20/03408	C-9C	0.281	MIN-20/03438	C-6F	0.155
MIN-20/03379	C-2A	0.376	MIN-20/03409	C-10C	0.279	MIN-20/03439	C-7F	0.215
MIN-20/03380	C-3A	0.456	MIN-20/03410	C-11C	0.261	MIN-20/03440	C-8F	0.199
MIN-20/03381	C-4A	0.467	MIN-20/03411	C-1D	0.263	MIN-20/03441	C-9F	0.210
MIN-20/03382	C-5A	0.374	MIN-20/03412	C-2D	0.276	MIN-20/03442	C-10F	0.279
MIN-20/03383	C-6A	0.479	MIN-20/03413	C-3D	0.283	MIN-20/03443	C-11F	0.195
MIN-20/03384	C-7A	0.495	MIN-20/03414	C-4D	0.287	MIN-20/03444	C-2G	0.114
MIN-20/03385	C-8A	0.568	MIN-20/03415	C-5D	0.297	MIN-20/03445	C-5G	0.166
MIN-20/03386	C-9A	0.339	MIN-20/03416	C-6D	0.272	MIN-20/03446	C-7G	0.158
MIN-20/03387	C-10A	0.320	MIN-20/03417	C-7D	0.262	MIN-20/03447	C-8G	0.175
MIN-20/03388	C-11A	0.396	MIN-20/03418	C-8D	0.285	MIN-20/03448	C-9G	0.210
MIN-20/03389	C-1B	0.333	MIN-20/03419	C-9D	0.293	MIN-20/03449	C-10G	0.190
MIN-20/03390	C-2B	0.346	MIN-20/03420	C-10D	0.248	MIN-20/03450	C-11G	0.166
MIN-20/03391	C-3B	0.358	MIN-20/03421	C-11D	0.251	MIN-20/03451	C-2H	0.125
MIN-20/03392	C-4B	0.356	MIN-20/03422	C-1E	0.222	MIN-20/03452	C-5H	0.125
MIN-20/03393	C-5B	0.336	MIN-20/03423	C-2E	0.142	MIN-20/03453	C-7H	0.104
MIN-20/03394	C-6B	0.321	MIN-20/03424	C-3E	0.228	MIN-20/03454	C-8H	0.119
MIN-20/03395	C-7B	0.359	MIN-20/03425	C-4E	0.221	MIN-20/03455	C-9H	0.198
MIN-20/03396	C-8B	0.359	MIN-20/03426	C-5E	0.260	MIN-20/03456	C-10H	0.076
MIN-20/03397	C-9B	0.268	MIN-20/03427	C-6E	0.207	MIN-20/03457	C-11H	0.096
MIN-20/03398	C-10B	0.298	MIN-20/03428	C-7E	0.236	MIN-20/03458	C-2I	0.107
MIN-20/03399	C-11B	0.348	MIN-20/03429	C-8E	0.256	MIN-20/03459	C-5I	0.056
MIN-20/03400	C-1C	0.312	MIN-20/03430	C-9E	0.278	MIN-20/03460	C-7I	0.053
MIN-20/03401	C-2C	0.295	MIN-20/03431	C-10E	0.235	MIN-20/03461	C-8I	0.076
MIN-20/03402	C-3C	0.288	MIN-20/03432	C-11E	0.216	MIN-20/03462	C-2J	0.063
MIN-20/03403	C-4C	0.317	MIN-20/03433	C-1F	0.180	MIN-20/03463	C-5J	0.049
MIN-20/03404	C-5C	0.316	MIN-20/03434	C-2F	0.126	MIN-20/03464	C-7J	0.045
MIN-20/03405	C-6C	0.286	MIN-20/03435	C-3F	0.201	MIN-20/03465	C-8J	0.035
MIN-20/03406	C-7C	0.311	MIN-20/03436	C-4F	0.117			
MIN-20/03407	C-8C	0.357	MIN-20/03437	C-5F	0.233			

NOTA DE ALMACENAJE:

Pasado el plazo de almacenamiento de 90 días para remanentes o pulpas y 30 días para Rechazos o gruesas, se procederá a descartar. Favor no considerar esta información si se presentan instrucciones al inicio del servicio.

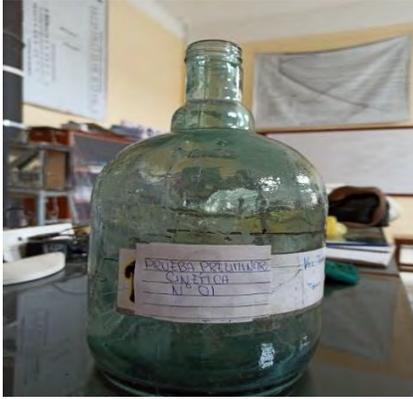
Huancayo, 28 de Diciembre de 2020



ING. MICHAEL G. CACERES ROMERO
 CIP N° 233781
 Responsable Lab. Químico

ANEXO N° 8 Fotografías de prueba en botellas

Botella de volumen de 4 litros.



Adición de agua y mineral al reactor de lixiviación.



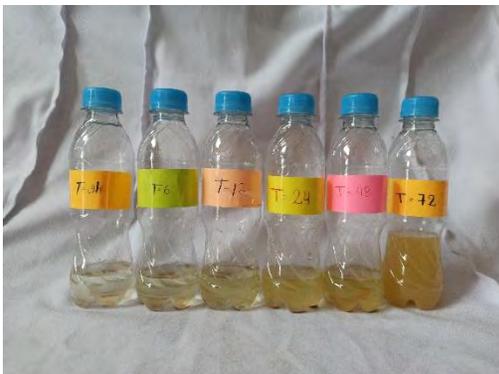
Adición de reactivos al reactor.



Agitación del reactor en la mesa de rodillos.



Muestras líquidas obtenidas en las horas de control indicadas.



Muestras sólidas para envío para laboratorio químico.



ANEXO N° 9 Fotografías De Pruebas En Columnas

Dosificación de ácido bromhídrico para preparación del agente lixiviante.



Preparación del agente lixiviante (agua más ácido bromhídrico y bromuro de potasio).



Solución de riego en cada columna.



Drenado de solución lixiviada o PLS.



Descarga de columnas lixiviadas.



Muestras de soluciones líquidas para análisis de laboratorio químico.





Consultoría, Capacitación, Investigación y
Laboratorio de Caracterización Mineralógica -
Metalúrgica Aplicados a la Minería, Geotecnia
y Medio Ambiente.

ANEXO N°10

INFORME DE LABORATORIO

ESTUDIOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA,

ANÁLISIS MINERALÓGICO DE GRADO DE LIBERACIÓN, ANÁLISIS
QUÍMICOS POR ICP ÓPTICO Y ANALISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN
DE RAYOS X(DRX) CON TUBO DE COBALTO.

PARA:

MINERA ANABI S.A.C.
CSM-133-2018_Rev.0
IL-OTSM082018_Rev.0
JUNIO, 2018

MSc. José Andrés Yparraguirre

RodríguezCIP N° 128651

Gerente de Laboratorio

Ing. Fanny Blas

CIP N° 84066

Gerente General

FAINGENIEROS S.A.C.

Av. Angélica Gamarra 1385 Urb. Santa Rosa Mz "M" Lote 03 Lima 39 – Perú T. (511) 531847



INTRODUCCIÓN

A solicitud de la Ing. Roger Varas / Unidad Utunsa, de la Empresa **MINERA ANABI S.A.C.**, se ha realizado el Estudios De Microscopía Electrónica, Análisis Mineralógico De Grado De Liberación, Análisis Químicos Por ICP Óptico y Análisis Mineralógico Por Difracción De Rayos X (DRX) Con Tubo De Cobalto, para muestra SM-1.

En el estudio de Microscopía Electrónica se investiga e identifica especies minerales que no pueden ser reconocidos al microscopio óptico. Minerales que pueden ser granos submicroscópicos o estén formando solución sólida con minerales mayoritarios. También, se podría determinar las variedades de sulfosales de plomo, plata, bismuto, etc., que pueden estar presentes como inclusiones o diseminados dentro de los minerales mayoritarios

El objetivo del estudio del Análisis de Grado de Liberación ha sido caracterizar mineralógicamente cada muestra, identificar las especies minerales metálicas y determinar el grado de liberación de cada especie. Toda esta información nos ayudara a obtener información aplicable a la optimización de las pruebas metalúrgicas.

En los Análisis Mineralógicos semicuantitativos por DRX se han determinado todos los minerales presentes (fases cristalinas) con un límite de detección (L.D.) de 1.00 %, obtenido del procedimiento de validación del método. Los silicatos de cobre presentan un bajo nivel de cristalinidad por lo que su evaluación por DRX es limitada.

La muestra ha sido proporcionada por el cliente para los fines de estudio descritos anteriormente.

ABREVIATURAS DE LAS ESPECIES MINERALES

Abreviaturas, nomenclaturas y composición química de las especies minerales mencionadas en el informe.

Nombre	Símbolo	Composición química	Densidad (g/cm ³)	Dureza Mohs
Alunita	aln	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	2,74	3,5-4
Baritina	bar	$BaSO_4$	4,48	3,5
Bismutinita	bmt	Bi_2S_3	6,7	2
Cuarzo	cz	SiO_2	2,66	7
Goethita	goe	$FeO.OH$	3,8	5,0
Hematita	hm	Fe_2O_3	5,3	6,5
Jarosita	jar	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	3,09	3,0
Oro Nativo	Au	Au	17,64	2,5
Pirita	py	FeS_2	5,01	6,5
Rutilo	rut	TiO_2	4,25	6,5
Zircón	zir	$ZrSiO_4$	4,65	7,5

DEFINICIONES PREVIAS

La descripción de los resultados del estudio microscópico de cada muestra incluye los aspectos cualitativos y semicuantitativos. Los resultados del estudio cuantitativo son presentados en tablas compendiados para cada una de las muestras. En dicha tabla se consigna, separadamente, los porcentajes visual aproximados de las especies minerales presentes, tanto bajo la forma de **“partículas libres”** (en las que una especie mineral constituye más del 90% del área de la partícula), como bajo la forma de **“partículas mixtas”** (constituidas por la asociación de dos o más especies minerales y donde cada una de estas ocupas no menos del 10% del área total). También mencionaremos sobre la superficie expuesta en los granos mixtos.

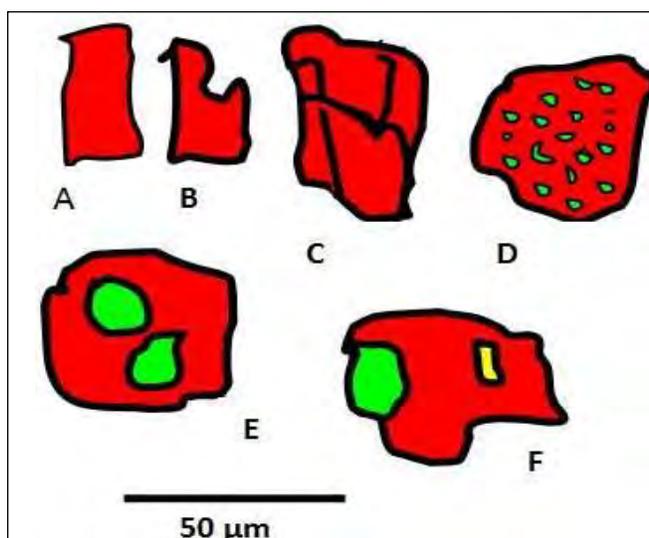


Fig. 01.- En A, B y C el mineral rojo ocurre como partícula libre, independientemente de si trata de un solo cristal (A), de un fragmento de cristal (B) o de un agregado de cristales (C). Las partículas E y F son partículas mixtas (E es binaria y F es ternaria). Obsérvese que en E el mineral verde está totalmente encapsulado, mientras que en F dicho mineral ocupa parte de la periferia y sólo el mineral amarillo está encapsulado. En D, el mineral rojo seguirá siendo considerado como partícula libre si las diseminaciones del mineral verde son extremadamente finas (en este ejemplo $<5\mu\text{m}$).

Para facilitar la presentación de los resultados, se ha adoptado algunas generalizaciones; así, por ejemplo, los minerales como calcosita, covelita y digenita se le consideran como **“minerales secundarios de cobre”** y **“minerales no metálicos de cobre”** a malaquita, azurita, tenorita, brocantita y crisocola, etc

Adicionalmente, las especies minerales Pirargirita, Proustita, jalpaita, Pearceita, Estefanita y Polibasita han sido agrupadas bajo la denominación **“sulfosales de plata”**, las especies del grupo de la tetraedrita (Tetraedrita, Tenantita, Argentotenantita, Freibergita) han sido agrupadas bajo la denominación **“cobres grises”**.

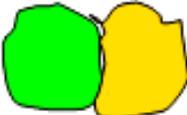
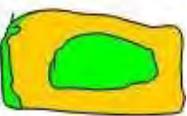
Partículas Mixtas Tipo A/B	Porcentaje de área (%)		Superficie expuesta al reactivo (%)	
	Mineral A % Areal	Mineral B % Areal	Mineral A % Perímetro	Mineral B % Perímetro
1 	50%	50%	50%	50%
2 	60%	40%	60%	40%
3 	60%	40%	90%	10%
4 	50%	50%	10%	90%
5 	40%	60%	20%	80%
6 	90%	10%	100%	0%

Tabla 01.- Configuración individual de un grupo de partículas mixtas del Tipo A/B.

Tal como se observa en la Tabla 01, cada una de las partículas mixtas correspondiente a un tipo determinado está definida por dos variables fundamentales para la Mineralogía de Procesos: su composición mineralógica y la distribución espacial de sus constituyentes. Los criterios tomados para poder determinar la superficie expuesta para cualquier proceso de tratamiento metalúrgico son mediante la relación a la ocupación de la periferia, la participación de cada constituyente, medida en porcentaje, puede variar entre 0% (mineral encapsulado) y 100% (mineral libre). Tanto en las tablas de resultados cuantitativas como en las fotomicrografías que ilustran el presente informe, las especies minerales han sido designadas mediante abreviaturas cuya explicación aparece en el listado del subtítulo III.

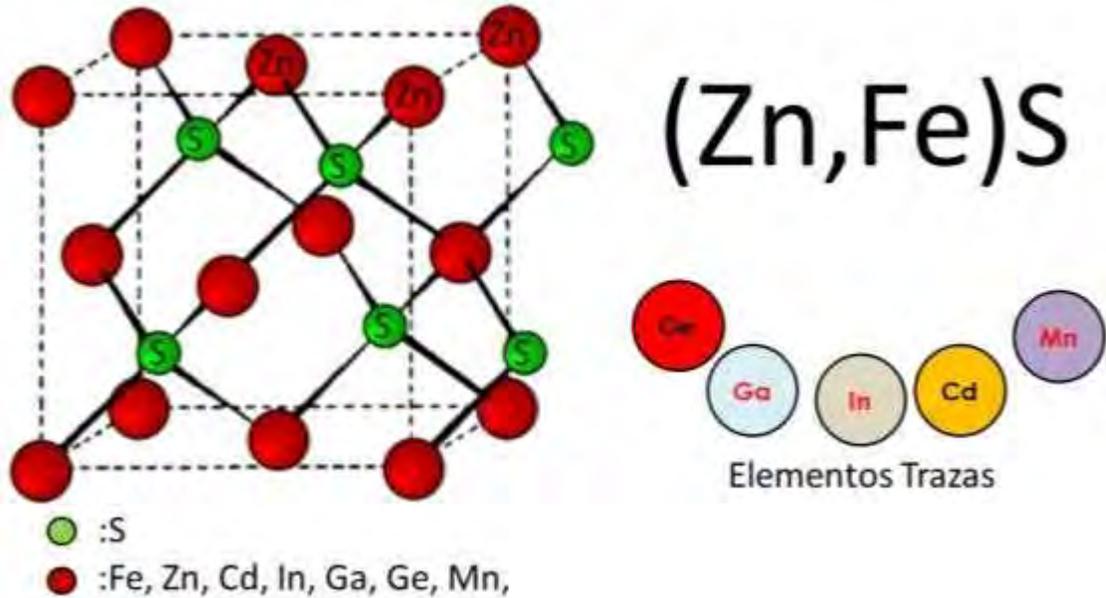
Se menciona que una especie mineral con grado de liberación mayor a 70 está en condiciones para tener buena respuesta a la flotación. (Cánepa C, 1989).

Adicionalmente, las especies minerales como Boulangerita, Bournonita, Veenita y Dufrenoyita han sido agrupadas bajo la denominación “**sulfosales de plomo**”, las especies del grupo de la tetraedrita (Tetraedrita, Tenantita, Argentotenantita, Freibergita) han sido agrupadas bajo la denominación “**cobres grises**”.

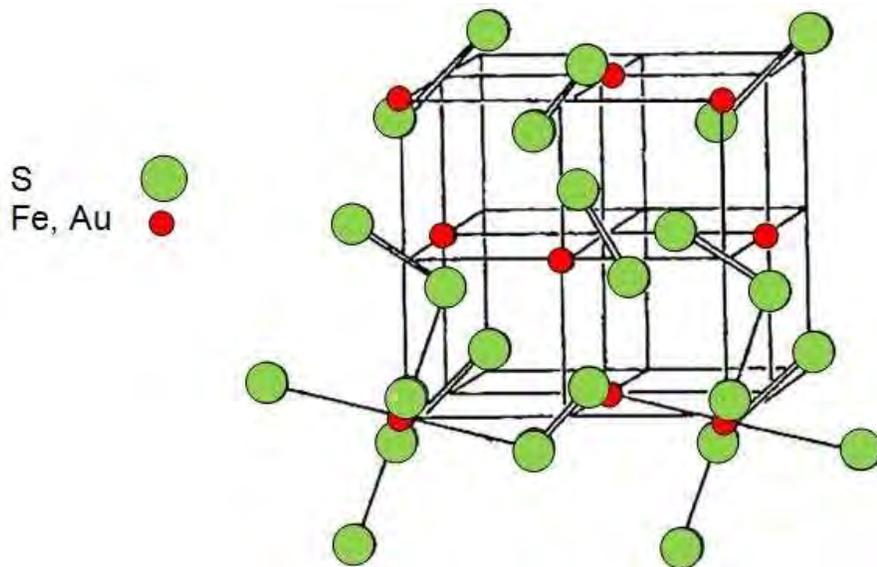
Fecha: Junio 2018

Solución Solida: El elemento traza entra en la estructura, sustituyendo a un elemento mayoritario. Los iones serán tanto mejor aceptados cuando más próximos sean su radio y su electronegatividad a los del elemento que van a sustituir.

Ejemplo 1: Esfalerita con presencia de Cd, In, Ga, Ge, Mn dentro de su composición química o red cristalina.



Ejemplo 2: Pirita con presencia de Au dentro de su composición química o red cristalina.



Elemento Químico	Especie Mineral	Solubilidad	Autoridad
Oro	Calaverita	Rapidamente Soluble	JOHNSTON (1933)
Plata	Argentita Cerargirita Proustita Pirargirita	Rápidamente Soluble Moderadamente Soluble	LEAVER WOOLF Y KARCHMER (1931)
Cobre	Azurita Malaquita Calcocita Cuprita Bornita Enargita Tetraedrita Crisocola Calcopirita	94.5 90.2 90.2 85.5 70 65.8 21.9 11.8 5.6	LEAVER Y WOOLF (1931)
Zinc	Smithsonita Zincita Hidrozinca Franklinita Esfalerita Hemimorfita Willemita Willomita	40.2 35.2 35.1 20.2 18.4 13.4 13.1	LEAVER Y WOOLF (1931)
Hierro	Pirrotita Pirita Hematita Magnetita Siderita	Rápidamente Soluble Moderadamente Soluble Prácticamente Insoluble	HEDLEY Y TABACHNICK (1958)
Arsénico	Oropimente Rejalgar Siderita	73 9.4 0.9	
Antimonio	Estibina	21.1	
Plomo	Galena	Soluble a alta alcalinidad	LEMMON (1940)

Figura 02.- Solubilidad de minerales en soluciones Cianuradas (Extraído de F. Habashi)

TABLA DE AMARRES MINERALÓGICOS

	I	II	III	IV		I	II	III	IV
1a SIMPLE Límites curvos o rectilíneos. Es el tipo más frecuente.					2d COLOFORME				
1b AMEBOIDE Límites curvos y sinuosos. Muy frecuente.					3a SANDWICH Común. Ejemplos: cp en py, mb en py, cubanita en cp, il en mt.				
1c GRÁFICO O MIRMEQUÍTICO O EUTECTICO Común. Ejemplos: cp-stn, bu-cc					3b ESTRATIFICADO O LAMELAR Poco común. Ejemplos: il en mt, bn en cp, cubanita en cp.				
1d DISEMINADO					3c RETICULAR Poco común. Ejemplos: il en mt, bn en cp, cubanita en cp.				
1e INCLUSIÓN					3d VETEADO				
2a CORONA Común. Ejemplos: cc, cv en py, cp					4a BORDE COMPUESTO				
2b SUB-CORONA					4b COMPENETRACIÓN				
2c CONCÉNTRICO					4c INTERSTICIAL				

ANÁLISIS DE GRADO DE LIBERACIÓN.

Muestra SM-1

Los minerales libres encontrados son los minerales no metálicos de gangas, pirita, goethita y hematita. Los amarres mineralógicos más importantes económicamente son los binarios de GGs/hm con 0.65%, GGs/rut con 0.20% y GGs/goe con 0.68% del porcentaje en volumen (Ver Tabla 03).

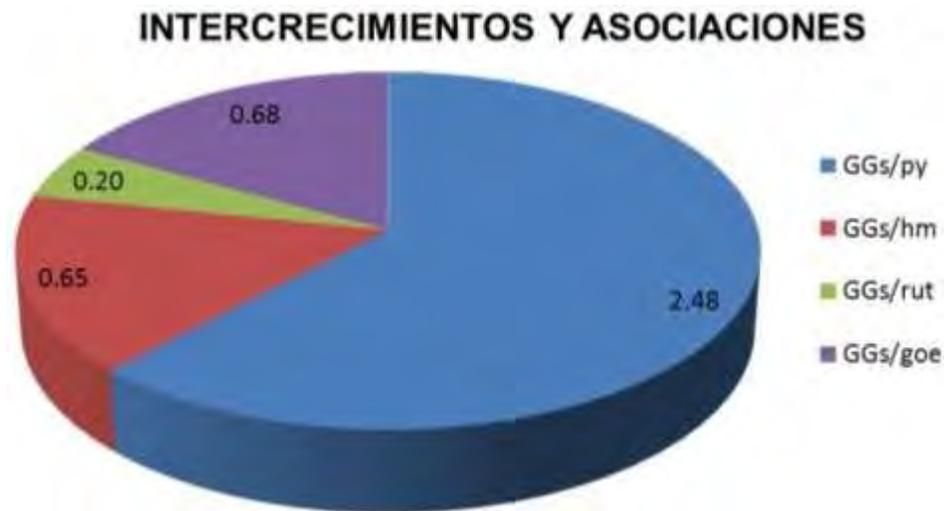


Figura 06.- Tipos de intercrecimientos.

El **rutilo**, se muestra en 0.02% en volumen de la muestra correspondiente a granos mixtos binarios de GGs/rut. Su grado de liberación es de 0.85%.

La **goethita**, se manifiesta en 0.64% en volumen de la muestra donde el 0.15% se presenta como granos libres y el restante 0.49% ocurre como granos mixtos binarios de GGs/goe. Su grado de liberación total es de 68.25%.

La **hematita** se manifiesta en 0.41% en volumen de la muestra donde el 0.38% corresponde a granos libres mientras la diferencia de 0.03% ocurre como granos mixtos binarios de GGs/hm. Su grado de liberación de 92.59%.

En la figura 07 y 08 se presenta el grado de liberación de los minerales identificados y el porcentaje en volumen de los minerales en la muestra respectivamente.



Figura 07.- Representación de los grados de liberación de los minerales presentes.

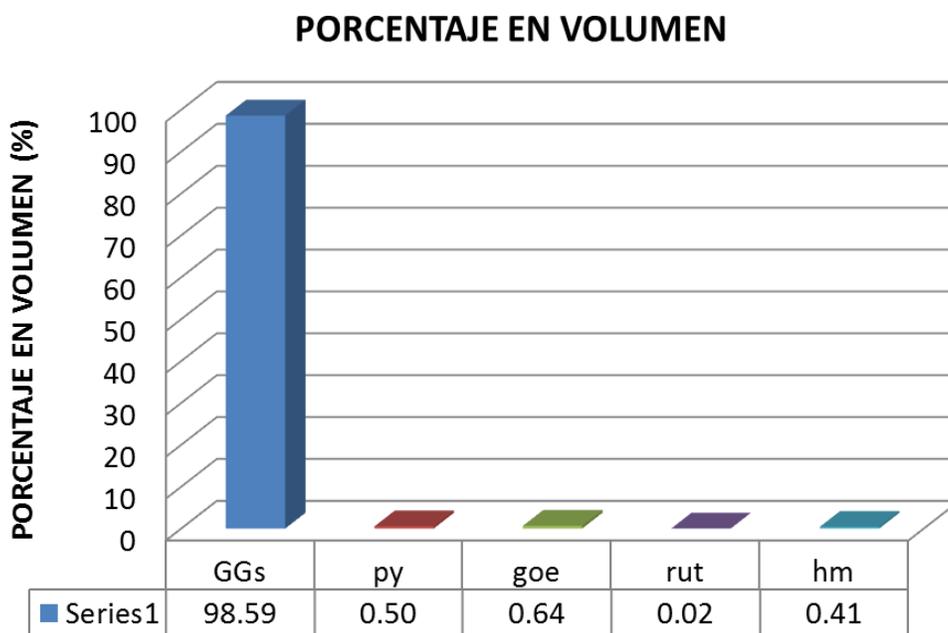


Figura 08.- Representación del porcentaje en volumen de los minerales presentes



Tabla 03.-Análisis mineralógicos de la Muestra SM-1

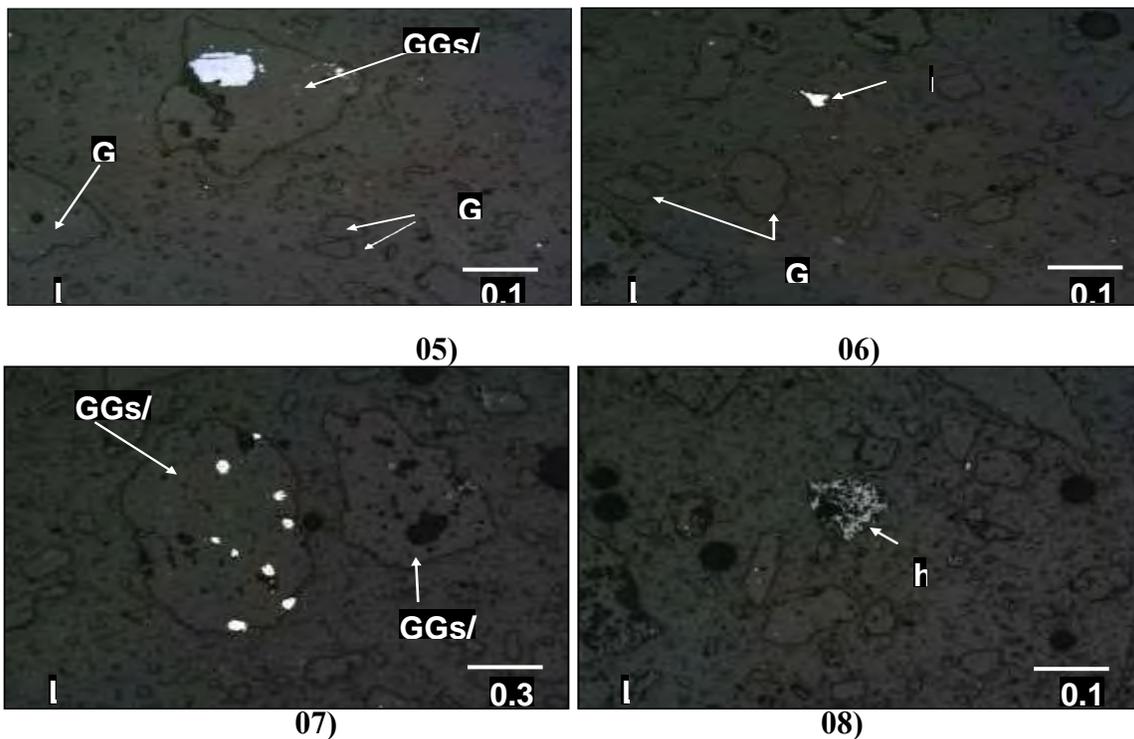
MUESTRA SM-1								
Partículas Libres	No. Part.	% Vol	Grado de Liberacion	GGs	py	goe	rut	hm
Gangas	635.00	95.26	99.61	95.26	100.00			
Pirita	1.50	0.23	48.82		0.23	100.00		
Goethita	1.00	0.15	68.25			0.15	100.00	
Rutilo	0.00	0.00	0.85				0.00	0.00
Hematita	2.50	0.38	92.59					0.38
Parcial	640.00	96.01		95.26	0.23	0.15	0.00	0.38
Particulas Mixtas			Asociaciones (Ver subtítulo IV)	GGs	py	goe	rut	hm
GGs/py	16.50	2.48	1d(II), 1b(IV), 1e(IV), 1a(I)	2.35	92.91	0.27	6.16	
GGs/hm	4.30	0.65	1a(I), 3c(II), 1e(I)	0.62	95.33			0.03
GGs/rut	1.30	0.20	4b(III)	0.17	82.62		0.02	0.85
GGs/goe	4.50	0.68	1b(I)	0.19	18.20	0.49	58.53	
Total	666.60	100.00						
% Volumen				98.59	0.50	0.64	0.02	0.41
Peso Especifico				2.6	5.01	3.8	4.25	5.3
% Peso				97.29	0.94	0.92	0.03	0.81
Grado de Liberacion				99.61	48.82	68.25	0.85	92.59

FAINGENIEROS S.A.C.

Av. Angélica Gamarra 1385 Urb. Santa Rosa Mz "M" Lote 03 Lima 39 – Perú T. (511) 531847

FAINGENIEROS S.A.C.

Av. Angélica Gamarra 1385 Urb. Santa Rosa Mz "M" Lote 03 Lima 39 – Perú T. (511) 5318475



Fotomicrografías 05 a 08.- **05)** Granos libres de gangas no metálicas (GGs); Grano mixto binario de gangas y rutilo (GGs/rut) **06)** Grano libre de pirita (py); Granos libres de gangas (GGs); **07)** Grano mixto binario de gangas y pirita (GGs/py); Grano mixto binario de gangas y hematita (GGs/hm); **08)** Grano libre de hematita (hm). **LR:** Luz Reflejada.

ANÁLISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Muestra SM-1

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO_2	95
Alunita	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	3
Rutilo	TiO_2	1
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	<L.D
Bismutinita	Bi_2S_3	<L.D.

L.D.: Limite Detección

FAINGENIEROS S.A.C.

ESTUDIO DE MICROSCOPIA ELECTRONICA

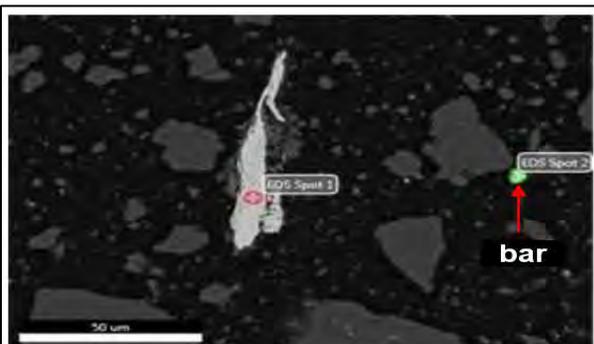
Muestra SM-1

MINERALOGIA	Oro nativo, Baritina, Cuarzo	
Minerales	Descripción	Tamaño de partícula (µm)
Baritina	Ocorre como granos libres. Se encuentra acompañado de cuarzo.	3 - 4
Cuarzo	Se observa como granos libres. Presenta inclusiones de oro (Au).	8 - 12
Oro Nativo	Dispuestos como partículas libres. Muestra contenido de plata (Ag). Ocorre incluido en cuarzo.	1 - 2
<p>El orden de predominancia de los minerales analizados fue:</p> <p>Oro nativo > Baritina > Cuarzo</p> <p>Se aprecia oro nativo (Au) libre en la birqueta y como inclusión en cuarzo.</p> <p>En la tabla 06 se muestra el promedio en porcentaje, de la composición química elemental de los minerales identificados en la muestra.</p>		

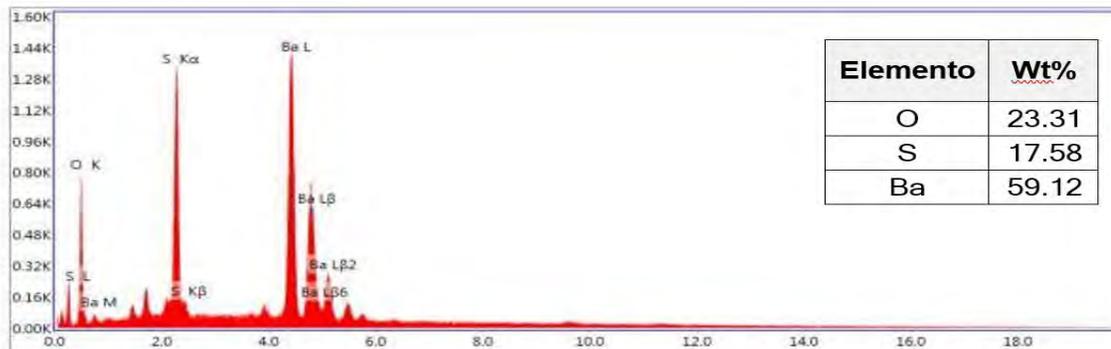
Tabla 06: Composición química (%) de los minerales identificado en la Muestra SM-1

Minerales	Composición Química (%)													TOTAL
	Au	Ag	Fe	O	Zn	Mn	Ba	Si	Al	Cu	Zr	Ti	S	
Baritina				23.31			59.12						17.58	100
Oro nativo	99.36	0.64												100
Oro nativo	98.34	1.66												100
Cuarzo				43.26				56.74						100
Oro nativo	98.2	0.2												100
Oro nativo	99.57	0.43												100
Baritina				23.56			60.18						16.25	100
Cuarzo				49.45				50.55						100
Baritina				22.82			60.69						16.49	100

A continuación, son presentadas imágenes de la muestra con sus respectivos análisis reales y elementales obtenidos con el microscopio electrónico de barrido.

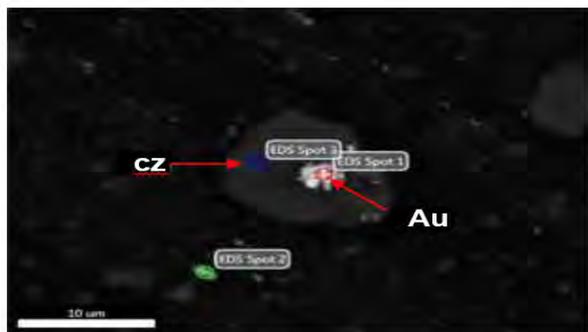


(1)

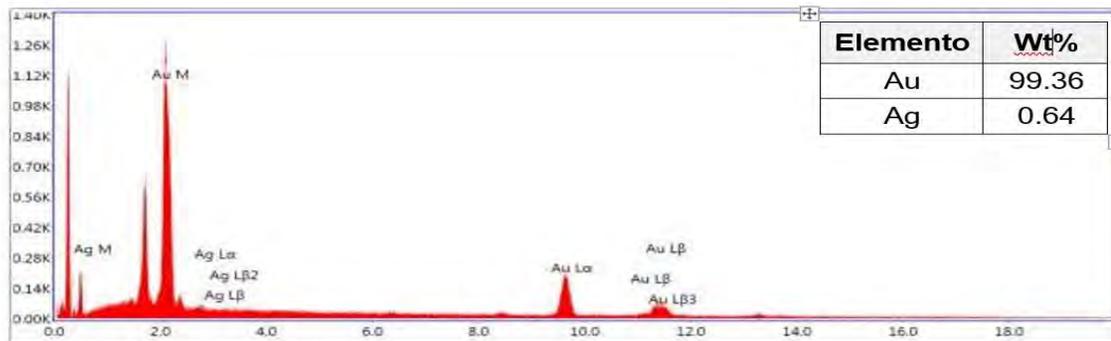


(b)

Figura 1 spot 2. a) Región marcada con una partícula libre de **Baritina (bar)** de aproximadamente 3µm; b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno (O), Azufre (S) y Bario (Ba).



(2)

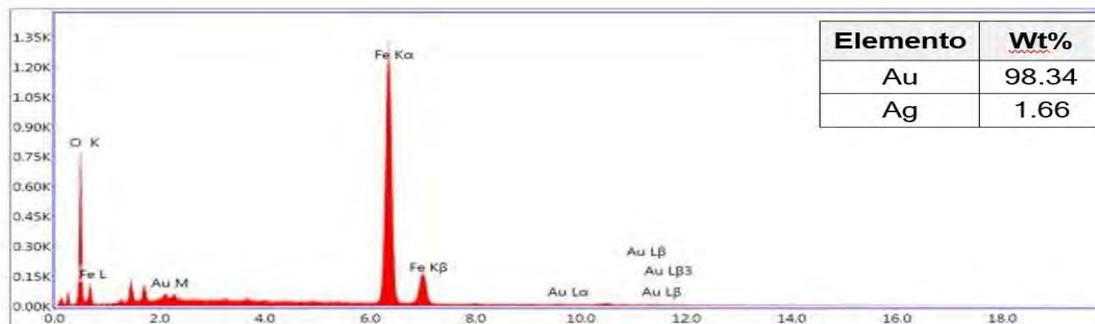


(b)

Figura 2 : spot 1. a) Región marcada con una partícula de **Oro nativo (Au)** con contenido de plata (Ag), incluido en cuarzo (CZ) y con un tamaño aproximado de 2µm; b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag).



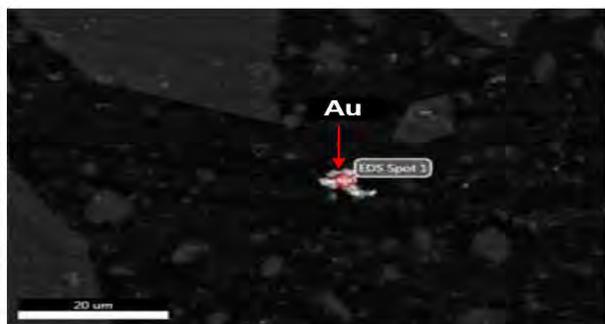
(3)



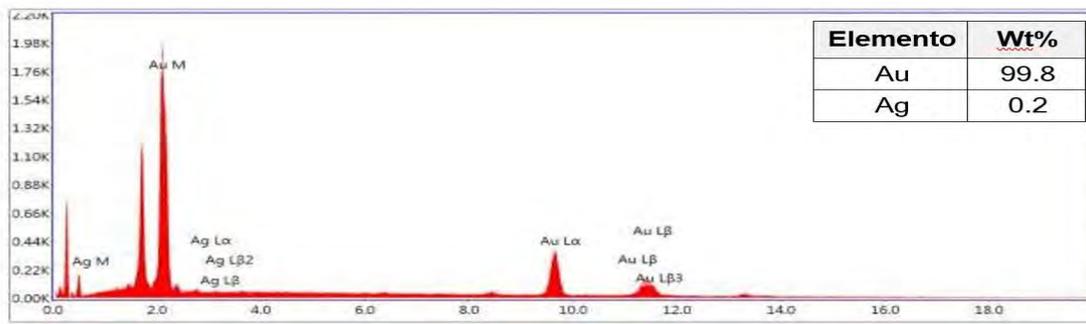
Lsec: 30.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

(b)

Figura 3: spot 2. a) Región marcada con una partícula libre de **Oro nativo (Au)** con contenido de plata (Ag) y con un tamaño aproximado de 1µm; (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag).



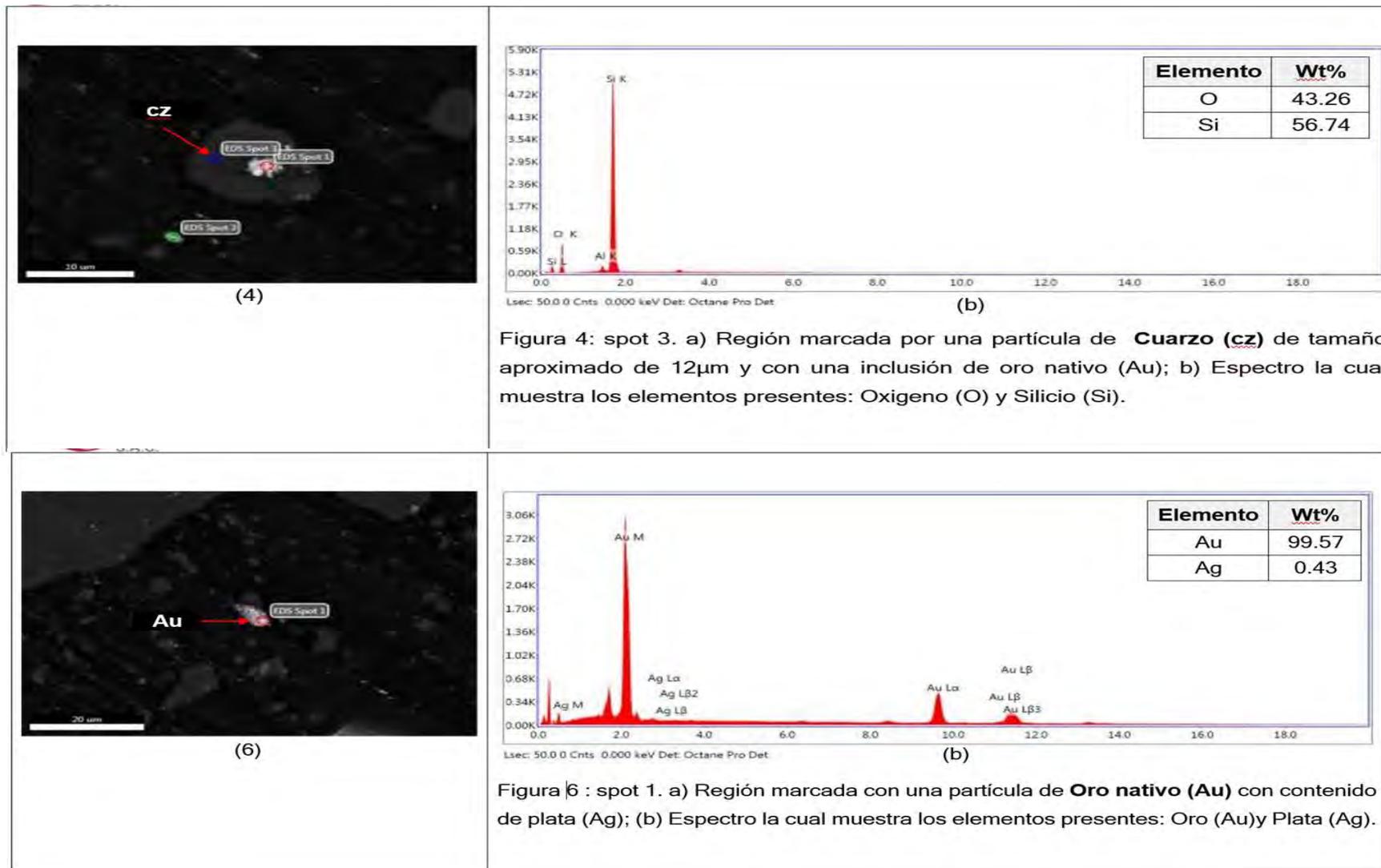
(5)

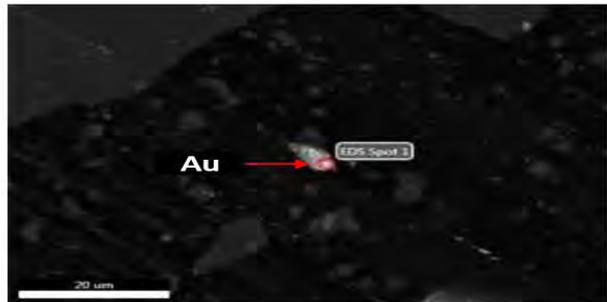


Lsec: 50.0 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

(b)

Figura 5: spot1. a) Región marcada con una partícula libre de **Oro nativo (Au)** con contenido de plata (Ag); (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag).





(6)

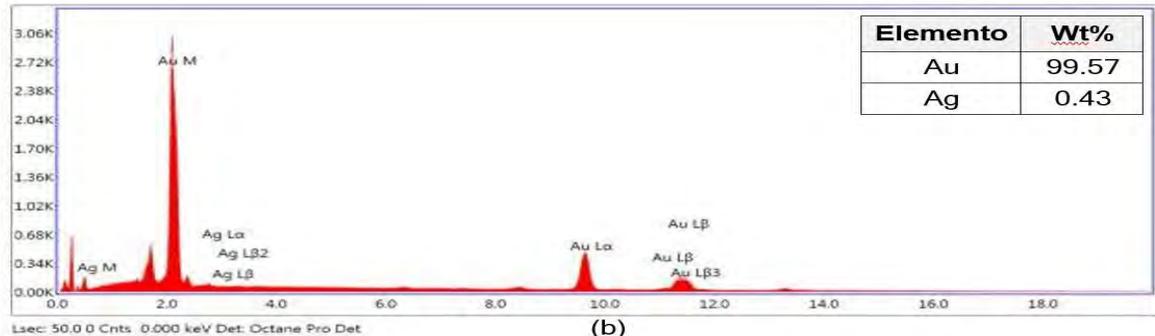
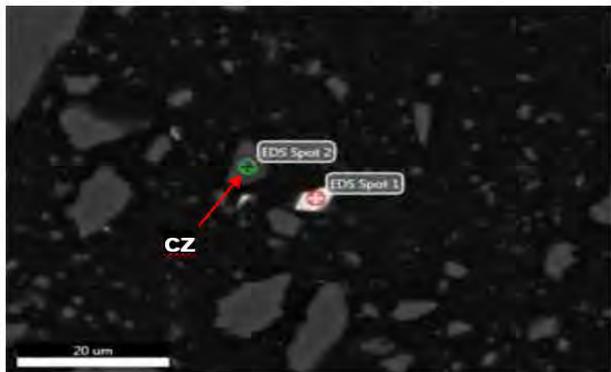


Figura 6 : spot 1. a) Región marcada con una partícula de **Oro nativo (Au)** con contenido de plata (Ag); (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oro (Au) y Plata (Ag).



(8)

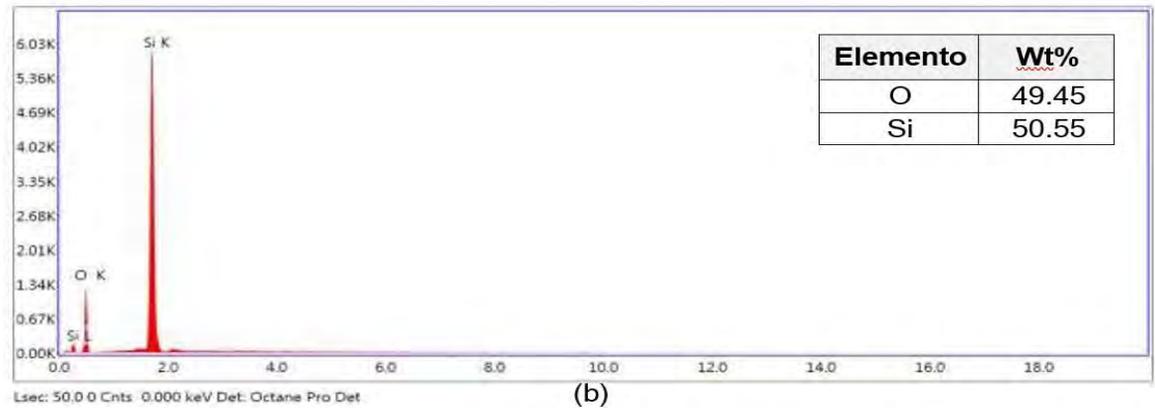


Figura 8 : spot 2. a) Región marcada por una partícula de **Cuarzo (CZ)** de tamaño aproximado de 8µm; (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno (O) y Silicio (Si).



OTSM-080-2018

Rev. 0

ANALISIS DE ICP ÓPTICO

ID Muestras Lab	ELEMENTOS QUÍMICOS										
Elementos	Al	Sb	As	S	Ba	Be*	Bi	Cd	Ca	Co	Cu
Unidades	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%
LC Inf.	0.01	5	1	0.01	1	0.5	5	1	0.01	1	0.00005
LC Sup.	15	10000	10000	10	10000	10000	10000	10000	15	10000	1
SM -1	0.07	45	83	0.24	<1	<0.5	91	1	<0.01	1	0.00388

ID Muestras Lab	ELEMENTOS QUÍMICOS										
Elementos	Cr	Sc*	Sn	Sr	P	Ga*	Fe	La	Mg	Mn	Mo
Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	ppm
LC Inf.	1	0.5	10	0.5	0.01	10	0.01	0.5	0.01	2	1
LC Sup.	10000	10000	10000	10000	15	10000	15	10000	15	10000	10000
SM -1	125	0.2	<10	10.9	0.01	<10	1	0.9	0.01	68	13.2

ID Muestras Lab	ELEMENTOS QUÍMICOS											
Elementos	Ni	Ag	Pb	K	Se*	Na	Ta	Tl	Te*	Ti	V	Zn
Unidades	ppm	gr/tn	ppm	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm	%	ppm	%
LC Inf.	1	0.2	2	0.01	10	0.01	0.05	2	10	0.01	2	0.00005
LC Sup.	10000	100	10000	15	10000	15	10000	10000	10000	15	10000	1
SM -1	61	16	93	0.06	12.08	0.04	19.0	<2	<10	0.01	4	0.0027

Matriz de consistencia “EXTRACCIÓN DE ORO DEL MINERAL AURÍFERO POR LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS CON REACTIVOS BROMURO DE POTASIO Y ÁCIDO BROMHÍDRICO EN LA UNIDAD MINERA UTUNSA – ANABI - APURÍMAC”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOLOGÍA
<p>GENERAL ¿Se podrá extraer oro por lixiviación en columnas utilizando bromuro de potasio y ácido bromhídrico del mineral aurífero de la Unidad minera Utunsa – ANABI – Apurímac?</p> <p>ESPECÍFICOS - ¿El mineral aurífero tendrá las características químicas y mineralógicas para el proceso de lixiviación en columnas de la unidad minera Utunsa? - ¿Cuál es consumo del ácido bromhídrico (HBr) y bromuro de potasio (KBr) en el proceso de lixiviación en columnas? - ¿Cuál será la ecuación cinética de lixiviación en columnas, utilizando los reactivos mencionados? - ¿Cómo influyen las variables en el proceso de lixiviación en columnas del mineral aurífero?</p>	<p>✓ GENERAL Extraer oro por lixiviación en columnas utilizando bromuro de potasio y ácido bromhídrico del mineral aurífero de la Unidad minera Utunsa – ANABI – Apurímac.</p> <p>ESPECÍFICOS -Realizar la caracterización química y mineralógica del mineral en los laboratorios de la Unidad minera. -Determinar el consumo apropiado del ácido bromhídrico y bromuro de potasio titulando la solución lixivante en el laboratorio. -Determinar la ecuación cinética del proceso de lixiviación utilizando el software MINITAB. -Determinar la influencia de las variables por diseño experimental 2³ con el software MINITAB.</p>	<p>✓ GENERAL Se extrae más del 70 % oro por lixiviación en columnas utilizando soluciones de bromuro de potasio y ácido bromhídrico del mineral aurífero de la unidad minera Utunsa – ANABI – Apurímac.</p> <p>ESPECÍFICOS -La mineralogía y composición química de oro del mineral aurífero de la empresa Utunsa es adecuada para realizar el proceso de lixiviación en columnas. -El consumo promedio de los reactivos cumple con los promedios prácticos de lixiviación en columnas. -La ecuación cinética de lixiviación es directamente proporcional a la concentración de ácido bromhídrico y bromuro de potasio. -El modelo matemático se ajusta al diseño factorial 2³ donde interrelacionan de las variables más influyentes en el proceso de lixiviación en columnas es la concentración de reactivos y tamaño de partícula.</p>	<p>DEPENDIENTES Porcentaje de extracción del oro en la solución.</p> <p>INDEPENDIENTES - Concentración de agente lixivante . - Tiempo de lixiviación - Tamaño de partícula</p> <p>INTERVINIENTE - Mineralogía del yacimiento - Temperatura del medio</p> <p>INDICADORES - Concentración de reactivos (g/l) - Tiempo de Lixiviación (días) - Tamaño de partícula (cm)</p>	<p>TIPO DE INVESTIGACIÓN Tecnológica</p> <p>NIVEL DE INVESTIGACIÓN - Descriptivo - Explicativo</p> <p>DISEÑO EXPERIMENTAL L Diseño experimental 2³</p> <p>POBLACIÓN: Mineral aurífero de Unidad Minera Utunsa.</p> <p>MUESTRA: 100 Kg de mineral aurífero</p>