

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



**“EFECTO DEL NITRATO DE PLOMO EN LA CIANURACIÓN
POR AGITACIÓN DE MINERALES DE ORO Y PLATA”**

INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA

PRESENTADO POR:
OMAR ALEXANDER CALVO MELGAREJO

ASESOR:
EDGAR FORTUNATO SEGURA TUMIALAN

LIMA – PERU

2013

DEDICATORIA

Dedicado a toda mi familia por el apoyo constante y abnegado.

RESUMEN

El presente informe considera las condiciones de cianuración de una planta de tratamiento de minerales de oro y plata por el proceso de cianuración por agitación, y su mejoramiento en la cinética de disolución del oro y menor consumo de reactivos.

La presencia de impurezas en soluciones de cianuro puede acelerar o retardar la disolución de oro. Se encontró que las especies de plomo en solución aumenta la velocidad de disolución de oro; en contraste con esto, las especies de sulfuro disminuyen la velocidad de disolución de oro y también contrarresta el efecto de aceleración de especies de plomo.

El nitrato de plomo forma una capa de hidróxido en las partículas de pirita, lo cual reduce la velocidad de reacción con el cianuro. La disolución de la pirita genera una capa de azufre en el oro pasivando su superficie. Esta capa es de menor importancia en presencia del plomo. En el caso del oro, la adición de nitrato de plomo es inhibir parcialmente la formación de la capa de azufre.

Los resultados indican que para que la estrategia de agregar nitrato de plomo sea óptima debería realizarse en función de la comparación mineralógica del mineral. La formación de una capa pasiva en las partículas de oro tiene una influencia significativa en las etapas iniciales de la cianuración. La incorporación de nitrato de plomo disminuye notablemente este efecto inhibitor. En este caso, el tratamiento con nitrato de plomo a 300 g/t, tuvo un efecto significativo especialmente en la recuperación de la plata que aumentó en 5.50 unidades porcentuales y la de oro en 2.16 unidades porcentuales.

ABSTRACT

This report considers the conditions cyanidation plant treating gold and silver ores by the cyanidation process by stirring, and improvement in the gold dissolution kinetics and reduced reagent consumption.

The presence of impurities in cyanide solutions can accelerate or retard the dissolution of gold. It was found that the lead species in solution increases the rate of dissolution of gold in contrast; the sulfide species decreases the dissolution rate of gold and also counteracts the acceleration of lead species.

Lead nitrate hydroxide forms a layer in the pyrite particles, which reduces the rate of reaction with the cyanide. Dissolution of pyrite produces a layer of sulfur in gold passivating surface. This layer is of minor importance in the presence of lead. In the case of gold, lead nitrate addition is partially inhibiting the formation of the sulfur layer.

The results indicate that the strategy of adding lead nitrate should be made optimal according to the comparison of the ore mineralogy. Forming a passive layer on the gold particles has a significant influence on the initial stages of cyanidation. Incorporating lead nitrate significantly decreases this inhibitory effect. In this case, treatment with lead nitrate to 300 g / t, had a significant effect especially in the recovery of silver which increased 5.50 percentage units gold and 2.16 percentage units.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
Objetivo	13
Justificación	13
CAPITULO I	
ASPECTOS GENERALES DE LA CIANURACION DE ORO Y PLATA POR AGITACIÓN	
1.1 Generalidades del Proceso de cianuración de Oro y Plata	14
1.2 Química de las soluciones cianuradas	15
1.3 Mecanismos de Disolución del Oro en Soluciones de Cianuro	19
1.3.1 Reacción Anódica	20
1.3.2 Reacción Catódica	23
1.3.3 Reacción de Disolución Total	25
1.3.4 Cinética de Reacción	26
1.3.5 Factores que afectan la velocidad de Disolución del Oro	26
1.3.5.1 Concentración de Cianuro y Oxígeno Disuelto	27
1.3.5.2 Temperatura	39
1.3.5.3 pH	40
1.3.5.4 Área de la Superficie	43
1.3.5.5 Agitación	43
1.4 Interferencia de Impurezas de los Metales	45
1.4.1 Aditivo Acelerante de la Cianuración	45

1.4.2	Inhibidores por consumo de Oxígeno	46
1.4.3	Inhibidores por consumo de Cianuro	46
1.4.4	Inhibidores por consumo doble de cianuro y oxígeno	47
1.4.5	Pasivación superficial de la Interfase de Reacción	48

CAPITULO II

EFFECTO DEL NITRATO DE PLOMO EN LA CIANURACION

2.1	Efecto del Nitrato de Plomo	49
2.2	Comportamiento Anódico del Oro en Soluciones Cianuradas que contienen Nitrato de Plomo	51
2.3	Efecto de la Concentración de Cianuro	52
2.4	Efecto del pH	53

CAPITULO III

PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1	Características del mineral	58
3.1.1	Mineralogía	58
3.2	Pruebas de Laboratorio de Investigaciones Metalúrgicas	61
3.2.1	Prueba Sin Adición de Nitrato de Plomo	64
3.2.2	Pruebas Preliminares a Diferente adición de Nitrato de Plomo	67
3.2.3	Prueba Con Adición de Nitrato de Plomo	70

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados Obtenidos 73

4.2 Efecto en la Operación de Planta Beneficio 75

CONCLUSIONES 78

BIBLIOGRAFIA 80

ANEXOS 83

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Diagrama de especies del cianuro y cianuro	17
Figura 1.2: Diagrama Eh-pH para el sistema CN-H ₂ O a 25° C	18
Figura 1.3: Diagrama Eh-pH para el sistema Au-CN a 25° C.	21
Figura 1.4: Corriente vs. Curvas de potencial para la oxidación del oro.	22
Figura 1.5: Representación esquemática de la celda de corrosión.	27
Figura 1.6: Diagrama esquemático simplificado del modelo de potencial mixto para la disolución del oro en soluciones de cianuro.	33
Figura 1.7: Datos electroquímicos para la oxidación anódica de la plata y el oro.	35
Figura 1.8: Efecto de la concentración de cianuro en la velocidad de disolución del oro y la plata.	36
Figura 1.9: Velocidad de disolución del oro en el disco-efecto	37
Figura 1.10: Efecto de la temperatura en la velocidad de disolución del oro	40
Figura 1.11: Efecto de la temperatura en la recuperación del oro	42
Figura 2.1: Efecto de la adición de iones de plomo	50
Figura 2.2: Efecto de las adiciones de nitrato de plomo sobre las características de polarización anódica del oro.	52
Figura 2.3: Efecto de la concentración de NaCN y una adición de plomo en las densidades de corriente anódica.	53
Figura 2.4: Efecto del pH sobre las densidades de corriente.	54
Figura 2.5: Curvas de polarización anódica del oro y plomo en soluciones de cianuro.	56

Figura 2.6: Curvas Potenciostático de polarización para el oro en soluciones de cianuro alcalinas con la adición de nitrato de plomo.	57
Figura 3.1: Se muestra al oro en forma de electrum incrustada en kustelita.	60
Figura 3.2: Se muestra inclusiones de oro en sulfosales de plata	60
Figura 3.3: Un amarre de pirita con SFAg, el sulfuro de hierro está muy relacionado al portador de plata.	61
Figura 3.4: Curva de Moliendabilidad	63
Figura 3.5: Cinética de recuperación de oro y plata sin nitrato de plomo.	66
Figura 3.6: Consumo de cianuro y cal, sin adición de nitrato de plomo.	66
Figura 3.7: Recuperación de Oro y Plata a diferente adición de Nitrato de Plomo	69
Figura 3.8: Cinética de recuperación de oro y plata, con nitrato de plomo	72
Figura 3.9: Consumo de cianuro y cal, con adición de nitrato de plomo.	72
Figura 4.1: Comparación de la cinética de recuperación de oro para las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de nitrato de plomo.	74
Figura 4.2: Comparación de la cinética de recuperación de la plata de las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de Nitrato de Plomo	74
Figura 4.3: Grafica comparativa del consumo de cianuro.	75
Figura 4.4: Efecto de los diversos cambios realizados desde la puesta en marcha de la planta (1998) en la recuperación de oro y plata.	76
Figura 4.5: Efecto en la cinética de cianuración del oro en la planta Beneficio desde la puesta en marcha (1998).	77

Figura 4.6: Efecto en la cinética de cianuración de la plata en la planta beneficio desde la puesta en marcha (1998).

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Propiedades de componentes simples del cianuro	16
Tabla 1.2 Concentración de equilibrio del oxígeno	35
Tabla 3.1 Mineralogía de Mina	59
Tabla 3.2 Proporción empleada para el compósito	62
Tabla 3.3 Composición Química del Mineral Compósito	62
Tabla 3.4 Datos Moliendabilidad, para tiempo de 10, 20 y 30 minutos.	63
Tabla 3.5 Condiciones iniciales de la prueba sin adición de NP	65
Tabla 3.6 Extracción de oro y plata, sin la adición de Nitrato de plomo	65
Tabla 3.7 Condiciones iniciales Prueba Preliminar con Nitrato de plomo	67
Tabla 3.8 Extracción de oro y plata a diferente adición de Nitrato de Plomo	68
Tabla 3.9 Consumo Promedio de reactivos a diferente adición de NP	68
Tabla 3.10 Condiciones iniciales de la prueba con adición de NP	71
Tabla 3.11 Extracción de oro y plata, con adición de Nitrato de plomo	71

RESUMEN

El presente informe considera las condiciones de cianuración de una planta de tratamiento de minerales de oro y plata por el proceso de cianuración por agitación, y su mejoramiento en la cinética de disolución del oro y menor consumo de reactivos.

La presencia de impurezas en soluciones de cianuro puede acelerar o retardar la disolución de oro. Se encontró que las especies de plomo en solución aumenta la velocidad de disolución de oro; en contraste con esto, las especies de sulfuro disminuyen la velocidad de disolución de oro y también contrarresta el efecto de aceleración de especies de plomo.

El nitrato de plomo forma una capa de hidróxido en las partículas de pirita, lo cual reduce la velocidad de reacción con el cianuro. La disolución de la pirita genera una capa de azufre en el oro pasivando su superficie. Esta capa es de menor importancia en presencia del plomo. En el caso del oro, la adición de nitrato de plomo es inhibir parcialmente la formación de la capa de azufre.

Los resultados indican que para que la estrategia de agregar nitrato de plomo sea óptima debería realizarse en función de la comparación mineralógica del mineral. La formación de una capa pasiva en las partículas de oro tiene una influencia significativa en las etapas iniciales de la cianuración. La incorporación de nitrato de plomo disminuye notablemente este efecto inhibitor. En este caso, el tratamiento con nitrato de plomo a 300 g/t, tuvo un efecto significativo especialmente en la recuperación de la plata que aumentó en 5.50 unidades porcentuales y la de oro en 2.16 unidades porcentuales.

ABSTRACT

This report considers the conditions cyanidation plant treating gold and silver ores by the cyanidation process by stirring, and improvement in the gold dissolution kinetics and reduced reagent consumption.

The presence of impurities in cyanide solutions can accelerate or retard the dissolution of gold. It was found that the lead species in solution increases the rate of dissolution of gold in contrast; the sulfide species decreases the dissolution rate of gold and also counteracts the acceleration of lead species.

Lead nitrate hydroxide forms a layer in the pyrite particles, which reduces the rate of reaction with the cyanide. Dissolution of pyrite produces a layer of sulfur in gold passivating surface. This layer is of minor importance in the presence of lead. In the case of gold, lead nitrate addition is partially inhibiting the formation of the sulfur layer.

The results indicate that the strategy of adding lead nitrate should be made optimal according to the comparison of the ore mineralogy. Forming a passive layer on the gold particles has a significant influence on the initial stages of cyanidation. Incorporating lead nitrate significantly decreases this inhibitory effect. In this case, treatment with lead nitrate to 300 g / t, had a significant effect especially in the recovery of silver which increased 5.50 percentage units gold and 2.16 percentage units.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
Objetivo	13
Justificación	13
CAPITULO I	
ASPECTOS GENERALES DE LA CIANURACION DE ORO Y PLATA POR AGITACIÓN	
1.1 Generalidades del Proceso de cianuración de Oro y Plata	14
1.2 Química de las soluciones cianuradas	15
1.3 Mecanismos de Disolución del Oro en Soluciones de Cianuro	19
1.3.1 Reacción Anódica	20
1.3.2 Reacción Catódica	23
1.3.3 Reacción de Disolución Total	25
1.3.4 Cinética de Reacción	26
1.3.5 Factores que afectan la velocidad de Disolución del Oro	26
1.3.5.1 Concentración de Cianuro y Oxígeno Disuelto	27
1.3.5.2 Temperatura	39
1.3.5.3 pH	40
1.3.5.4 Área de la Superficie	43
1.3.5.5 Agitación	43
1.4 Interferencia de Impurezas de los Metales	45
1.4.1 Aditivo Acelerante de la Cianuración	45

1.4.2	Inhibidores por consumo de Oxígeno	46
1.4.3	Inhibidores por consumo de Cianuro	46
1.4.4	Inhibidores por consumo doble de cianuro y oxígeno	47
1.4.5	Pasivación superficial de la Interfase de Reacción	48

CAPITULO II

EFFECTO DEL NITRATO DE PLOMO EN LA CIANURACION

2.1	Efecto del Nitrato de Plomo	49
2.2	Comportamiento Anódico del Oro en Soluciones Cianuradas que contienen Nitrato de Plomo	51
2.3	Efecto de la Concentración de Cianuro	52
2.4	Efecto del pH	53

CAPITULO III

PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1	Características del mineral	58
3.1.1	Mineralogía	58
3.2	Pruebas de Laboratorio de Investigaciones Metalúrgicas	61
3.2.1	Prueba Sin Adición de Nitrato de Plomo	64
3.2.2	Pruebas Preliminares a Diferente adición de Nitrato de Plomo	67
3.2.3	Prueba Con Adición de Nitrato de Plomo	70

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados Obtenidos	73
4.2 Efecto en la Operación de Planta Beneficio	75

CONCLUSIONES	78
---------------------	----

BIBLIOGRAFIA	80
---------------------	----

ANEXOS	83
---------------	----

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Diagrama de especies del cianuro y cianuro	17
Figura 1.2: Diagrama Eh-pH para el sistema CN-H ₂ O a 25° C	18
Figura 1.3: Diagrama Eh-pH para el sistema Au-CN a 25° C.	21
Figura 1.4: Corriente vs. Curvas de potencial para la oxidación del oro.	22
Figura 1.5: Representación esquemática de la celda de corrosión.	27
Figura 1.6: Diagrama esquemático simplificado del modelo de potencial mixto para la disolución del oro en soluciones de cianuro.	33
Figura 1.7: Datos electroquímicos para la oxidación anódica de la plata y el oro.	35
Figura 1.8: Efecto de la concentración de cianuro en la velocidad de disolución del oro y la plata.	36
Figura 1.9: Velocidad de disolución del oro en el disco-efecto	37
Figura 1.10: Efecto de la temperatura en la velocidad de disolución del oro	40
Figura 1.11: Efecto de la temperatura en la recuperación del oro	42
Figura 2.1: Efecto de la adición de iones de plomo	50
Figura 2.2: Efecto de las adiciones de nitrato de plomo sobre las características de polarización anódica del oro.	52
Figura 2.3: Efecto de la concentración de NaCN y una adición de plomo en las densidades de corriente anódica.	53
Figura 2.4: Efecto del pH sobre las densidades de corriente.	54
Figura 2.5: Curvas de polarización anódica del oro y plomo en soluciones de cianuro.	56

Figura 2.6: Curvas Potenciostático de polarización para el oro en soluciones de cianuro alcalinas con la adición de nitrato de plomo.	57
Figura 3.1: Se muestra al oro en forma de electrum incrustada en kustelita.	60
Figura 3.2: Se muestra inclusiones de oro en sulfosales de plata	60
Figura 3.3: Un amarre de pirita con SFAg, el sulfuro de hierro está muy relacionado al portador de plata.	61
Figura 3.4: Curva de Moliendabilidad	63
Figura 3.5: Cinética de recuperación de oro y plata sin nitrato de plomo.	66
Figura 3.6: Consumo de cianuro y cal, sin adición de nitrato de plomo.	66
Figura 3.7: Recuperación de Oro y Plata a diferente adición de Nitrato de Plomo	69
Figura 3.8: Cinética de recuperación de oro y plata, con nitrato de plomo	72
Figura 3.9: Consumo de cianuro y cal, con adición de nitrato de plomo.	72
Figura 4.1: Comparación de la cinética de recuperación de oro para las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de nitrato de plomo.	74
Figura 4.2: Comparación de la cinética de recuperación de la plata de las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de Nitrato de Plomo	74
Figura 4.3: Grafica comparativa del consumo de cianuro.	75
Figura 4.4: Efecto de los diversos cambios realizados desde la puesta en marcha de la planta (1998) en la recuperación de oro y plata.	76
Figura 4.5: Efecto en la cinética de cianuración del oro en la planta Beneficio desde la puesta en marcha (1998).	77

Figura 4.6: Efecto en la cinética de cianuración de la plata en la planta beneficio desde la puesta en marcha (1998).

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Propiedades de componentes simples del cianuro	16
Tabla 1.2 Concentración de equilibrio del oxígeno	35
Tabla 3.1 Mineralogía de Mina	59
Tabla 3.2 Proporción empleada para el compósito	62
Tabla 3.3 Composición Química del Mineral Compósito	62
Tabla 3.4 Datos Moliendabilidad, para tiempo de 10, 20 y 30 minutos.	63
Tabla 3.5 Condiciones iniciales de la prueba sin adición de NP	65
Tabla 3.6 Extracción de oro y plata, sin la adición de Nitrato de plomo	65
Tabla 3.7 Condiciones iniciales Prueba Preliminar con Nitrato de plomo	67
Tabla 3.8 Extracción de oro y plata a diferente adición de Nitrato de Plomo	68
Tabla 3.9 Consumo Promedio de reactivos a diferente adición de NP	68
Tabla 3.10 Condiciones iniciales de la prueba con adición de NP	71
Tabla 3.11 Extracción de oro y plata, con adición de Nitrato de plomo	71

INTRODUCCIÓN

Aunque el proceso de cianuración se ha aplicado durante casi 100 años, las interacciones de oro con sustancias extrañas en soluciones de cianuro son aún poco conocidos. Desde un punto de vista termodinámico, la cianuración del oro parece ser engañosamente sencilla con sólo cianuro como complejante y el oxígeno como oxidante involucrados.

A pesar de algunos indicios del probable comportamiento de otros componentes en el mineral, que están típicamente presentes en cantidades mayores que el oro, y su influencia en la lixiviación del oro se puede conseguir a partir de los datos termodinámicos, ninguna predicción de sus efectos sobre la lixiviación de oro es posible sin el conocimiento de la cinética de las reacciones implicadas.

La optimización del efecto de las variables en la cianuración del oro ha sido abordada con frecuencia, esto es para mejorar el procesamiento del oro. Sus resultados han sido diversos en función de las condiciones de funcionamiento y la composición mineralógica de los minerales de oro. Para ello, se han realizado

esfuerzos para dilucidar el papel de las variables significativas en la cianuración del oro y de desarrollar una estrategia eficaz de utilización de los reactivos para las plantas de procesamiento de oro. Los estudios de laboratorio que involucran dos casos de minerales refractarios leves se presentan y discuten por delinear la relación de la concentración de cianuro libre, el nivel de oxígeno disuelto y la adición de nitrato de plomo, y su efecto sobre la velocidad de disolución de oro y el consumo de cianuro.

Algunas veces se obtienen pobres resultados en la cianuración cuando minerales sulfurosos están presentes en los minerales de oro. La incorporación de nitrato de plomo a la lechada, con o sin oxígeno, incentiva la extracción y reduce el consumo de cianuro.

El conocimiento del efecto del plomo o del nitrato de plomo en las superficies del oro y los sulfuros aún no está totalmente definido.

De manera indirecta, mediante observaciones electroquímicas, se llegó a la conclusión de que la presencia del plomo en la superficie del oro se presenta de dos maneras. La primera, debía ser metal de plomo, que catalizaba la velocidad de disolución del oro. La segunda forma era un tipo de película de hidróxido de plomo, que retardaba dicha velocidad.

El efecto de los minerales sulfurosos en la disolución del oro es de pasivar su superficie retardando la disolución del oro por lo que para aliviar el efecto negativo de los minerales sulfurosos es común el uso del oxígeno.

Objetivo General

Mejorar la cinética de disolución del oro en presencia de nitrato de plomo así como obtener un mayor porcentaje de extracción de oro y plata en el proceso de cianuración en tanques de agitación.

Justificación

Lograr una mayor recuperación de oro en la cianuración por agitación en tanques es el objetivo principal de empresas mineras debido a su gran valor comercial. Por tal razón muchas de estas empresas dedican tiempo y dinero en desarrollar mecanismos que mejoren su recuperación, además de mejorar la optimización de los recursos empleados.

En la cianuración de oro se presentan minerales denominados cianicidas que aumentan el consumo de cianuro durante el proceso además pasivan la superficie del oro retardando su disolución. Por tal razón se implementó el uso de reactivos tales como nitrato de plomo, para poder mejorar la recuperación en el proceso.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA CIANURACION DE ORO Y PLATA POR AGITACIÓN

1.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE CIANURACIÓN DE ORO Y PLATA

El oro y la plata presentan mecanismos de disolución por cianuración que son muy parecidas entre sí. Dado que ambos suelen presentarse acompañados entre sí en la naturaleza, no resulta extraño que la química de recuperación sea semejante.

En el contexto de la extracción del oro, la lixiviación es la disolución de un metal o un mineral en un líquido. La reacción de principal interés es la disolución del oro en soluciones acuosas, las cuales requieren tanto un complejante como un oxidante para alcanzar velocidades de lixiviación aceptables. Solamente un número limitado de ligandos forman complejos de estabilidad suficientes para su uso en los procesos de extracción de oro. El cianuro es utilizado universalmente debido a su costo relativamente bajo, su gran efectividad para la disolución del oro (y plata) y su selectividad para el oro y plata en lugar de otros metales. Además, a pesar del interés en la toxicidad del

cianuro, este puede aplicarse con un riesgo menor en la salud y el medio ambiente. El oxidante más comúnmente utilizado en la lixiviación con cianuro es el oxígeno, suministrado por el aire, el cual contribuye con el atractivo del proceso.

Los esquemas sin el uso del reactivo cianuro tienen las siguientes ventajas potenciales sobre el cianuro:

- Las presiones ambientales, y en algunos casos las restricciones, pueden dificultar la aplicación del cianuro en ciertos lugares.
- Algunos tienen una cinética más rápida de lixiviación del oro
- Algunos pueden aplicarse en medios ácidos, los cuales pueden ser más adecuados para el tratamiento de minerales refractarios
- Algunos son más selectivos que el cianuro para el oro y plata, en lugar de otros metales (p.e. el cobre)

Sin embargo, pueden tener también algunas desventajas significativas, y ninguno parece ser muy aplicable, al menos sin mayores mejoras significativas.

1.2 QUÍMICA DE LAS SOLUCIONES CIANURADAS

Las sales simples de cianuro (como el sodio, potasio, y cianuro de calcio) se disuelven y ionizan en agua para formar los respectivos cationes de metal e iones de cianuro libres, como se muestra en:

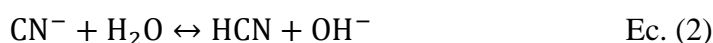


La solubilidad y contenido relativo del cianuro de las diversas sales de cianuro se presentan en la **Tabla 1.1**. Las tres sales han sido utilizadas eficazmente a escala comercial como fuentes de cianuro para la lixiviación. El cianuro de sodio y el cianuro de potasio son más fácilmente solubles que el cianuro de calcio, y por lo general están disponibles en una forma más pura, lo cual tiene ventajas para la manipulación y distribución del reactivo en los sistemas de lixiviación. El cianuro de sodio líquido (es decir, en soluciones acuosas), que está ampliamente disponible en algunas regiones del mundo, evita la necesidad de disolver el reactivo in situ, reduciendo así los requerimientos del proceso. De esta manera, la elección del tipo de cianuro depende del método de aplicación, costo y su disponibilidad.

Tabla 1.1: Propiedades de componentes simples del cianuro [13]

Componente	Cianuro disponible (%)	Solubilidad en agua a 25° C (g/100 cc)
NaCN	53.1	40
KCN	48.0	50
Ca(CN)₂	56.5	Se descompone

Los iones de cianuro se hidrolizan en agua para formar iones moleculares de cianuro de hidrógeno (HCN) e hidroxilo (OH⁻), con el correspondiente incremento en pH:



El cianuro de hidrógeno es un ácido débil que no se disocia por completo en agua de la siguiente manera:



La **Figura 1.1** muestra el alcance de dicha reacción de disociación en equilibrio como una función del pH. En una escala aproximada de pH 9.3, la mitad del cianuro total existe como cianuro de hidrógeno, y la otra mitad, como iones de cianuro libre. A un pH 10.2, más del 90% del cianuro total está presente como cianuro libre (CN^-), mientras que a pH 8.4, más del 90% existe como cianuro de hidrógeno. Esto es importante debido a que el cianuro de hidrógeno tiene una presión de vapor relativamente alta (100 kPa a 26°C); por consiguiente, se volatiliza más fácil en la superficie líquida en condiciones ambientales, causando una pérdida de cianuro de la solución. La velocidad de volatilización depende de la concentración de cianuro de hidrógeno (una función de la concentración de cianuro total y pH), área de la superficie y profundidad del líquido, la temperatura, y el fenómeno de transferencia asociado con la mezcla. Como resultado, la mayoría de sistemas de lixiviación con cianuro se operan a un pH que minimice la pérdida de cianuro, por lo general, por encima de pH 10; aunque los efectos adversos pueden causar un pH excesivamente alto.

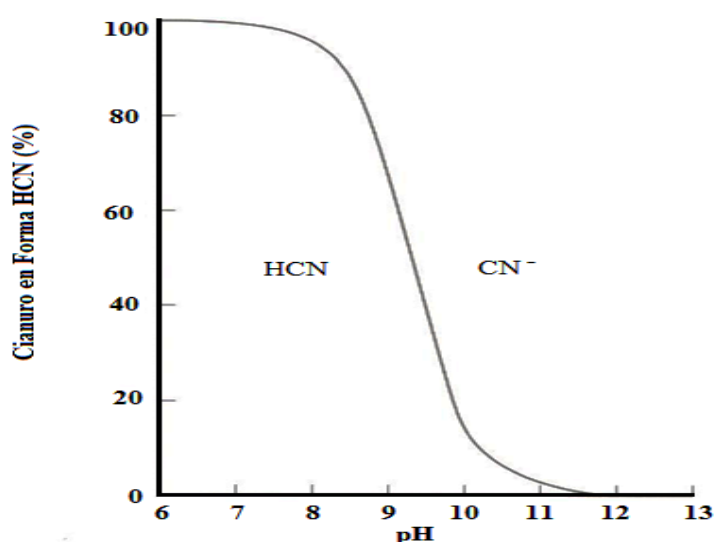
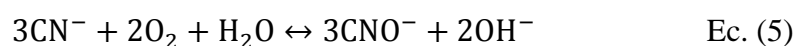
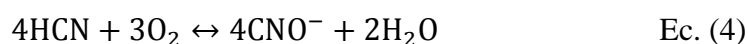


Figura 1.1: Diagrama de especies del cianuro y cianuro de hidrógeno en soluciones acuosas como una función del pH.

Tanto el cianuro de hidrógeno como el cianuro libre pueden oxidarse a cianato en presencia del oxígeno, y bajo las condiciones de oxidación adecuadas, como se muestra en el diagrama Eh-pH para el sistema CN-H₂O, dado en la **Figura 1.2**. Las reacciones importantes son de la siguiente manera:



Dichas reacciones son indeseables durante la lixiviación ya que reducen la concentración de cianuro libre; además, las especies de cianato formadas no disuelven el oro.

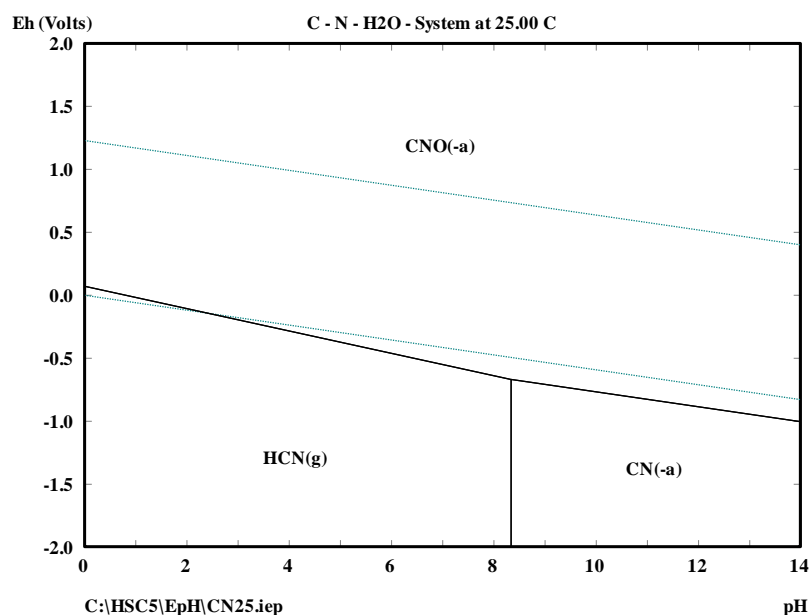


Figura 1.2: Diagrama Eh-pH para el sistema CN-H₂O a 25° C

La **Figura 1.2** indica que la oxidación del cianuro a cianato debe producirse espontáneamente con oxígeno; pero la reacción es muy baja y, en la práctica, se requieren agentes oxidantes fuertes como el ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) o ácido hipocloroso (HOCl) para que la reacción proceda a una velocidad considerable.

En soluciones cianuradas aireadas, la reacción es extremadamente baja, pero puede acelerarse mediante la acción de la luz ultravioleta, el calor, las bacterias y catalizadores como el dióxido de titanio, óxido de zinc y sulfuro de cadmio.

La constante de estabilidad para el ion complejo Au(CN)₂⁻ en solución acuosa ha sido estimada en 10³⁹, asumiendo la siguiente reacción:



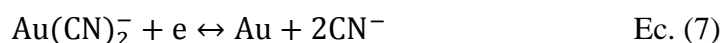
La oxidación del Au(CN)₂⁻ por medio de un halogenuro ocurre fácilmente, dando origen al ion Au(CN)₂X₂⁻, donde X podría ser Cl, I, o Br.

1.2 MECANISMOS DE DISOLUCIÓN DEL ORO EN SOLUCIONES DE CIANURO

Conocer el mecanismo exacto de disolución de oro y plata, en una solución cianurada, es considerablemente importante, debido a las numerosas reacciones que tienen lugar en la disolución del metal precioso en soluciones aireadas de cianuro las cuales algunas veces causan un consumo no deseado de cianuro y cal, y a la complejidad de los procesos químicos envueltos.

1.3.1 Reacciones anódicas

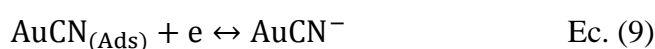
En una solución cianurada alcalina acuosa, el oro es oxidado y se disuelve para formar el complejo cianurado Au (I), $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, como se muestra en el diagrama Eh-pH, **Figura 1.3**. El complejo cianurado Au (III), también es formado, pero el complejo Au (I) es más estable que las especies Au (III) por 0.5 V. Para propósitos prácticos, puede asumirse que la estequiometría de la reacción de disolución es:



Para la que la ecuación de Nernst es:

$$E = -0.06 + 0.118\text{p}(\text{CN}) + 0.059 \log_{\text{Au}(\text{CN})_2^-} a \quad \text{Ec. (8)}$$

La voltametría cíclica ha sido utilizada para estudiar el mecanismo de disolución del oro. La oxidación procede en tres etapas, como se indica mediante los tres picos mostrados en la **Figura 1.4**. El pico a aproximadamente -0.4 V probablemente representa la formación de una especie intermedia adsorbida, $\text{AuCN}_{(\text{Ads})}$, la cual causa una pasivación temporal de la superficie del oro:



El segundo pico a aproximadamente 0.3 V se atribuye a la reacción de acomplejamiento entre el cianuro libre y la especie intermedia adsorbida $\text{AuCN}_{(\text{Ads})}$:

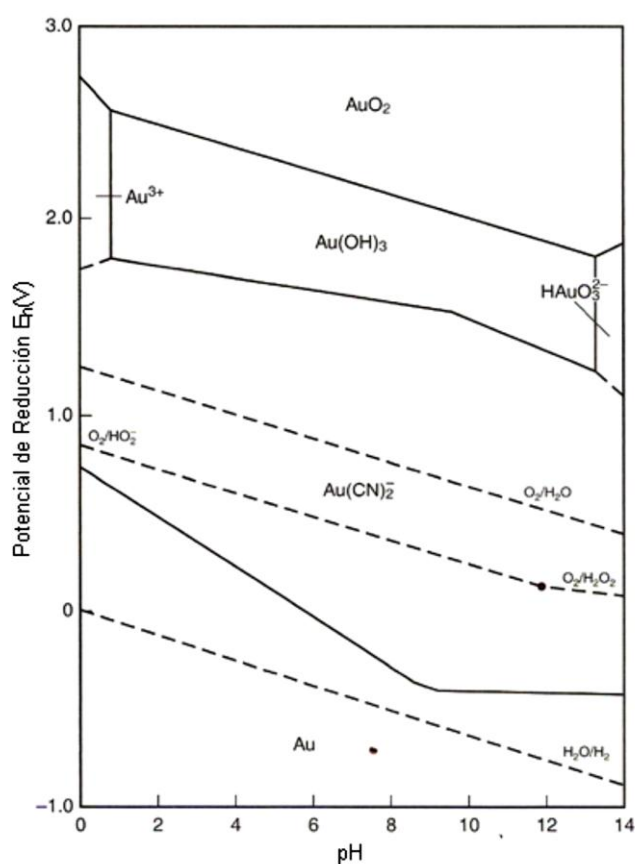
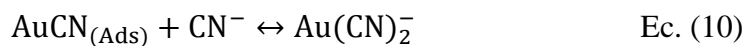


Figura 1.3: Diagrama Eh-pH para el sistema Au-CN a 25° C.

En el tratamiento de minerales y concentrados con soluciones cianuradas alcalinas, raramente se produce pasivación del oro (incluso a bajas concentraciones de cianuro), probablemente debido a la presencia de bajas concentraciones de iones metálicos pesados (plomo y mercurio), disueltas a

partir del material de alimentación o introducidas con reactivos que interrumpen la formación de dicha capa de pasivación.

Se cree que el pico final de 0.6 a 0.7 V se produce por la formación de una capa de óxido Au (III), Au_2O_3 , la cual pasiva la superficie del oro. Sin embargo, es poco probable que dicha pasivación sea un problema en la práctica ya que se producen potenciales altamente positivos requeridos.

La formación de especies intermedias adsorbidas (y la pasivación asociada), el efecto beneficioso del plomo (y otros cationes divalentes) y la pasivación debido a la formación de la capa de óxido han sido confirmadas utilizando el espectrómetro de Raman de superficie mejorada (SERS) para estudiar la superficie del oro durante la cianuración.

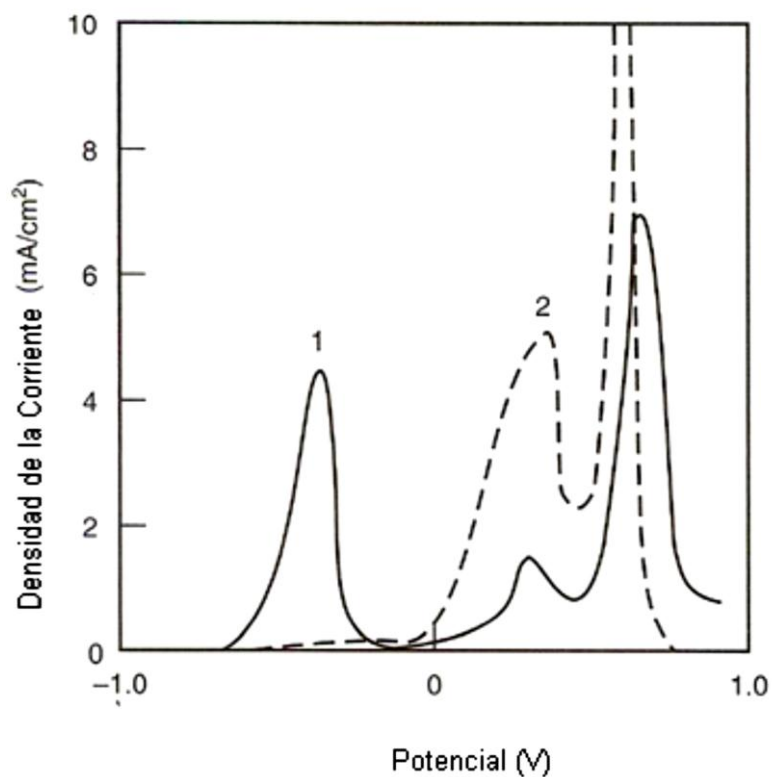


Figura 1.4: Corriente vs. Curvas de potencial para la oxidación del oro en soluciones cianuradas alcalinas: (1) 0.077 M de CN^- , pH 12; (2) 0.1 M de CN^- , 0.1 M de OH^- [11]

1.3.2 Reacciones catódicas

En una solución cianurada alcalina aireada, la reacción anódica de disolución mostrada en la Ecuación (7) está acompañada por la reducción catódica del oxígeno. El mecanismo de dicha reacción ha sido controversial e implica varias reacciones catódicas paralelas y de series. La investigación experimental de la estequiometría de disolución del oro ha demostrado que la reacción principal es la siguiente:



Donde:

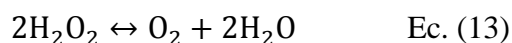
$$E = 0.682 - 0.059\text{pH} - 0.0295\text{pO}_2$$

El peróxido de hidrógeno formado es un fuerte agente oxidante, que puede formar parte en posteriores reacciones de oxidación:



El efecto del peróxido de hidrógeno en la velocidad de lixiviación del oro en la solución cianurada alcalina es un tema de controversia y debate. Primeros estudios indican que la reducción del peróxido de hidrógeno en las superficies del oro se dificulta cinéticamente; la velocidad de disolución del oro en las soluciones libres de oxígeno que contienen peróxido de hidrógeno es muy baja. Este trabajo brinda evidencia de la pasivación de la superficie del oro mediante

la formación de capas de óxido, que inhiben la lixiviación del oro. Por otra parte, el peróxido de hidrógeno se descompone en oxígeno y agua, dando así oxígeno disuelto en la solución, como sigue:



Se ha demostrado que hasta un 85% del peróxido de hidrógeno formado mediante la reducción del oxígeno (Ecuación [11]) se difunde fuera del lugar de la reacción, con sólo una pequeña proporción reducida directamente de los iones de hidroxilo.

Otros estudios han indicado que el peróxido de hidrógeno puede jugar un papel directo. Una investigación ha demostrado que para el oro puro, la velocidad de lixiviación puede incrementarse significativamente utilizando una concentración de 0.015 M de en una solución que contiene 0.01 M de NaCN a un pH 10. Sin embargo, este estudio mostró que pequeñas cantidades de peróxido de hidrógeno (es decir, <0.0025 M) inhibieron la velocidad de disolución del oro, y el uso de peróxido de hidrógeno a escalas mayores de pH (es decir, >11) también redujeron la velocidad de disolución del oro, debido al incremento de la oxidación del cianuro y la disminución de la concentración de cianuro.

Por consiguiente, en general el peróxido de hidrógeno solo no es considerado un oxidante efectivo para el uso en lixiviación del oro, excepto bajo las condiciones donde el oxígeno disuelto es limitado (p.e. a gran altitud o en presencia de consumidores importantes de oxígeno en el mineral).

El peróxido de hidrógeno es muy efectivo para la oxidación de sulfuros, aunque es costoso para este propósito. No obstante, ha sido utilizado con éxito en algunos casos para acelerar la cinética de oxidación a baja presión (atmosférica).

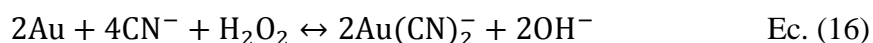
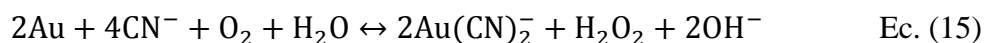
Finalmente, el oxígeno puede reducirse directamente a iones hidróxido, en lugar de H_2O_2 (Ecuación [11]), como se ve en:



Esta reacción requiere un alto sobrepotencial y es muy baja, pero se produce en paralelo a la ecuación (11) a un alcance limitado.

1.3.3 Reacción de disolución total

La disolución total del oro en soluciones cianuradas alcalinas aireadas, considerando tanto semi reacciones anódicas como catódicas, es descrita más precisamente mediante las siguientes ecuaciones de reacción, que proceden en paralelo:



Las principales reacciones se ilustran esquemáticamente en la **Figura 1.5**. La ecuación propuesta por Elsner:



es estequiométricamente correcta, pero no describe completamente las reacciones catódicas asociadas a la disolución.

1.3.4 Cinética de la Reacción

Se discuten a profundidad en las siguientes secciones los principales factores que afectan la velocidad de disolución del oro, concretamente las concentraciones de cianuro y oxígeno, temperatura, pH, área de la superficie del oro expuesto, grado de agitación y transferencia de masa, pureza del oro y la presencia de otros iones en solución.

1.3.5 Factores que afectan la Velocidad de Disolución del Oro.

Entre los principales factores que afectan la velocidad de disolución del oro, tenemos los siguientes:

- Concentración de Cianuro y Oxígeno Disuelto
- Temperatura
- pH
- Área de la superficie
- Agitación

1.3.5.1 Concentración de Cianuro y Oxígeno Disuelto

Considerando la reacción general de disolución del oro en la Ecuación (15), es evidente que un mol de oro requiere la mitad de un mol de oxígeno y dos moles de cianuro para la disolución; dependiendo de la efectividad de la reducción del peróxido de hidrógeno; y la reacción principal es un proceso de dos electrones (**Figura 1.5**).

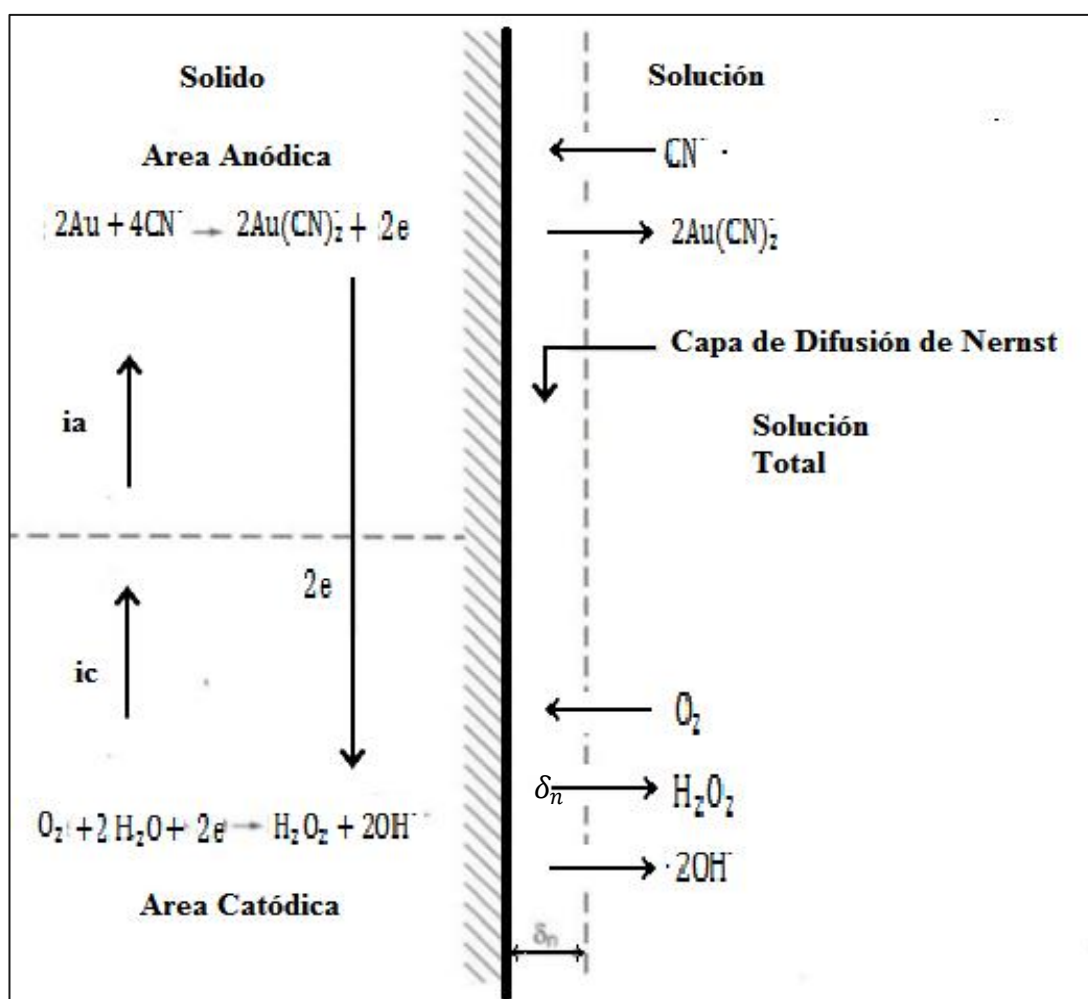


Figura 1.5: Representación esquemática de la celda de corrosión local a una superficie de oro en contacto con una solución de cianuro que contiene oxígeno: i_c = corriente anódica; i_a = corriente catódica

La condición limitada por la velocidad se produce cuando las velocidades de difusión del cianuro y el oxígeno son iguales; es decir, cualquier especie con una velocidad de difusión baja proporcionará el factor limitado por la velocidad.

A un potencial mixto (E_m), la corriente que surge de las reacciones catódicas (i_c) es igual y opuesta a la corriente anódica (i_a), como se muestra en la **Figura 1.6**.

Las suposiciones básicas de esta teoría de transferencia de masa son las siguientes:

- Existe una capa límite de líquido, que no se mueve en la superficie de la partícula, a través de la cual ocurre la transferencia de masa solo por difusión.
- El gradiente de concentración a través de la capa límite es aproximadamente lineal; y
- El cuerpo del líquido, excluyendo la capa límite, tiene una composición uniforme.

Para el desarrollo de esta ecuación se parte de la aplicación de la ley de Fick para la difusión del oxígeno y del cianuro hacia la superficie del oro-interfase- bajo condiciones de estado estacionario y según lo descrito en la **Figura 1.5**, lo que nos da:

$$\frac{d(P_{O_2})}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} * A_1 \{ (P_{O_2})_i - (P_{O_2})_l \} \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} * A_2 \{ (CN^-)_i - (CN^-)_l \} \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde:

- D_{O_2} y D_{CN^-} , son los coeficientes de difusión del O_2 y CN^- , respectivamente.
- $\frac{d(P_{O_2})}{dt}$ y $\frac{d(CN^-)}{dt}$, son las velocidades de difusión de los iones de O_2 y CN^- , respectivamente.
- $(P_{O_2})_i$ y $(P_{O_2})_l$ son las presiones parciales de O_2 en el seno de la solución y la interfase con el sólido respectivo.
- $(CN^-)_i$ y $(CN^-)_l$ son las concentraciones del ion CN^- en el seno de la solución y la interfase, respectivamente.
- A_1 y A_2 son las áreas superficiales en las cuales ocurren las reacciones catódicas y anódicas, respectivamente;
- δ es el espesor de la capa límite y
- t es el tiempo.

Para el caso de control difusional (en que la difusión es el mecanismo limitante o el paso más lento), es posible asumir que las reacciones químicas en la superficie del oro son muy rápidas comparadas con las velocidades a las cuales los iones de oxígeno y cianuro se difunden a través de la capa límite. De esta forma, las concentraciones en la interfase del sólido pueden ser consideradas como cero. Más aun, inspeccionando las reacciones catódicas y anódicas en la **Figura 1.5** y la consecuentes reacción global, se puede ver que requiere 4 moles del ion

cianuro y un mol de oxígeno para disolver 2 moles de oro. Entonces la velocidad de disolución del oro estará dada por:

$$\text{Velocidad de Disolucion Au} = 2 \frac{d(P_{O_2})}{dt} = 2 \frac{D_{O_2}}{\delta} * A_1 (P_{O_2})_1 \quad \text{Ec. (20)}$$

$$\text{Velocidad de Disolucion Au} = \frac{1}{2} \frac{D[CN^-]}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad \text{Ec. (21)}$$

Además, en condiciones de estado estacionario la velocidad de la reacción catódica debe ser igual a la velocidad de reacción anódica, por lo tanto:

$$2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 (P_{O_2})_1 = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad \text{Ec. (22)}$$

La Ecuación (22) puede ser reescrita si consideramos que el área de interfase total, relevante para la disolución del oro, es $A=A_1+A_2$. Reemplazando en la expresión de la velocidad de disolución para el Oro, finalmente resulta:

$$V = \frac{2AD_{O_2}D_{CN^-}\{(CN^-)_1 (P_{O_2})_1\}}{\delta\{[4D_{O_2} (P_{O_2})_1]+D_{CN^-}[CN^-]_1\}} \quad \text{Ec. (23)}$$

Ahora bien, a bajas concentraciones de cianuro, la ecuación (23) puede ser simplificada así:

$$\text{Velocidad de Disolucion del Au} = \frac{1}{2} \frac{A D_{CN^-} (CN^-)_1}{\delta} \quad \text{Ec(24)}$$

La ecuación (24) señala que a bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solo de la concentración de cianuro, lo cual es apoyado por datos experimentales.

Por su parte, si la concentración de cianuro es alta la velocidad de disolución depende solo de la concentración de oxígeno, y la ecuación (23) es simplificada de esta forma:

$$\text{Velocidad de disolución del Au} = \frac{2AD_{O_2}(P_{O_2})_1}{\delta} \quad \text{Ec. (25)}$$

Cuando el proceso pasa desde control por difusión del cianuro a control por difusión de oxígeno, ambos reactantes debieran estar emigrando a la superficie del metal a sus máximas velocidades. Así podemos igualar las ecuaciones (24) y (25) justo para este punto de cambio del control difusional, desde el cianuro al oxígeno, momento en el que se cumplirá que:

$$D_{CN^-}(CN^-)_1 = 4D_{O_2}(P_{O_2})_1$$

Entonces, la velocidad límite máxima para la disolución del oro ocurre cuando:

$$\frac{D_{CN^-}(CN^-)_1}{D_{O_2}(P_{O_2})_1} = 4$$

O mejor.

$$\frac{(\text{CN}^-)_1}{(\text{P}_{\text{O}_2})_1} = 4 \frac{D_{\text{O}_2}}{D_{\text{CN}^-}} \quad \text{Ec. (26)}$$

Ahora bien se ha determinado que la difusión de la molécula de cianuro hacia la interfase es más dificultosa, primero, ya que al tener carga negativa tiende a asociarse en su movimiento con los protones presentes y segundo, por ser de un tamaño mayor que la del oxígeno. Entonces, no es extraño descubrir que la molécula de oxígeno, al ser un gas disuelto, presenta una movilidad mayor, cerca de 1.5 veces más rápida que la de cianuro. Por lo tanto, al medir experimentalmente los coeficientes de difusión respectivos, para 25°C, se tienen aproximadamente los siguientes valores:

$$D_{\text{O}_2} = 2.76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{\text{CN}^-} = 1.83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Es decir se mantiene la relación: $D_{\text{O}_2}/D_{\text{CN}^-} = 1.5$.

Entonces, reemplazamos estos valores en la ecuación (26) resulta que: la mayor velocidad para la disolución del oro ocurre cuando se cumple que las concentraciones del cianuro y del oxígeno disuelto se encuentran en una razón molar de aproximadamente seis.

$$\frac{[\text{CN}^-]}{(\text{P}_{\text{O}_2})} = 6$$

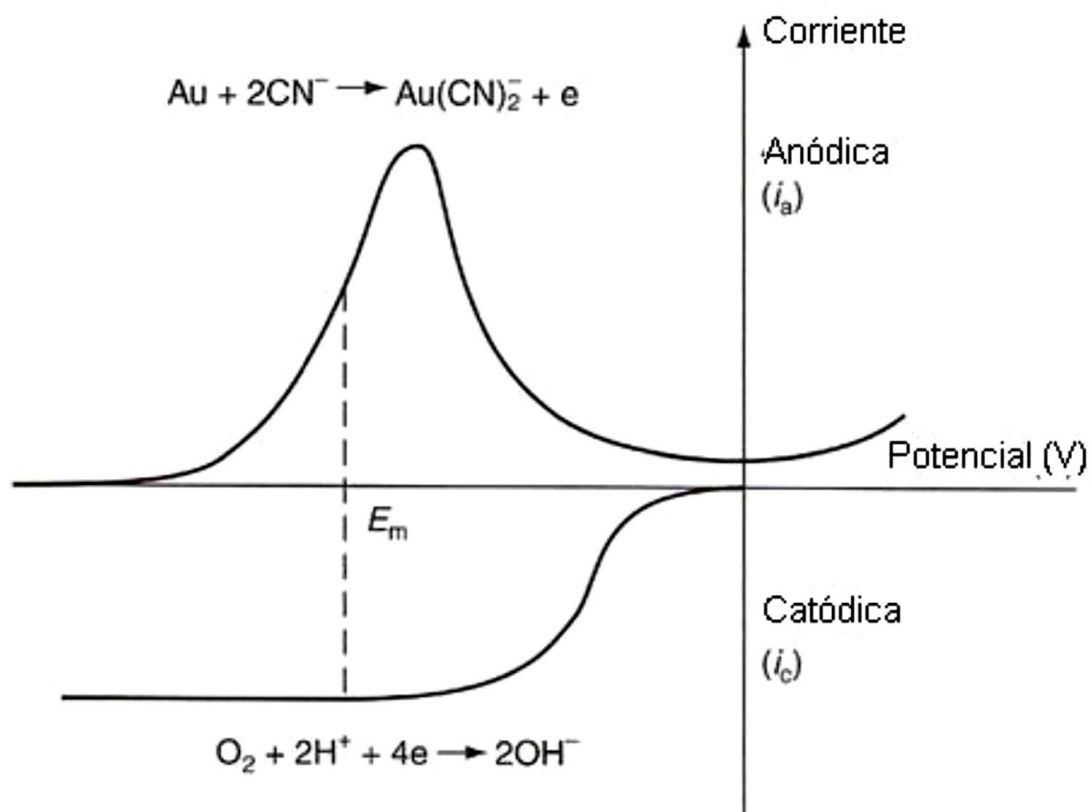


Figura 1.6: Diagrama esquemático simplificado del modelo de potencial mixto para la disolución del oro en soluciones de cianuro [11].

La **Figura 1.7** muestra las curvas corriente-potencial anódicas y catódicas, originalmente proporcionadas por el caso simple en la Figura 1.6, superpuestas en una escala de corriente común (es decir, utilizando valores absolutos para corrientes catódicas y anódicas) para el oro y la plata en varias concentraciones de cianuro.

Esto muestra las condiciones bajo las cuales la velocidad de disolución es limitada por transferencia de masa del cianuro, oxígeno y una combinación de ambos.

En soluciones cianuradas alcalinas aireadas, la velocidad de disolución es normalmente controlada por transferencia de masa, con valores de energía de activación de 8 a 20 kJ/mol registrados, y depende de la velocidad de difusión del cianuro, oxígeno o ambos a la superficie del oro.

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar mediante la adición de la solución cianurada concentrada o un compuesto de cianuro sólido.

Controlar la concentración del oxidante (oxígeno disuelto) no es tan fácil debido a la baja solubilidad del oxígeno en agua bajo condiciones atmosféricas. Por consiguiente, la velocidad máxima de disolución del oro para los procesos que utilizan aire para proveer oxígeno en solución está determinada por las condiciones de temperatura y presión, bajo las que opera el proceso.

A nivel del mar y a 25°C, la concentración saturada del oxígeno disuelto en solución es 8.2 mg/L. Este valor disminuye con el aumento de la altitud y la temperatura como se muestra en la **Tabla 1.2**.

La correspondiente concentración de cianuro, que brinda una velocidad de disolución máxima del oro en esta concentración de oxígeno, es aproximadamente 0.005%, o 0.002 M de CN^- , equivalente a 0.01% o 0.05 g/L de NaCN. Este está sustentado por observaciones prácticas, como se observa en la **Figura 1.8**, donde cerca a la velocidad de disolución de oro máxima (3 mg/in² /hr) se alcanza a 0.02% o 0.10 g/L de NaCN.

Tabla 1.2: Concentración de equilibrio del oxígeno disuelto (del aire conteniendo 21% de O_2) en agua a varias temperaturas y altitudes (valores en mg/L)

Temperatura	Nivel del mar (760 mm Hg)	Altitud de 914m (680 mm de Hg)	Altitud de 1,828 (610 mm de Hg)
0	14.6	13.1	11.7
5	12.8	11.4	10.3
10	11.3	10.1	9.1
15	10.1	9	8.1
20	9.1	8.2	7.3
25	8.3	7.3	6.6
30	7.5	6.7	6.1
35	7	6.2	5.6
40	6.5	5.7	5.2
45	6	5.3	4.8
50	5.6	4.9	4.5
60	4.8	4.2	3.8
70	3.9	3.4	3
80	2.9	2.4	2
90	1.7	1.1	0.7
100	0	0	0

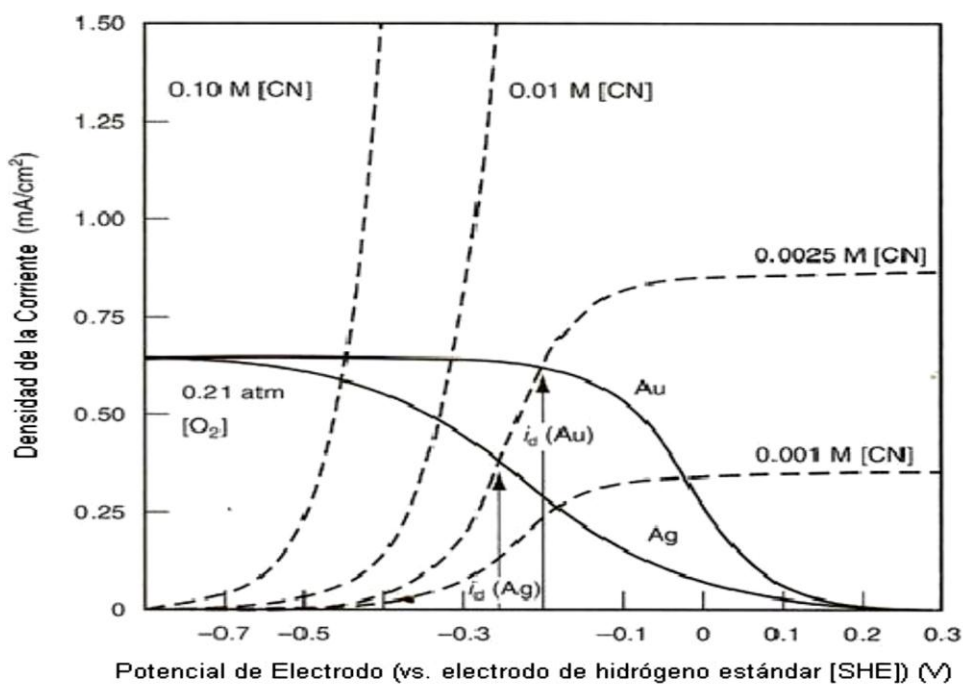


Figura 1.7: Datos electroquímicos para la oxidación anódica de la plata y el oro y la reducción catódica de O_2 en la plata y el oro, calculado de acuerdo a los modelos cinéticos mixtos [9].

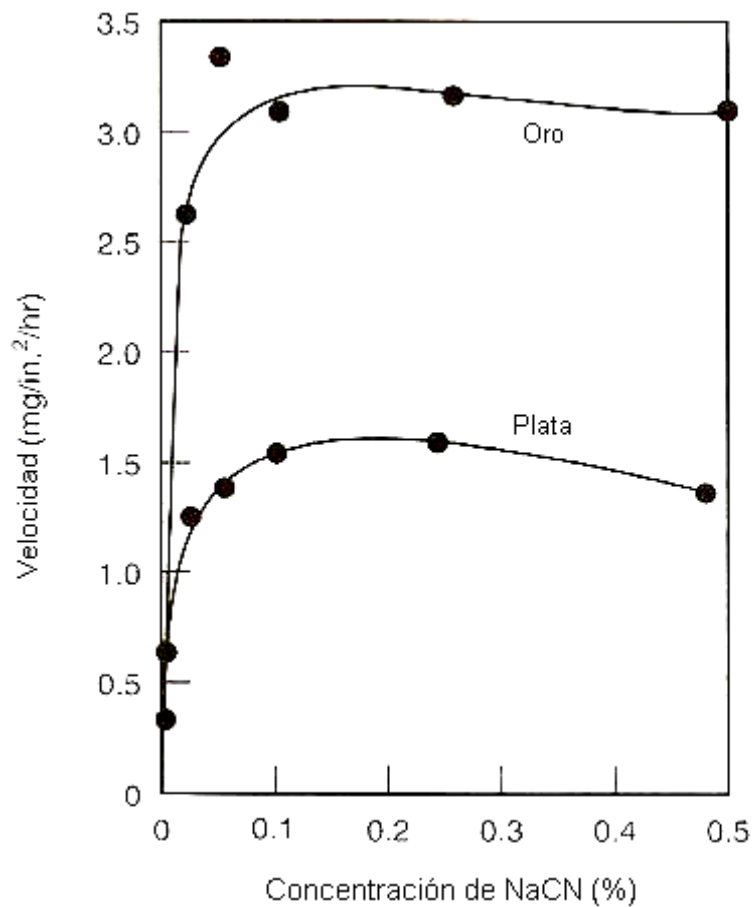


Figura 1.8: Efecto de la concentración de cianuro en la velocidad de disolución del oro y la plata. [2]

El efecto de la concentración de oxígeno disuelto en la velocidad de disolución de los discos de oro se muestra en la **Figura 1.9**. En este caso, las crecientes concentraciones de oxígeno disuelto aumentaron la velocidad de disolución hasta un máximo de 32 mg/L aplicado en las pruebas y en presencia de un exceso de cianuro libre.

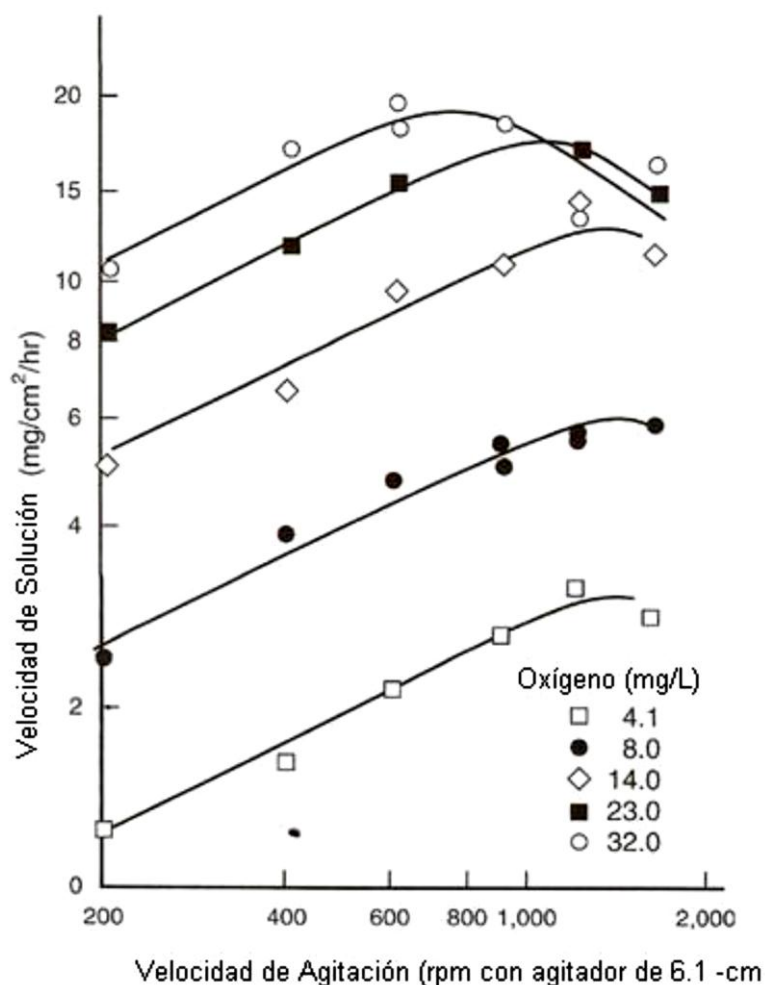


Figura 1.9: Velocidad de disolución del oro en el disco-efecto de la concentración y agitación del oxígeno. [4]

La concentración de oxígeno disuelto depende principalmente del contenido de oxígeno de la fase del gas en contacto con la pulpa o solución lixiviada, temperatura y altitud. La **Tabla 1.2** provee un equilibrio en la concentración de oxígeno disuelto en agua a varias temperaturas y a tres altitudes diferentes (nivel del mar, 914m y 1 828m). Esto demuestra que las concentraciones de oxígeno disponibles en la mayoría de operaciones de lixiviación del oro varían de 5mg/L aproximadamente a una gran altitud (1 828m) en un clima caliente a más de 10 mg/L a nivel del mar en temperaturas frescas (es decir 15°C).

En la práctica, existen dos métodos para incrementar la concentración de oxígeno disuelto por encima de la condición saturada de equilibrio:

- Operación bajo presión, utilizando el aire como oxidante
- Uso de oxígeno puro, aire enriquecido con oxígeno, peróxido de hidrógeno u otras fuentes de oxígeno para complementar o reemplazar el aire en la fase gaseosa.

Ambos métodos son costosos y frecuentemente solo pueden justificarse para el tratamiento de minerales que contienen cantidades importantes de especies consumidoras de oxígeno.

Se ha sugerido que las altas concentraciones de oxígeno disuelto (p.e. >20 mg/L) pueden causar la pasivación de la superficie del oro debido a la formación de capas de óxido. En algunas condiciones, se ha demostrado que la pasivación puede producirse en concentraciones de oxígeno disuelto tan bajas de hasta 7 mg/L en sistemas pobremente agitados. No obstante, se considera poco probable en la práctica, debido al alto potencial de solución que se requeriría; además, existe poca evidencia de esto en la mayoría de investigaciones y experiencias prácticas en el área.

Se han propuesto una serie de oxidantes alternativos para incrementar la cinética de la disolución del oro en las soluciones cianuradas alcalinas, incluyendo oxidantes sólidos como los peróxidos de bario, sodio, potasio, calcio y manganeso (cada uno con diferente solubilidad y contenido de oxígeno), clorato de potasio, permanganato de potasio, bicromato de potasio y

ferricianuro de potasio. En general, el alto costo de estos reactivos impide su uso, y ninguno de estos ha sido aplicado comercialmente de manera significativa.

1.3.5.2 Temperatura

Como resultado de las actividades y velocidades de difusión incrementadas de las especies reactivas, la velocidad de disolución del oro se incrementa con la temperatura, hasta un máximo de 85°C aproximadamente (**Figura 1.10**).

Por encima de esta temperatura, la disminución de la solubilidad del oxígeno superaba los beneficios de la actividad iónica y velocidades de difusión incrementadas. Considerando el ejemplo mostrado en la **Figura 1.10**, se puede observar que solo se ha alcanzado un incremento de 20% a 25% en la velocidad de disolución, mediante el aumento de la temperatura de 25°C a 85°C. Esto es apoyado por la **Figura 1.11**, la cual muestra la extracción de oro frente al tiempo a temperaturas entre 21°C y 45°C.

El alto costo asociado a dicho incremento en la temperatura raramente puede justificarse para el tratamiento de materiales de baja ley; frecuentemente se aplica temperaturas ambiente. Sin embargo, se han aplicado temperaturas elevadas para la lixiviación del material de alta ley (concentrados gravimétricos).

Dicha práctica requiere que se facilite cianuro y oxígeno libres adicionales, usualmente en sistemas presurizados. Esto conforma la base de un proceso de cianuración intensivo.

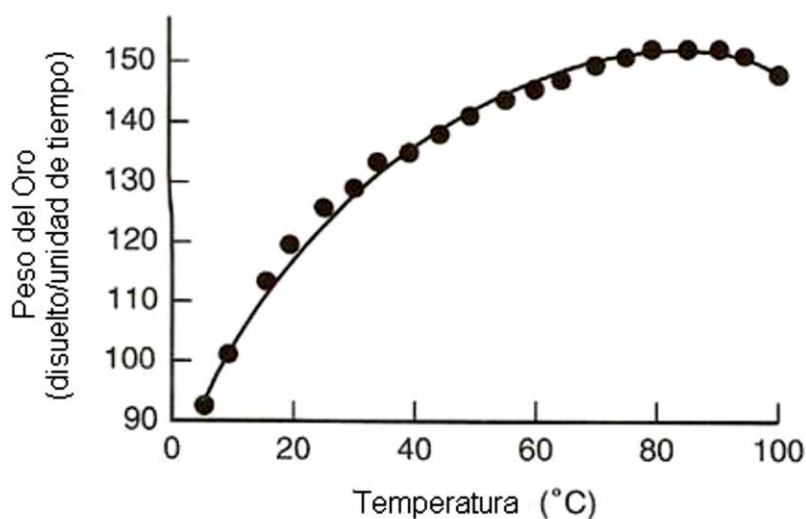


Figura 1.10: Efecto de la temperatura en la velocidad de disolución del oro en una solución aireada de 0.25% de KCN. [3]

1.3.5.3 pH

El diagrama Eh-pH para el sistema oro-cianuro (**Figura 1.3**) indica que la fuerza motriz electroquímica para la disolución, es decir la diferencia de potencial entre las líneas que representan las reacciones de oxidación del oro y reducción del oxígeno, es maximizada a niveles pH entre 9.0 y 9.5 aproximadamente. Por lo general, la lixiviación con cianuro se realiza en niveles pH >9.4 para prevenir la pérdida excesiva del cianuro mediante hidrólisis. La lixiviación con cianuro con pH bajo ha sido investigada como medio para reducir el consumo de cal (o álcali) y reducir las incrustaciones. Sin embargo, como el pH disminuye, se incrementa la proporción del cianuro presente en solución como cianuro de hidrógeno; un sistema cerrado de lixiviación debe utilizarse para prevenir la pérdida excesiva de cianuro mediante la volatilización de HCN. La consideración de la termodinámica

indica que el HCN debe poder lixiviar el oro; sin embargo, investigaciones han demostrado que el HCN no lixivía el oro a una velocidad lo suficientemente rápida para competir con la cinética de la lixiviación con CN^- . En algunos casos, un bajo pH puede utilizarse ya sea para reducir las concentraciones de cianuro en los efluentes de sistemas lixiviados como para reducir la velocidad y el alcance de otras reacciones secundarias indeseables (p.e. disolución de antimonio y minerales arsénicos).

En estos casos, deben determinarse las condiciones óptimas mediante una prueba metalúrgica sobre el material de interés.

El efecto del pH en la velocidad de disolución del oro por encima de pH 9.5 es reducida y depende de la presencia de otras especies de soluciones y componentes minerales, así como el tipo de álcali utilizado para la modificación de pH. En algunos casos, la velocidad puede disminuir considerablemente con el aumento del pH, debido al incremento en la velocidad de las reacciones de interferencia, como la disolución de sulfuros y otras especies reactivas. Estos efectos generalmente son más severos con hidróxido de calcio que con hidróxido de sodio o hidróxido de potasio debido a la baja solubilidad de muchas sales formadas.

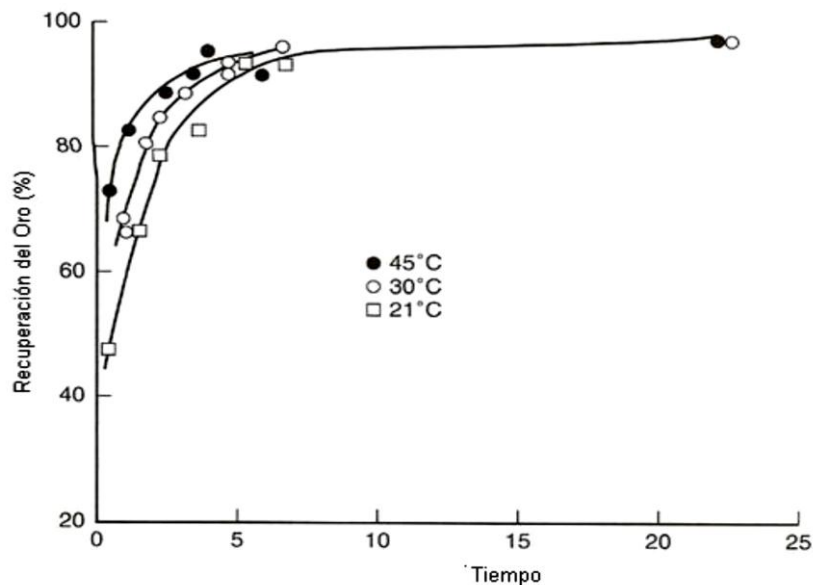


Figura 1.11: Efecto de la temperatura en la recuperación del oro a partir de la calcina

En la práctica otros factores de procesos frecuentemente determinan las condiciones actuales de pH aplicadas, por ejemplo:

- Velocidad de disolución de otros componentes minerales (p.e. cobre, hierro, telurio, antimonio y minerales de arsénico) que pueden afectar negativamente la lixiviación del oro.
- Propiedades de sedimentación de la pulpa
- Viscosidad de la pulpa
- Costo de la modificación de pH
- Precipitación de especies de solución (p.e. calcio y hierro)

Por consiguiente, el pH óptimo para la lixiviación depende del número de factores relacionados, y debe derivarse independientemente de cada tipo de mineral y sistema de lixiviación.

1.3.5.4 Área de la Superficie

La velocidad de disolución es directamente proporcional al área de la superficie expuesta del oro y otros factores particulares. El área de la superficie expuesta está relacionada con la distribución del tamaño de la partícula y las características de liberación del material de alimentación; además, se ve afectada por la eficiencia de los procesos de conminución antes de la lixiviación. La velocidad generalmente se incrementa con la disminución del tamaño de la partícula, a causa del aumento en la liberación del oro y/o el área de la superficie de las partículas de oro (debido al aplanamiento o rotura física durante la molienda). Sin embargo, este no siempre es el caso y la velocidad de disolución de los minerales que contienen cianidas pueden disminuir con la disminución del tamaño de la partícula, debido al incremento de reacciones secundarias de competición y consumo de reactivos. En dichos casos, el tamaño óptimo de la partícula es un acuerdo entre la extracción de oro y el consumo de cianuro. Si no, el pre-tratamiento oxidante puede presentar las rutas de procesamiento más atractivas para estos materiales.

1.3.5.5 Agitación

La disolución de oro frecuentemente es controlada por transferencia de masa bajo las condiciones normalmente aplicadas para la lixiviación con cianuro; por lo tanto, la velocidad depende del espesor de la capa de difusión y características de la mezcla de la solución total. El aumento de la agitación incrementa la velocidad de disolución al máximo, por encima de los cuales, la

agitación tiene un pequeño o nulo beneficio adicional. El espesor de la capa de difusión es minimizado mediante la maximización de los caudales de solución que pasan sobre las partículas sólidas. En los sistemas de lixiviación en pulpa esto se logra mediante la mezcla de sólidos y soluciones con aire o mediante la agitación mecánica. Incrementar el grado de agitación en los sistemas pobremente mezclados puede mejorar significativamente la velocidad de disolución del oro, como resultado del espesor reducido de la capa de difusión y la homogeneidad mejorada en la solución total. En un sistema correctamente mezclado, el efecto es menos significativo debido a que la solución o la pulpa total es más homogénea. Se vuelve cada vez más difícil reducir el espesor de la capa de difusión solo mediante la agitación; el incremento en la agitación frecuentemente es injustificable. Esto ciertamente ocurre en la mayoría de los sistemas que utilizan tecnología moderna de mezcla mecánica y probablemente se aplican a la mayoría de sistemas agitados por aire.

En los sistemas en pila, botadero, batea o in situ, el espesor de la capa de difusión en torno a las partículas sólidas estacionarias está determinado por la velocidad de flujo de la solución. Por otra parte, cuando las partículas gruesas están incluidas, la difusión en los poros juega un papel importante (y a veces dominante) en la obtención de reactantes y productos a, y de, la superficie del mineral (p.e. oro). Aunque el incremento de la velocidad de flujo de la solución puede tener un efecto similar al producido mediante el incremento de la velocidad de agitación en los sistemas de pulpas, es decir, mediante el incremento de la velocidad de transferencia de masa de las especies

reactantes, la concentración de oro de las soluciones lixiviadas disminuyen; esto puede reducir la eficiencia de los procesos posteriores. Por consiguiente, debe establecerse una economía óptima. Además, debe permitirse el tiempo suficiente para que los reactantes y productos se difundan hacia, y a partir, de las superficies minerales.

1.4 INTERFERENCIA DE IMPUREZAS DE LOS METALES

En la extracción comercial del oro desde sistemas minerales, la velocidad de disolución es principalmente afectada por la complejidad del mineral. El oro que se encuentra en forma limpia, como partículas metálicas finas y liberadas, en general es fácilmente cianurable. La presencia de otras sustancias comunes en los minerales puede alterar este comportamiento, acelerando e inhibiendo la disolución del metal.

1.4.1 Aditivos Acelerantes de la cianuración

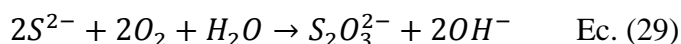
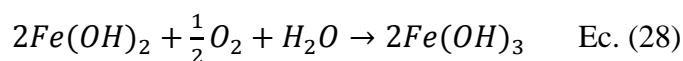
Existen algunos casos de sustancias que, en pequeñas concentraciones, influyen favorablemente en la disolución de minerales de oro y plata por cianuración al depolarizar la superficie del metal. Estos iones son: el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el bismuto (Bi) y el talio (Ta). Cuando no están presentes en forma soluble naturalmente en los minerales, se suelen agregar externamente. En esos casos se usa alguna sal soluble como, por ejemplo, el acetato o el nitrato de plomo, que se dosifica en mínimas cantidades. Se cree que este caso cambia algunas características físicas de la superficie del oro, pasando a comportarse como una pseudo - aleación Au-Pb, con lo que

disminuiría el espesor de la capa límite, facilitando el acceso de los reactivos al metal.

1.4.2 Inhibidores por consumo del oxígeno

Existe un gran número de sustancias que remueven el oxígeno disuelto desde las soluciones cianuradas, retardando y algunas veces deteniendo completamente la acción del cianuro.

Por ejemplo la pirrotita actúa consumiendo oxígeno, doblemente vía la oxidación del hierro y vía la oxidación del ion sulfuro (S^{2-}) formando tiosulfatos, ambos sin utilidad en la lixiviación:



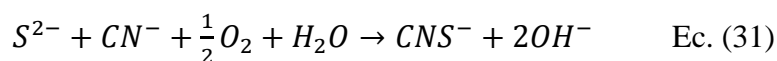
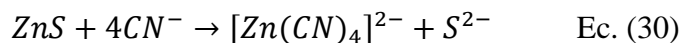
1.4.3 Inhibidores por consume de cianuro

Otras sustancias consumen cianuro y se comportan como cianidas, es decir, como sustancias que, además de consumir cianuro, forman compuestos que dificultan la disolución del oro, sin beneficios para el proceso y de esa forman inhiben la disolución del oro.

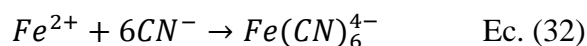
Ejemplo de estos cianicidas son:

- Minerales Sulfurados de cobre, zinc arsénico y antimonio. El ion metálico reacciona formando un cianuro del metal. Además, el ion

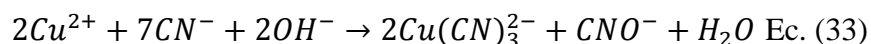
sulfuro también consume cianuro, formando tiocianatos que no tienen acción lixiviantes alguna:



- El hierro disuelto, en la forma de iones o complejos, los cuales se comportan como inhibidores, desde débiles hasta muy fuertes, ya que con el cianuro forman otros complejos y sales, comportándose como ferrocianicidas en soluciones alcalinas. Esto ocurre, por ejemplo, con el ion ferroso:



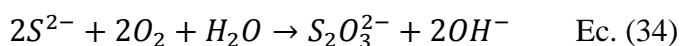
- Los iones cúpricos, que en soluciones cianuradas alcalinas pueden comportarse de acuerdo a la reacción siguiente:

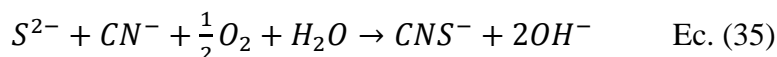


Donde el complejo de cianuro de cobre representa un importante mayor consumo de cianuro.

1.4.4 Inhibidores por consumo doble de cianuro y de oxígeno

Los iones de sulfuro, S^{2-} , generados en la disolución de minerales sulfurados consumen oxígeno y también cianuro, formando tiosulfatos y tiocianatos, según:





1.4.5 Pasivación superficial de la interfase de reacción

Existen además, otros elementos que pasivan el oro o que podrían formar compuestos insolubles sobre la superficie del oro. Por ejemplo de este tipo de compuesto pasivador e insoluble son:

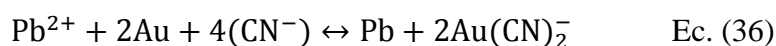
- **El ion sulfuro (S^{2-})**, cuyo efecto depresivo, retardando la disolución del oro, ha sido claramente demostrado experimentalmente. Algunas veces, la disolución incluso puede ser detenida completamente, debido, posiblemente, a la formación de una película aurosulfurada insoluble sobre la superficie de las partículas de oro.
- **Un precipitado insoluble de $Pb(CN)_2$** , que se produce por reacción del cianuro con minerales de plomo cuando este está presente en cantidades mayores, pasando a ser de esta manera un agente pasivador superficial. De igual manera ocurre con un precipitado insoluble de etilxantato de plomo, que se produce en presencia de residuos de reactivos de flotación. Estos dos efectos inhibidores tienen gran importancia al tratar minerales con procesos mixtos, que comprenden flotación como cianuración.

CAPITULO II

EFECTOS DEL NITRATO DE PLOMO EN LA CIANURACION

2.1 EFECTO DEL NITRATO DE PLOMO

Es bien conocido que el oro puro se disuelve mucho más despacio que el oro aleado con plata o el oro que contiene cantidades menores de otros metales. Algunos cationes divalentes pueden tener un importante efecto beneficioso en la velocidad de disolución del oro. Se sabe que pequeñas cantidades de plomo, mercurio, talio y bismuto se despolarizan en la superficie del oro y previenen o reducen el efecto de pasivación, que es observado a -0.4V en la curva de polarización del oro; de este modo, se aceleran las velocidades de lixiviación del oro. Se piensa que este efecto, mostrado en la **Figura 2.1** para los iones de mercurio y plomo, se debe a la depositación de pequeñas cantidades de mercurio o plomo metálico en una porción de la superficie de oro, como se muestra:



Muchos minerales y concentrados contienen cantidades menores de mercurio y plomo soluble, y menos de bismuto y talio, los cuales ayudan naturalmente en los procesos de lixiviación. Cuando este no es el caso, las sales de plomo

soluble (o mercurio, talio, bismuto) pueden añadirse a los sistemas de lixiviación para aumentar la disolución del oro. La desventaja potencial de dicha práctica es que cualquier especie metálica añadida puede depender del producto final del oro o los relaves. Aunque se ha encontrado que la adición de iones de plomo para obtener concentraciones de 1 a 10 mg/L es beneficiosa, se ha encontrado también que las concentraciones de plomo en exceso de 20 mg/L retardan la disolución del oro. Se ha demostrado que la adición de tan sólo 20 mg/L de talio tiene un importante efecto beneficioso en la lixiviación del oro, el cual es más marcado bajo condiciones donde puede producirse la pasivación. Aunque se ha demostrado que la presencia de pequeñas cantidades (5 a 10 mg/L) de iones sulfuro tienen un importante efecto retardante en la velocidad de disolución del oro, esto puede mitigarse mediante la adición de plomo.

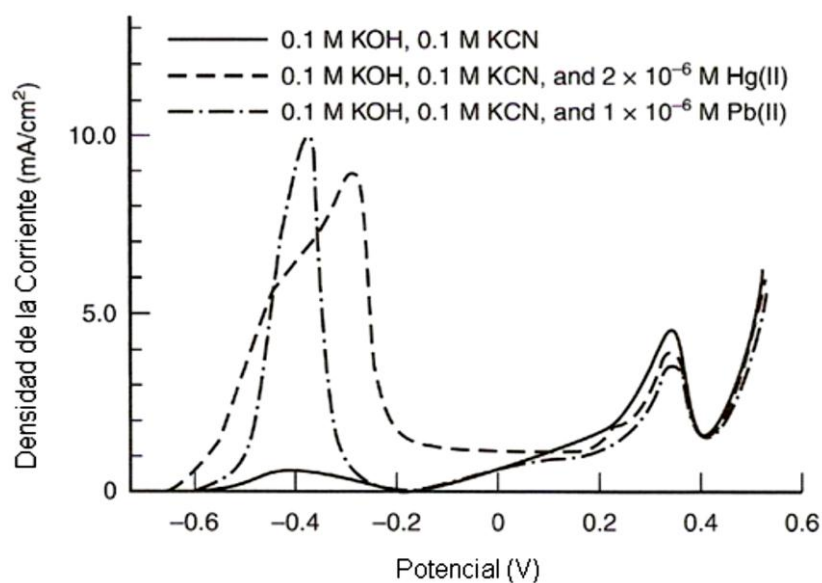


Figura 2.1: Efecto de la adición de iones de plomo y mercurio en el comportamiento anódico del oro en una solución cianurada alcalina. Antes de cada barrido anódico, el electrodo se deja bajo condiciones de circuito abierto por 5 min. [12]

2.2 COMPORTAMIENTO ANÓDICO DE ORO EN SOLUCIONES DE CIANURO QUE CONTIENEN NITRATO DE PLOMO

Las características anódicas del oro mostraron un rango activo de potencial positivo de la disolución sólo el potencial del circuito abierto seguido por una región pasiva que se extiende hasta 0 V (SCE). Como se indica en la **Figura 2.2**.

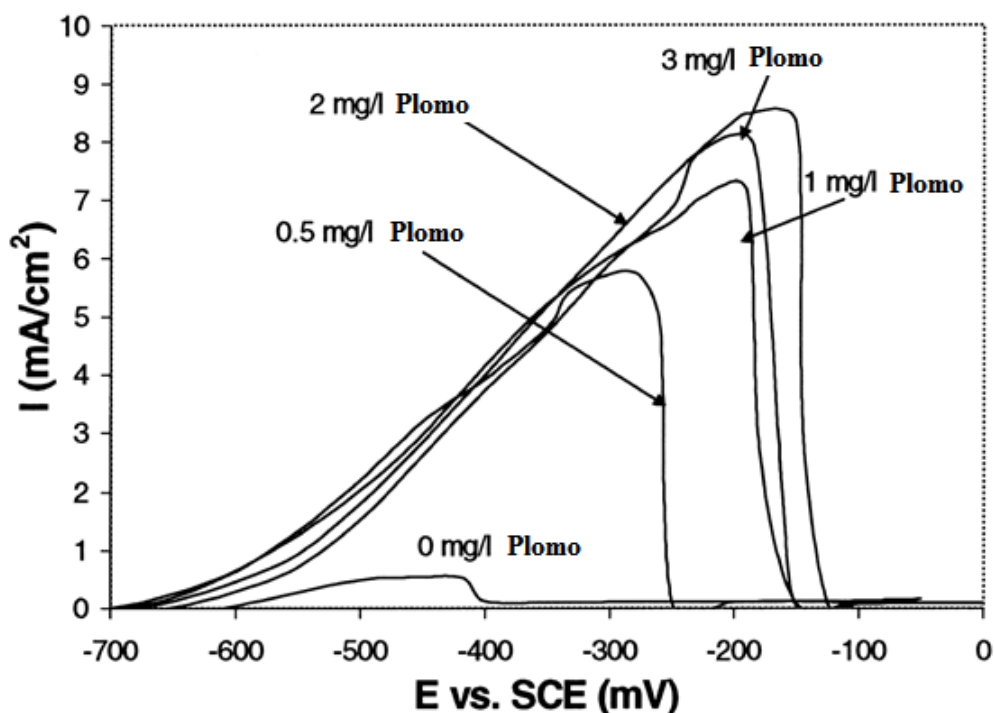


Figura 2.2: Efecto de las adiciones de nitrato de plomo sobre las características de polarización anódica del oro en soluciones acuosas de cianuro desaireadas. Temperatura: 25 °C, pH = 11, NaCN = 2.500 mg / L, velocidades la rotación del disco 900 rpm. [1]

La posición del pico activo estaba en buena concordancia con los resultados reportados en la literatura, donde un pico similar se identificó dentro de la gama potencial de -800 a -200 mV (SCE). La adición de hasta 2 mg/L de plomo en forma de nitrato de plomo a la solución de cianuro aumentó de manera espectacular el pico anódico, mientras que 3 mg/L de plomo disminuyó ligeramente su tamaño. El efecto de este incremento en la actividad anódica del

oro en la velocidad de lixiviación obtenida en la práctica también será determinado por la cinética de las reacciones catódicas involucradas. Si se utiliza oxígeno como oxidante, el paso determinante de la velocidad es por lo general el transporte de oxígeno a la superficie del oro, porque se añade suficiente cianuro.

2.3 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO

Los datos de polarización que se muestran en la **Figura 2.3** indican que la velocidad de disolución de oro aumenta con el incremento de las concentraciones de cianuro y muestran cómo este efecto se acentúa con la adición de nitrato de plomo a la solución.

El pico de corriente nos indica la velocidad de reacción requerida para causar la pasivación de la superficie de oro.

Se supone que la pasivación es causada por la formación de una capa polimérica de AuCN sobre la superficie de oro que resulta de la inanición de la superficie de cianuro, la fuerte dependencia de los pico de corriente en la concentración de cianuro no es inesperado.

El efecto del nitrato de plomo está probablemente relacionado a lo sugerido la ruptura de la capa de pasivación por las especies de plomo con el resultado de que se requiere una mayor velocidad de reacción antes de condiciones favorables para el desarrollo de la pasivación.

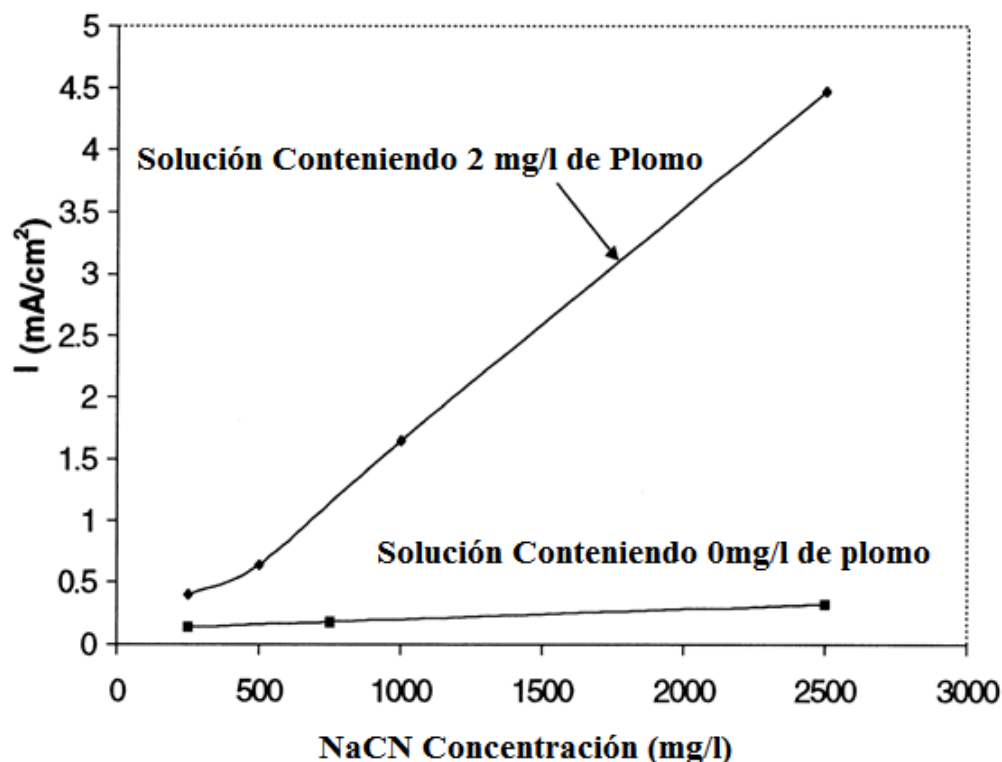


Figura 2.3: Efecto de la concentración de NaCN y una adición de plomo en las densidades de corriente anódica de los picos obtenidos durante la polarización potenciodinámica de un electrodo de oro giratorio en soluciones acuosas de cianuro desaireadas. Velocidad de rotación del disco = 225 rpm. [1]

2.4 EFECTO DEL PH

El aumento del valor pH de una solución de lixiviación de cianuro por encima de 10,5 causó una disminución en los valores de densidad de corriente obtenidos en un electrodo de oro giratorio como se indica en la **Figura 2.4**. El efecto del pH fue de nuevo mucho más pronunciada para la solución que contiene nitrato de plomo. Estos resultados están en buen acuerdo con los de KONDOS. Quien también encontró que la más alta recuperación de oro se obtuvo a pH 10,5 en presencia de 200 g/t de nitrato de plomo. Los presentes resultados también indican que la reducción en la velocidad de lixiviación de oro en soluciones acuosas de cianuro no se deben a la disminución del poder oxidante del oxígeno

en los valores de pH más altos, sino más bien a un cambio en la naturaleza de la disolución anódica del proceso. Sin embargo, el mecanismo de esta reducción en la actividad anódica no es clara; la mayor reducción en la actividad anódica encontrado en el caso de la solución que contiene las especies de plomo no sólo puede ser debido a un cambio en la naturaleza de las especies de plomo con el pH, pero también para el mismo mecanismo activo en ausencia de plomo que se acaba acentuar cuando el plomo está presente.

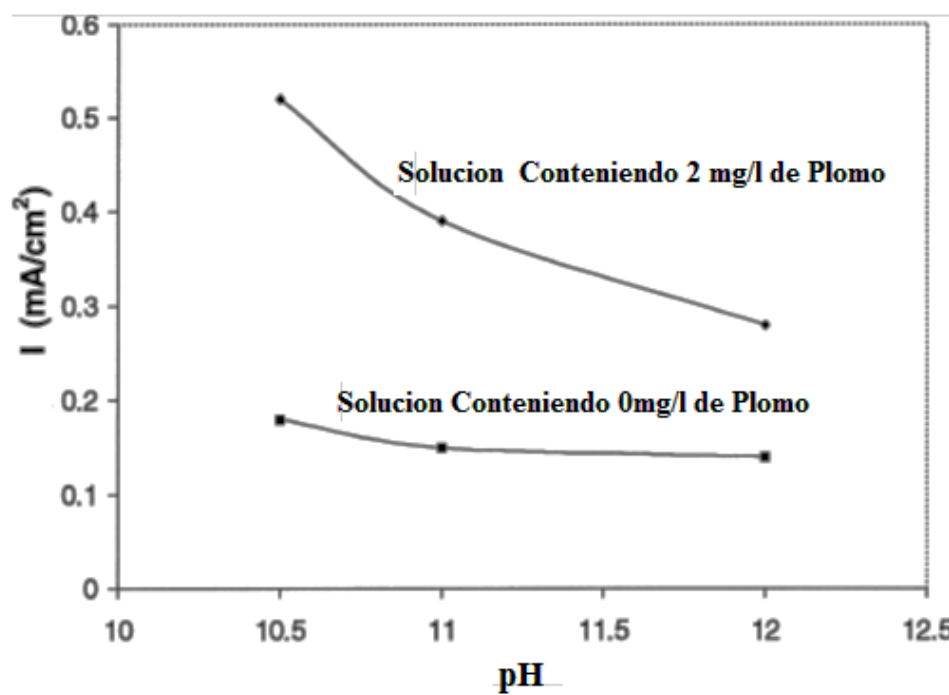


Figura 2.4: Efecto del pH sobre las densidades de corriente anódica pico obtenido durante la polarización potenciodinámica de un electrodo de oro giratorio en soluciones acuosas de cianuro desaireadas con y sin nitrato de plomo, con NaCN = 250 mg / L, disco de velocidad de rotación = 225 rpm, el pH fue ajustado con adiciones de NaOH. [1]

Sin embargo, la deposición de plomo en la superficie de oro durante la lixiviación de oro sólo puede tener lugar si el plomo es más noble que el oro en

soluciones de cianuro. Datos termodinámicos del sistema Pb-CN-H₂O indican que el plomo es de hecho menos noble que el oro y que sólo así se reducirán a potenciales donde el oro sería estable como el oro elemental. Por otra parte, si la velocidad de lixiviación de oro se retrasa debido a la pasivación del oro, la introducción de una reacción catódica adicional, tales como la reducción de plomo, tendería a mover el potencial a valores más positivos y sería por lo tanto favorecer la pasivación en lugar de disolución.

Para aclarar estas cuestiones, se decidió investigar el comportamiento anódico del plomo metálico en soluciones alcalinas de cianuro. Se encontró que el plomo es un poco más noble que el oro en cianuro acuosa y de hecho se podría reducir al plomo metálico sobre una superficie de oro disolviendo anódicamente a potenciales entre -620 y -580 mV (SCE) **Figura 2.5**. Sin embargo, en los potenciales de un poco más activos, el plomo se disuelve a una velocidad más alta que el oro, pero al igual que el oro también se pasiva a potenciales más altos.

El aumento de la actividad anódica del oro podría ser por lo tanto debido a la precipitación de plomo metálico en la superficie de oro, pero no a los potenciales más positivos que el plomo sería de hecho ser más anódicamente activo que el oro. Para investigar más esto, se investigó el comportamiento de oro en cianuro acuoso que tuvo lugar en varios potenciales.

Los potenciales se eligen de manera que:

- el plomo y el oro eran activos;
- plomo era activa y pasiva de oro;
- el plomo y el oro eran pasivos.

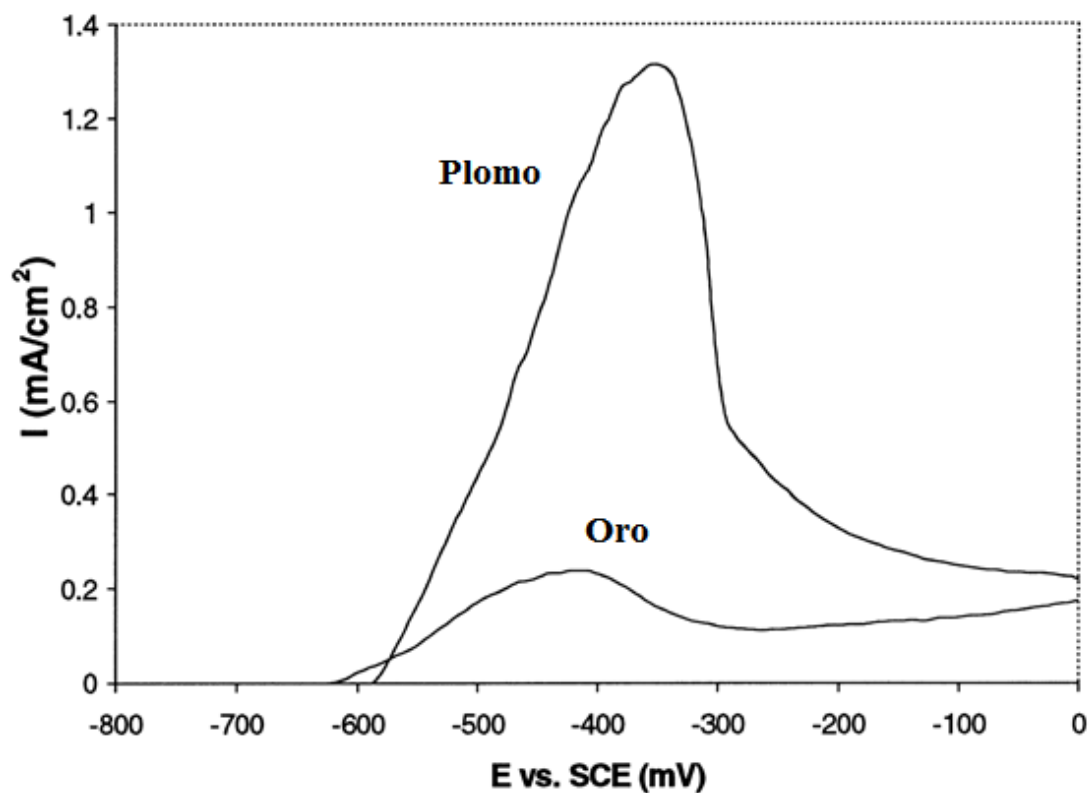


Figura 2.5: Curvas de polarización anódica del oro y plomo en soluciones de cianuro desaireadas, pH = 11, NaCN = 2,500 mgrL, condiciones estáticas. [1]

La influencia de la adición de 0,5 mg/l de nitrato de plomo en el comportamiento anódico del oro que se mantiene en diversos potenciales en ambas regiones activas y pasivas de oro y el plomo se muestran en la **Figura 2.6**. Es claro que en los potenciales de donde el plomo está en la condición activa, es decir, en la forma de una especie de plomo solubles, aumenta la disolución anódica de oro significativamente. A potenciales más positivos que el plomo pasivado, probablemente debido a la formación de una especie de plomo insolubles, la adición de nitrato de plomo no despasiva el oro. Este último efecto podría ser debido a la reducción del plomo en la solución por la formación de

especies de plomo insolubles o a la formación de una película pasiva más estable sobre la superficie de oro. Los resultados también indican que la despasivación del oro es un proceso relativamente lento, especialmente en los potenciales más positivos que la capa pasiva en el oro. El efecto de aceleración de plomo sobre la disolución de oro debe haber sido debido a algunas especies de plomo disueltos y no al plomo metálico, ya que en estos experimentos la reducción del plomo añadido en la superficie de oro fue evitado por la polarización del oro a potenciales más positivos que el plomo esta potencial de corrosión (= -0.58 V vs SCE) antes de que el nitrato de plomo.

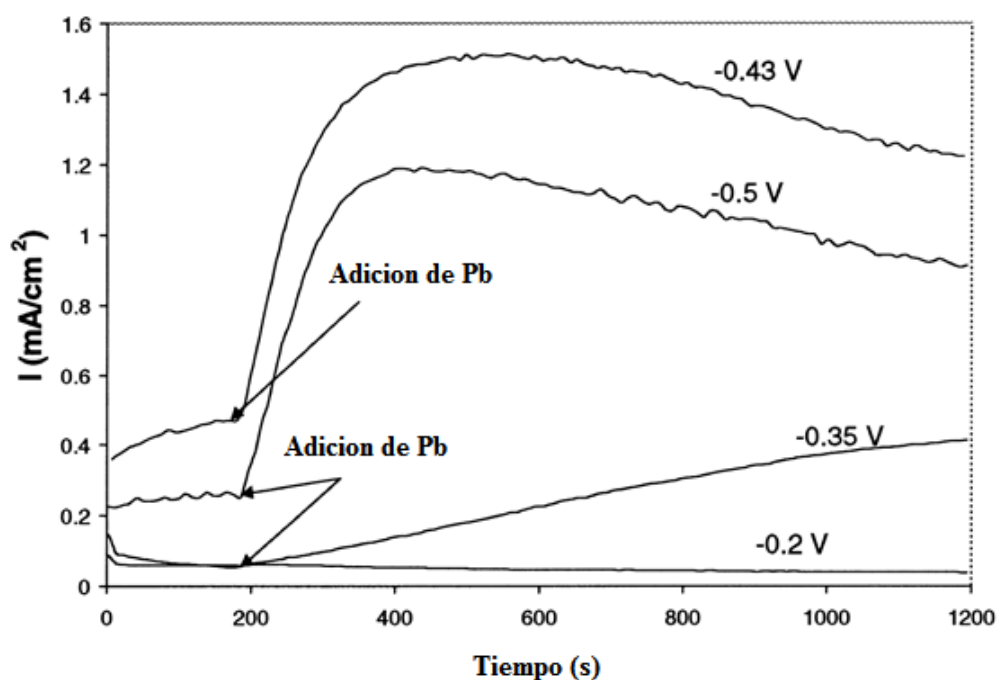


Figura 2.6: Potencioestático curvas de polarización para el oro en soluciones de cianuro alcalinas con la adición de nitrato de plomo (0,5 mg / L de plomo). Temperatura: 25 ° C, pH = 11, NaCN = 2,500 mg/L, la velocidad de rotación del disco = 225 rpm. [1]

CAPITULO III

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para realizar las pruebas de laboratorio, se utilizan muestras traídas de mina denominadas geometalurgias, estas muestras representan los diferentes tajos que ingresan a la planta con ciertas diferencias mineralógicas. Para realizar las pruebas de cianuración sin nitrato de plomo y con la adición de nitrato de plomo se emplea una muestra compósito de estas muestras.

Así mismo se presenta la eficiencia del uso de nitrato de plomo en la operación de planta, además de las mejoras en la recuperación de oro y plata desde el inicio de operación hasta la actualidad.

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL

3.1.1 Mineralogía

Los minerales de ganga son predominantemente del grupo de la sílice, mientras que la mena se encuentra en pirita y principalmente como Au nativo, electrum, y sulfuros y sulfosales de Ag.

El cuarzo es en general de grano fino a medio, con texturas de re cristalización a partir de una fase amorfa.

Los sulfuros son de grano fino, menores a 50 micrómetros, con excepción de la pirita que suele presentarse diseminada en cubos de varios milímetros. Se estima que el porcentaje de sulfuros es bajo, menor a 3%. Los sulfuros reconocidos son pirita, marcasita, arsenopirita, acompañados por cantidades menores de esfalerita, galena, calcopirita, tetrahedrita (freibergita), pirargirita, y acantita.

La pirita se presenta con diferentes hábitos y tamaños de grano, principalmente diseminada en la roca de caja o en las brechas.

En la **Tabla 3.1** se muestra las características mineralógicas del mineral, mientras la **Tabla 3.3** muestra la composición química del compuesto para realizar las pruebas experimentales de cianuración por agitación.

Tabla 3.1 Mineralogía de Mina

Mineral	%
Gangas	98.77
Esfalerita	0.03
Limonitas	0.4
Calcopirita	0.02
Pirita	0.28
Hematita	0.14
Galena	0.04
Au Nativo	0.03
Electrum	0.01
Argentita	0.2
Platas Rojas	0.06
Cobres	
Grisés	0.02

Los análisis mineralógicos indican que los principales portadores de oro son, el oro nativo y el electrum, que se encuentran como finas inclusiones sub-microscópicas en las gangas silíceas como se muestran en las **Figura 3.1** y

Figura 3.2. Los principales portadores de la plata son, la argentita, electrum y sulfosales como proustitas presentes como finas inclusiones en las gangas como se muestra en la **Figura 3.3.**

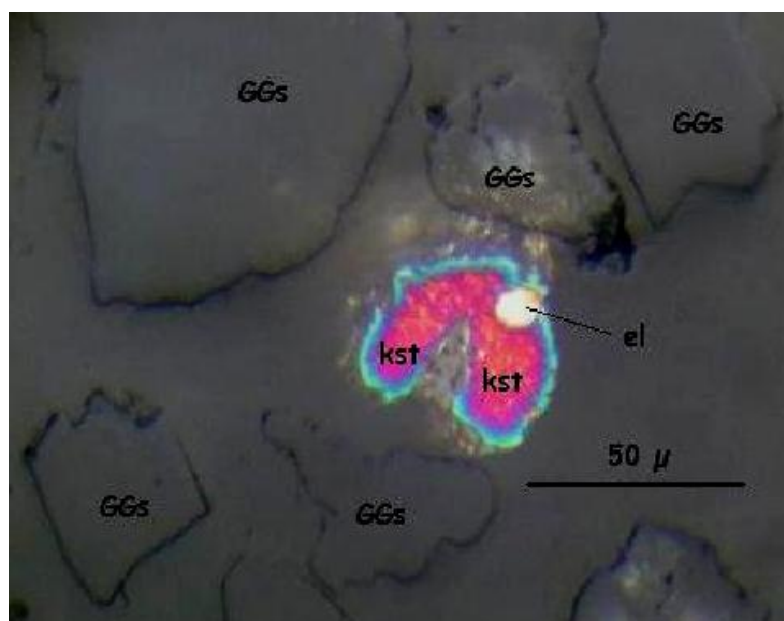


Figura 3.1: Se muestra al oro en forma de electrum incrustada en kustelita.

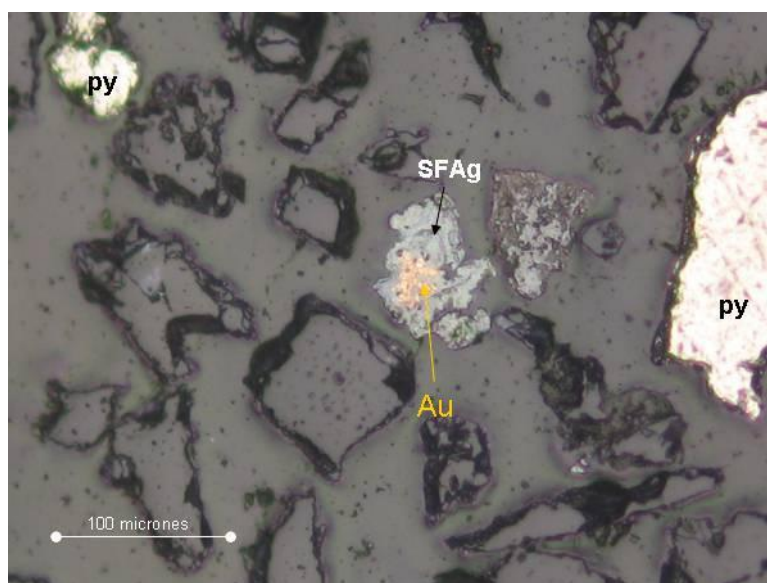


Figura 3.2: se muestra inclusiones de oro en sulfosales de plata

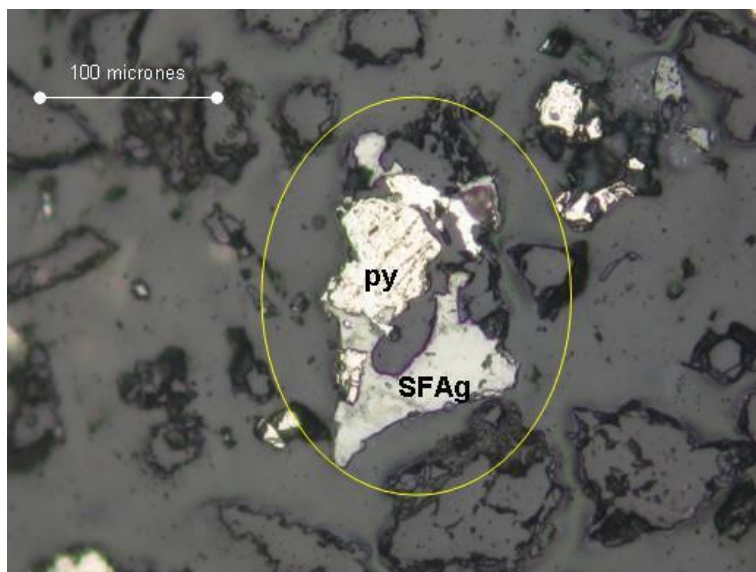


Figura 3.3: Un amarre de pirita con SFAg, el sulfuro de hierro está muy relacionado al portador de plata.

3.2 PRUEBAS DE LABORATORIO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

Para las pruebas se utiliza una muestra compósito, generada a partir de las muestras geometalúrgicas traídas al laboratorio de mina. Inicialmente se realiza la preparación de las muestras geometalúrgicas ingresadas, iniciando con el secado de las muestras, posteriormente la preparación de la misma a tamaño de 100% -10 malla.

Una vez obtenido el tamaño deseado se procede a realizar el compósito, la **Tabla 3.2** muestra la proporción utilizada. Se obtiene una muestra con los siguientes valores que se muestran en la **Tabla 3.3**

Tabla 3.2 Proporción empleada para el compósito

Código	%
G-1	70
G-2	30

Tabla 3.3 Composición Química del Mineral Compósito

Mineral	Leyes
Au (g/t)	7.4
Ag (g/t)	163.5
Pb (g/t)	50
Cu (g/t)	81
Zn (g/t)	189
Fe (%)	2.45

Las pruebas en laboratorio se realizan a las mismas condiciones iniciales de operación en la planta de beneficio, debido al requerimiento de mejorar el proceso, se realizaron varias pruebas sin nitrato de plomo y con nitrato de plomo a las condiciones de operación.

Inicialmente se determina la curva de moliendabilidad del mineral para obtener una malla -270 de 73%. Para ello se tiene un molino de bolas de 22cm x 25cm.

Obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la siguiente **Tabla 3.4**.

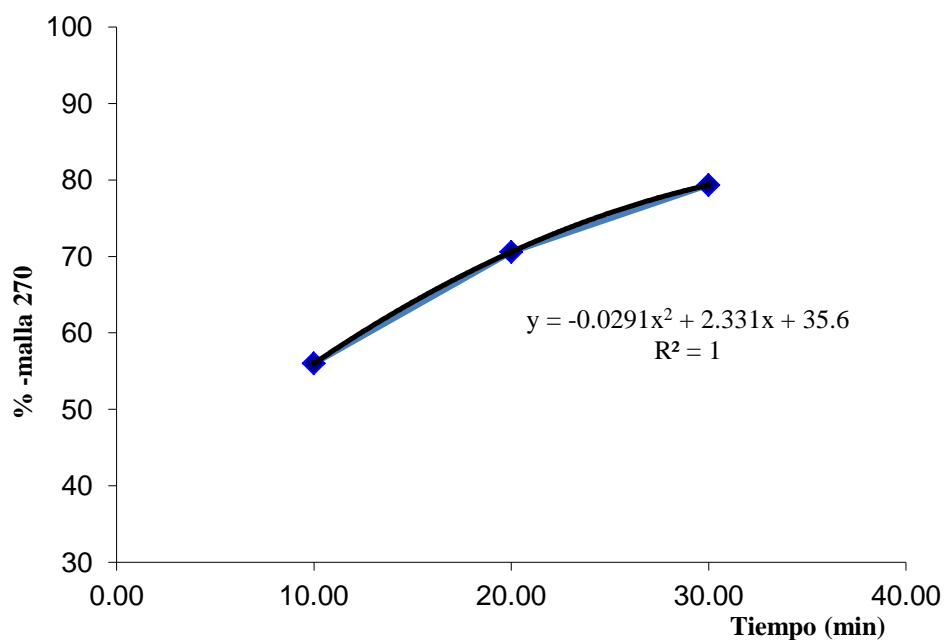
Tabla 3.4 Datos Moliendabilidad, para tiempo de 10, 20 y 30 minutos.

Malla	Tiempo (min)					
	10		20		30	
	Ac(+)	Ac(-)	Ac(+)	Ac(-)	Ac(+)	Ac(-)
60	8.16	91.84	0.80	99.20	0.10	99.90
100	20.38	79.62	5.30	94.70	1.72	98.28
140	29.38	70.62	11.98	88.02	5.54	94.46
200	35.62	64.38	19.02	80.98	10.86	89.14
270	44.00	56.00	29.42	70.58	20.66	79.34
-270	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00

Donde: Ac(+) Acumulado retenido

Ac(-) Acumulado pasante

La **Figura 3.4** muestra la curva de moliendabilidad obtenido así como el ajuste de curva.

**Figura 3.4:** Curva de Moliendabilidad

Resolviendo la ecuación tendremos un tiempo de molienda:

$$T_{\text{molienda}}=22.34 \text{ min. Para una malla } -270 \text{ de } 73\%$$

Luego se realiza la caracterización de la muestra la cual presenta los siguientes datos iniciales:

$$\text{Gravedad Específica} = 2.6$$

$$\text{pH Natural} = 6.6$$

Para el inicio de las pruebas se emplea una solución lixivante proveniente de planta (Solución Barren), la cual presenta los siguientes valores:

$$\% \text{NaCN} = 0.31$$

$$\text{pH} = 12.02$$

3.2.1 Pruebas sin Adición de Nitrato de Plomo

La **Tabla 3.5** muestra las condiciones iniciales de las pruebas realizadas. Para la prueba de cinética se realiza a diferentes tiempos de cianuración en botella (2h, 4h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h). Estas pruebas se realizaran sin la adición de nitrato de plomo. La **Tabla 3.6** y la **Figura 3.5** muestran los porcentajes de recuperación para cada tiempo lixiviación.

Tabla 3.5 Condiciones iniciales de la prueba sin adición de Nitrato de plomo

Sólido (g)	1000.00
% S	32.07
Densidad (g/L)	1245.90
RPM	25
Tiempo Cianuración (h)	2, 4, 6, 12, 24, 48, 72
Nitrato de Plomo g/t	---
pH	11 a 11,50
% NaCN	0.35
% -m270	73.00

Tabla 3.6 Extracción de oro y plata, sin la adición de Nitrato de plomo

Tiempo (Horas)	Cabeza g/t		Relave g/t		% Extracción	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
2	7.40	163.50	5.96	139.12	19.46	14.91
4	7.40	163.50	3.98	98.78	46.22	39.58
6	7.40	163.50	2.37	72.98	67.97	55.36
12	7.40	163.50	1.43	48.18	80.68	70.53
24	7.40	163.50	0.68	30.78	90.81	81.17
48	7.40	163.50	0.53	23.74	92.84	85.48
72	7.40	163.50	0.48	22.42	93.51	86.29

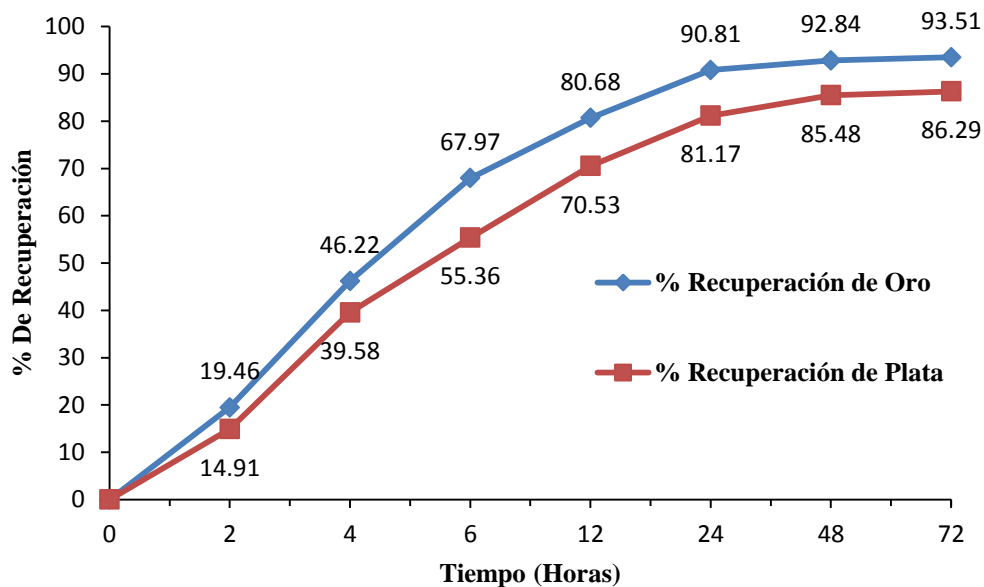


Figura 3.5: Las Curvas de cinética de recuperación de oro y plata sin nitrato de plomo.

El consumo de cianuro y cal utilizados en esta prueba se muestra en la **Tabla 3.6**.

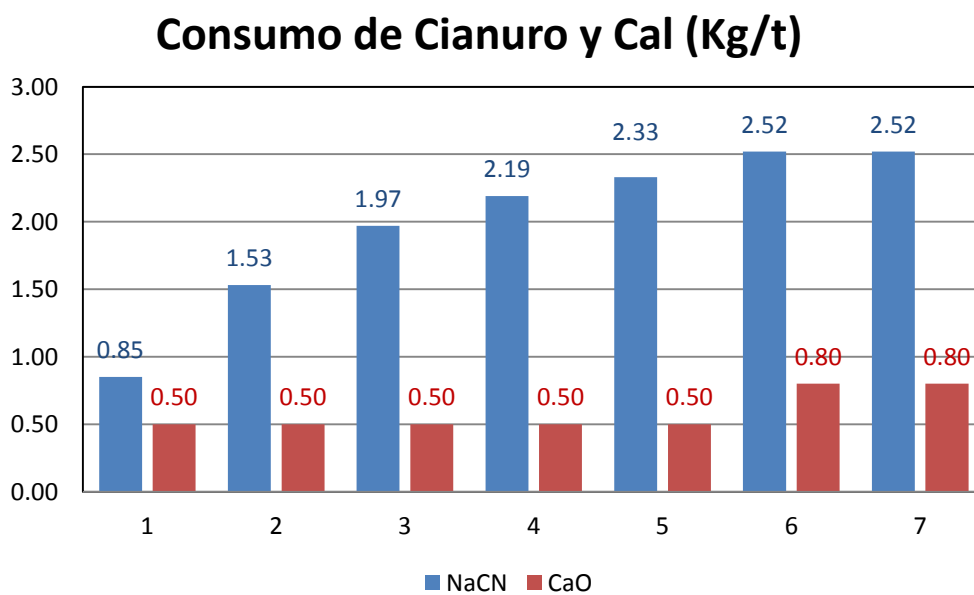


Figura 3.6: Consumo de cianuro y cal, sin adición de nitrato de plomo.

3.2.2 Pruebas Preliminares a Diferente Adición de Nitrato de Plomo

Para ello se realiza una prueba preliminar para determinar la cantidad de nitrato de plomo adecuado para el comparativo.

Se realiza pruebas bajo las siguientes condición de nitrato de plomo; 150 g/t, 200 g/t, 250 g/t, 300 g/t, 350g/t y 400 g/t. la **Tabla 3.7** muestra las condiciones iniciales de las pruebas preliminares. Con ello determinamos la adición adecuada (mayor recuperación de oro) para el comparativo siguiente.

Tabla 3.7 Condiciones iniciales Prueba Preliminar con Nitrato de plomo

Sólido (g)	1000.00
% S	32.07
Densidad (g/L)	1245.90
RPM	25
Tiempo Cianuración (h)	72
Nitrato de Plomo g/t	150, 200, 250, 300, 350 y 400
pH	11 a 11,50
% NaCN	0.35
% -m270	73.00

Estas pruebas preliminares se realizan por duplicado y se utilizan la misma solución lixivante además del mismo compósito.

Solución Lixivante (Barren): %NaCN = 0.31

pH = 12.02

La siguiente **Tabla 3.8** muestra el resumen de los resultados obtenidos de las pruebas preliminares:

Tabla 3.8 Extracción de oro y plata a diferente adición de Nitrato de Plomo

	Cabeza g/t		Relave g/t		% Extracción	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Nitrato de Plomo (150g/t)	7.40	163.50	0.45	18.47	93.92	88.70
	7.40	163.50	0.43	18.47	94.19	88.70
Promedio	7.40	163.50	0.44	18.47	94.05	88.70
Nitrato de Plomo (200g/t)	7.40	163.50	0.36	16.10	95.14	90.15
	7.40	163.50	0.39	16.30	94.73	90.03
Promedio	7.40	163.50	0.38	16.20	94.93	90.09
Nitrato de Plomo (250g/t)	7.40	163.50	0.38	16.00	94.86	90.21
	7.40	163.50	0.36	15.80	95.14	90.34
Promedio	7.40	163.50	0.37	15.90	95.00	90.28
Nitrato de Plomo (300g/t)	7.40	163.50	0.35	14.10	95.27	91.38
	7.40	163.50	0.34	14.80	95.41	90.95
Promedio	7.40	163.50	0.35	14.45	95.34	91.16
Nitrato de Plomo (350g/t)	7.40	163.50	0.40	16.00	94.59	90.21
	7.40	163.50	0.40	16.00	94.59	90.21
Promedio	7.40	163.50	0.40	16.00	94.59	90.21
Nitrato de Plomo (400g/t)	7.40	163.50	0.39	16.77	94.73	89.74
	7.40	163.50	0.42	16.27	94.32	90.05
Promedio	7.40	163.50	0.41	16.52	94.53	89.90

La **Figura 3.7** muestra el comportamiento de la recuperación de oro y plata a diferente adición de nitrato de plomo y la **Tabla 3.9** muestra el consumo promedio de reactivos durante las pruebas:

Tabla 3.9 Consumo Promedio de reactivos a diferente adición de NP

NP(g/t)	NaCN(kg/t)	CaO(kg/t)
150	2.30	0.75
200	2.27	0.75
250	2.25	0.65
300	2.16	1.05
350	2.14	1.06
400	2.22	1.05

Recuperación de Oro y Plata a diferente Adición de Nitrato de Plomo

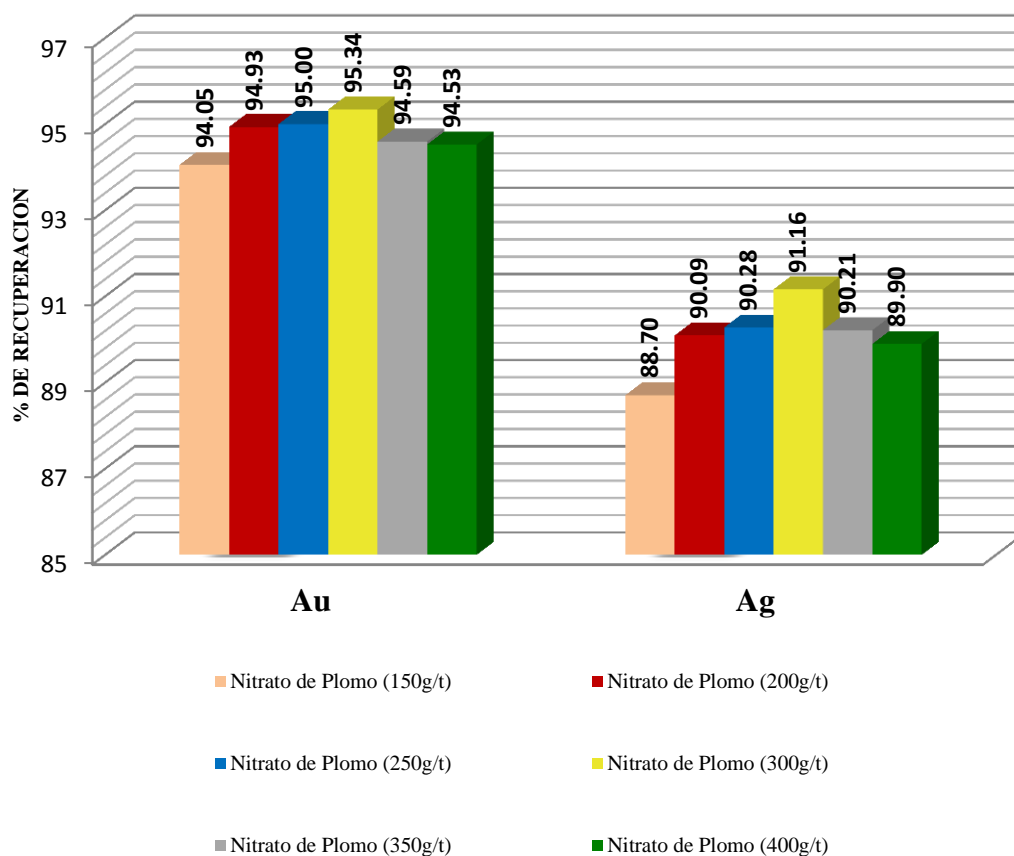


Figura 3.7: Recuperación de Oro y Plata a diferente adición de Nitrato de Plomo, NaCN=0.35%, pH=11.0-11.5

De acuerdo a las pruebas preliminares de adición de nitrato de plomo, la **Figura 3.7** muestra que a una menor adición de nitrato de plomo (150 g/t) la recuperación de oro y plata es de 94.05 % y 88.70 % respectivamente, mientras que a una mayor adición de nitrato de plomo (400 g/t) la recuperación de oro y plata es de 94.53 % y 89.90 % respectivamente. Sin

embargo no se observa diferencias muy significativas entre la menor adición y mayor adición de nitrato de plomo en cuanto a la recuperación de oro y plata.

A diferencia de la prueba de adición de nitrato de plomo a 300 g/t la recuperación obtenida es de 95.34 % de oro y 91.16 % de plata (Tabla 3.8) respectivamente, siendo estas recuperaciones mayores, además se observar el consumo promedio de los reactivos en las pruebas preliminares se muestra que entre las pruebas a 300 y 350 g/t de Nitrato de Plomo el consumo de cianuro es de 2.16 y 2.14 kg/t respectivamente (**Tabla 3.9**), siendo estas pruebas de menor consumo de reactivos.

Por lo que se determinó utilizar una adición de 300 g/t de nitrato de plomo para la cinética de cianuración con adición de nitrato de plomo y compararla con la prueba de cinética de cianuración sin adición de nitrato de plomo.

3.2.3 Prueba con Adición de Nitrato de Plomo

La **Tabla 3.10** muestra las condiciones iniciales de las pruebas realizadas. Para la prueba de cinética se realiza a diferentes tiempos de cianuración en botella (2h, 4h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h). Estas pruebas se realizaran con la adición de nitrato de plomo a 300g/t. Además se empleara como solución lixivante solución barren con el fin de aprovechar el nivel de cianuro contenido.

Tabla 3.10 Condiciones iniciales de la prueba con adición de Nitrato de plomo

Sólido (g)	1000.00
% S	32.07
Densidad (g/L)	1245.90
RPM	25
Tiempo Cianuración (h)	2, 4, 6, 12, 24, 48, 72
Nitrato de Plomo g/t	300
pH	11 a 11,50
% NaCN	0.35
% -m270	73.00

Solución Lixivante (Barren): %NaCN = 0.31

pH = 12.02

La **Tabla 3.11** muestran los resultados de recuperación obtenidos en las diferentes pruebas de cinética de 2, 4, 6, 12, 24, 48 y 72 horas con la adición de 300g/t de Nitrato de Plomo, y la **Figura 3.8** muestran la gráfica de la cinética de cianuración, además en la **Figura 3.9** se puede observar el consumo de reactivos (NaCN y Cal en kg/t).

Tabla 3.11 Extracción de oro y plata, con adición de Nitrato de plomo

Tiempo (hr)	Cabeza g/t		Relave g/t		% Extracción	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
2	7.40	163.50	4.66	119.72	37.03	26.78
4	7.40	163.50	2.85	83.41	61.49	48.98
6	7.40	163.50	1.87	62.32	74.73	61.88
12	7.40	163.50	1.11	40.48	85.00	75.24
24	7.40	163.50	0.59	23.78	92.03	85.46
48	7.40	163.50	0.43	16.74	94.19	89.76
72	7.40	163.50	0.32	13.42	95.68	91.79

Se observa que el porcentaje de recuperación del oro y plata son 95.68% y 91.79% respectivamente, mientras que el consumo de cianuro y cal es de 2.16 kg/t y 0.80kg/t respectivamente.

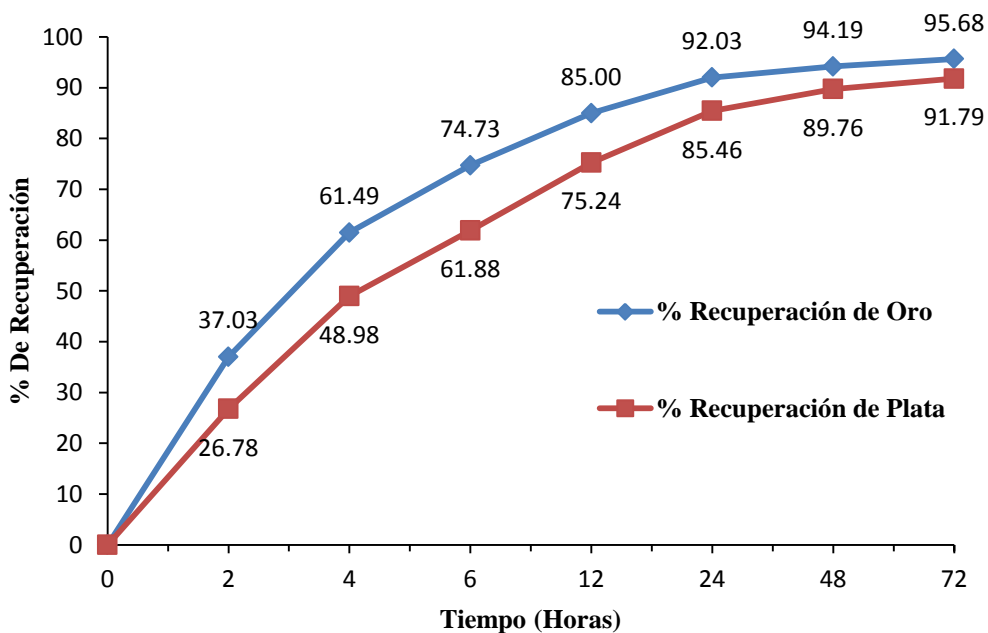


Figura 3.8: Cinética de recuperación de oro y plata, con nitrato de plomo (300 g/t).

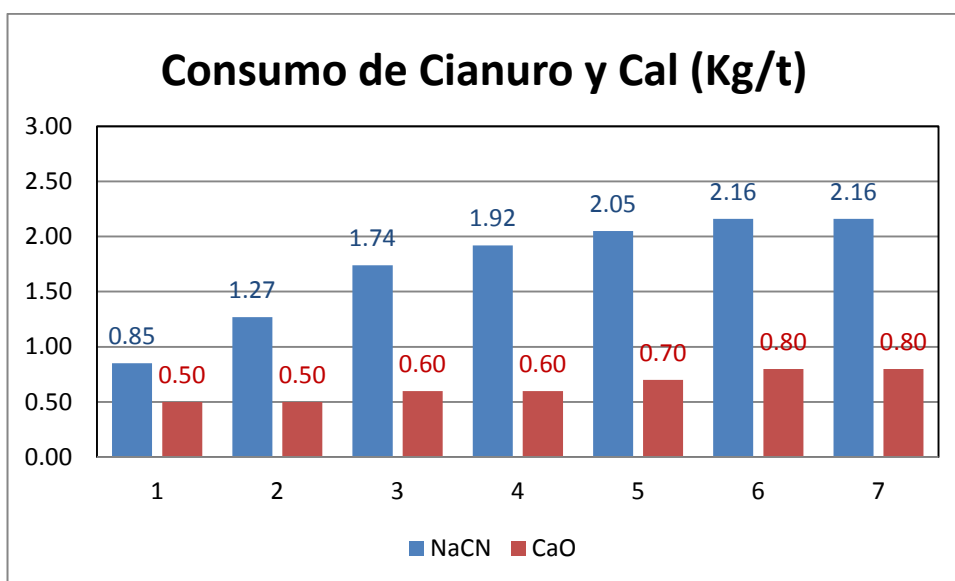


Figura 3.9: Consumo de cianuro y cal, con adición de nitrato de plomo (300 g/t).

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

De los resultados obtenidos de las pruebas de cianuración en el Laboratorio de Investigaciones Metalúrgicas, se observa una mejora en las recuperaciones de Au y Ag para el mineral compósito.

En el caso del Au se incrementó en 2% con la adición del nitrato y en 5% la recuperación de la Ag aproximadamente. La **Figura 4.1** muestra el comportamiento de la recuperación del oro en las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de nitrato de plomo, y la **Figura 4.2** el comportamiento de las recuperaciones de la plata.

Además se puede observar que durante las primeras 2 horas de cianuración la recuperación de oro con de nitrato de plomo fue de 37.03% mientras que la recuperación sin nitrato de plomo de 19.46%, esto muestra una mejor cinética de disolución del oro con el cianuro.

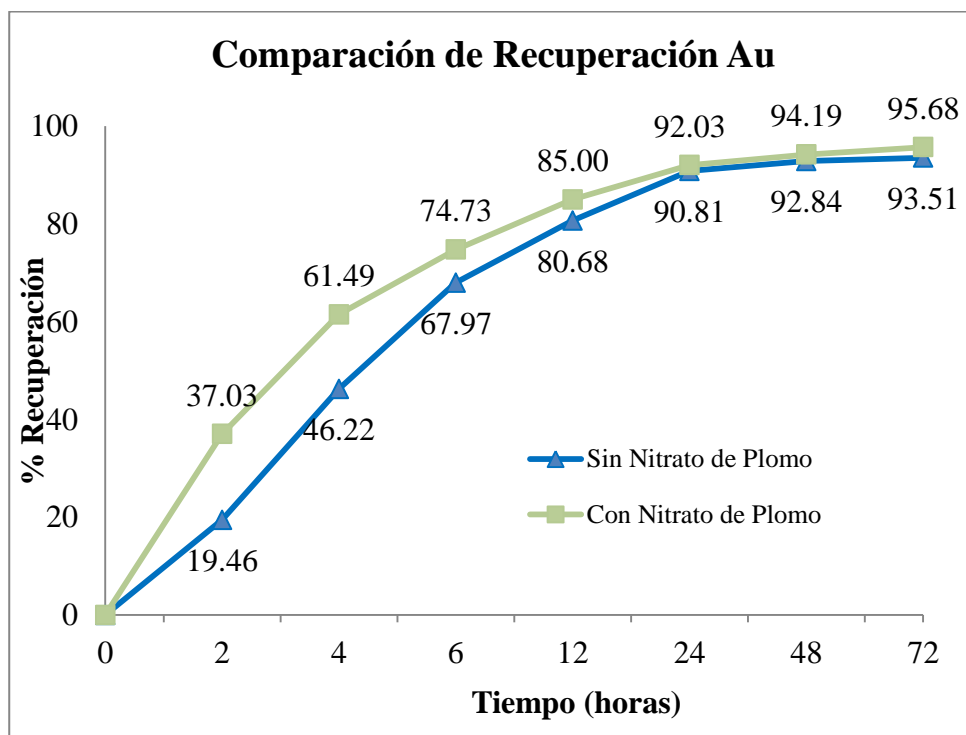


Figura 4.1: Comparación de la cinética de recuperación de oro para las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de nitrato de plomo.

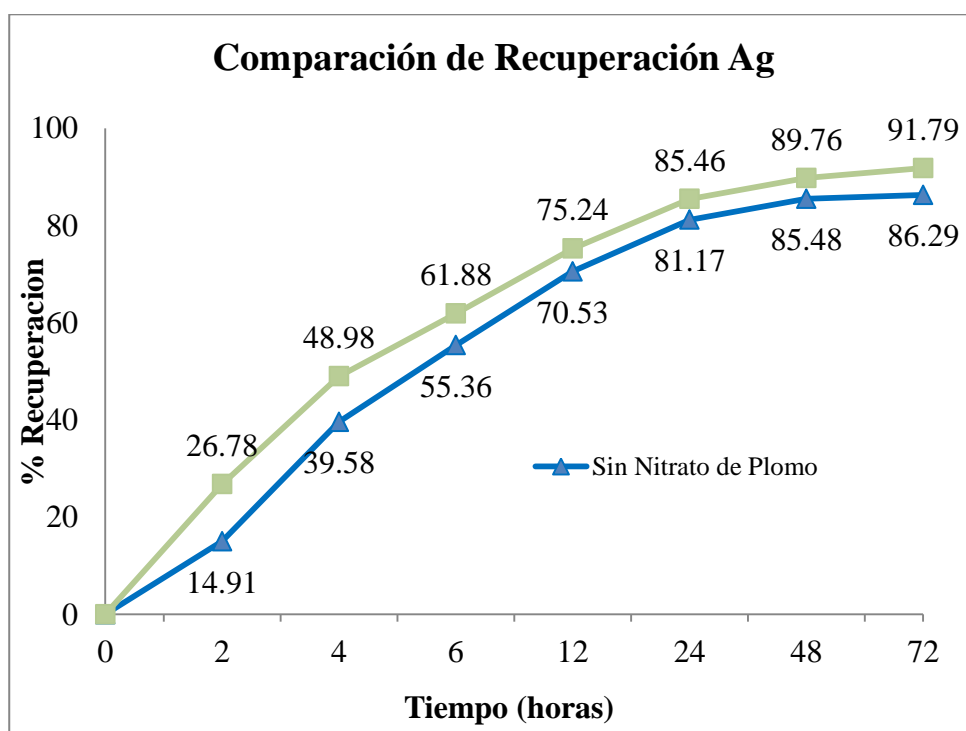


Figura 4.2: Comparación de la cinética de recuperación de la plata de las pruebas sin adición de nitrato de plomo y con adición de nitrato de plomo.

En tanto con respecto al consumo de reactivos como el cianuro de sodio, este se redujo en 0.36 kg/t en la prueba con nitrato de plomo, respecto al consumo de cianuro en la prueba sin adición de nitrato de plomo. La **Figura 4.3** muestra la comparación de consumos en cada una de las etapas de las diferentes pruebas.

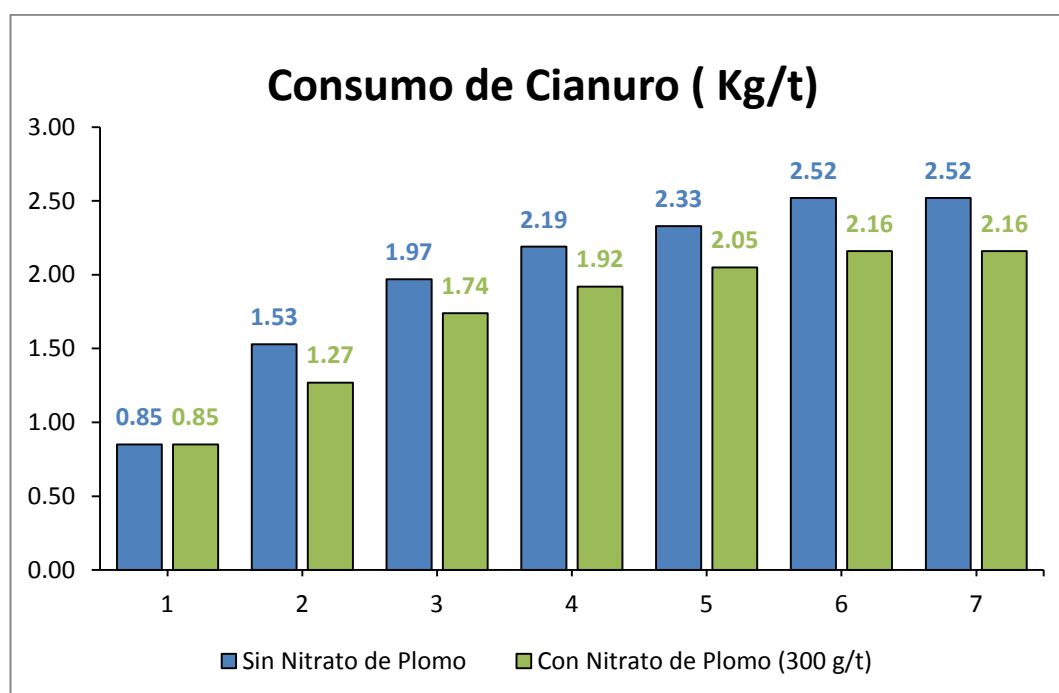


Figura 4.3: Gráfica comparativa del consumo de cianuro.

4.2 EFECTO EN LA OPERACIÓN DE PLANTA BENEFICIO

Las pruebas en el laboratorio metalúrgico mostraron resultados muy favorables en las recuperaciones de oro y plata con adición de nitrato de plomo, estos resultados son reflejados en la operación de la planta de beneficio. La **Figura 4.4** muestra los porcentajes de recuperación del oro y la plata desde el inicio de operación, y los cambios que se han venido dando hasta la actualidad con el uso de nitrato de plomo (300g/t).

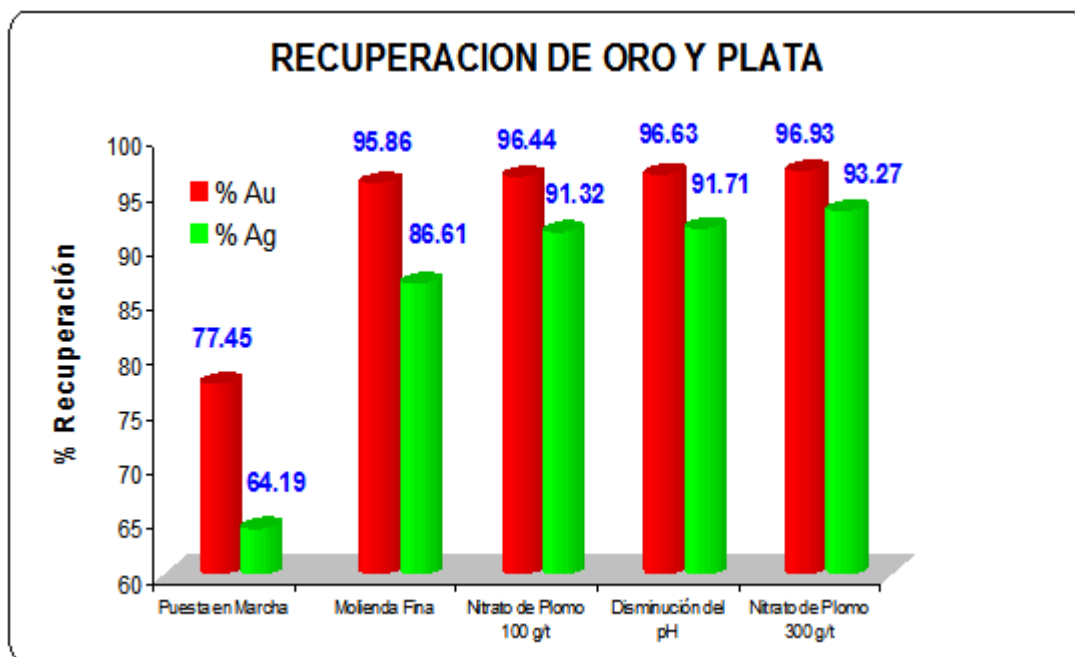


Figura 4.4: Efecto de los diversos cambios realizados desde la puesta en marcha de la planta (1998) en la recuperación de oro y plata.

Además en la **Figura 4.5**, se puede observar los porcentajes de recuperación del oro en las diferentes etapas de la operación, desde la puesta en marcha de la planta hasta la actualidad con el uso de nitrato de plomo, es claramente notoria la mayor recuperación de oro en el rebose del ciclón en la actualidad con el uso de nitrato de plomo (300g/t), es de entender que la velocidad de disolución del oro se acelera en presencia del nitrato de plomo.

Asimismo la **Figura 4.6** muestra los porcentajes de recuperación en el caso de la plata, desde el inicio de operación hasta la actualidad. En este caso la recuperación de plata actualmente también muestra una mejor recuperación en el rebose del ciclo comparando con las recuperaciones iniciales.

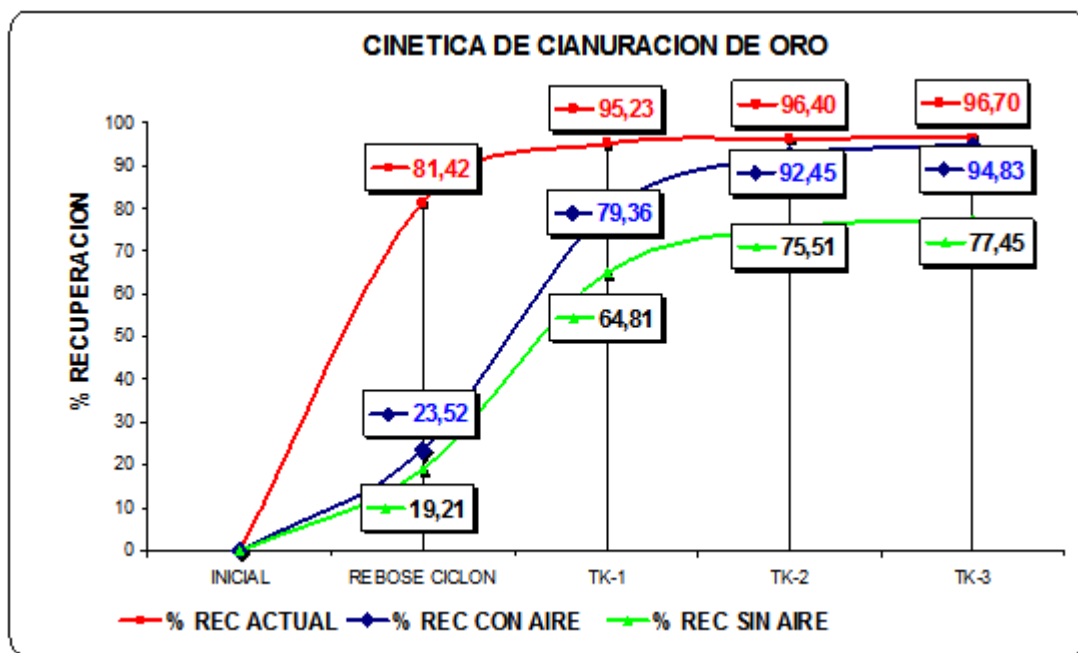


Figura 4.5: Efecto en la cinética de cianuración del oro en la planta beneficio, desde la puesta en marcha (1998).

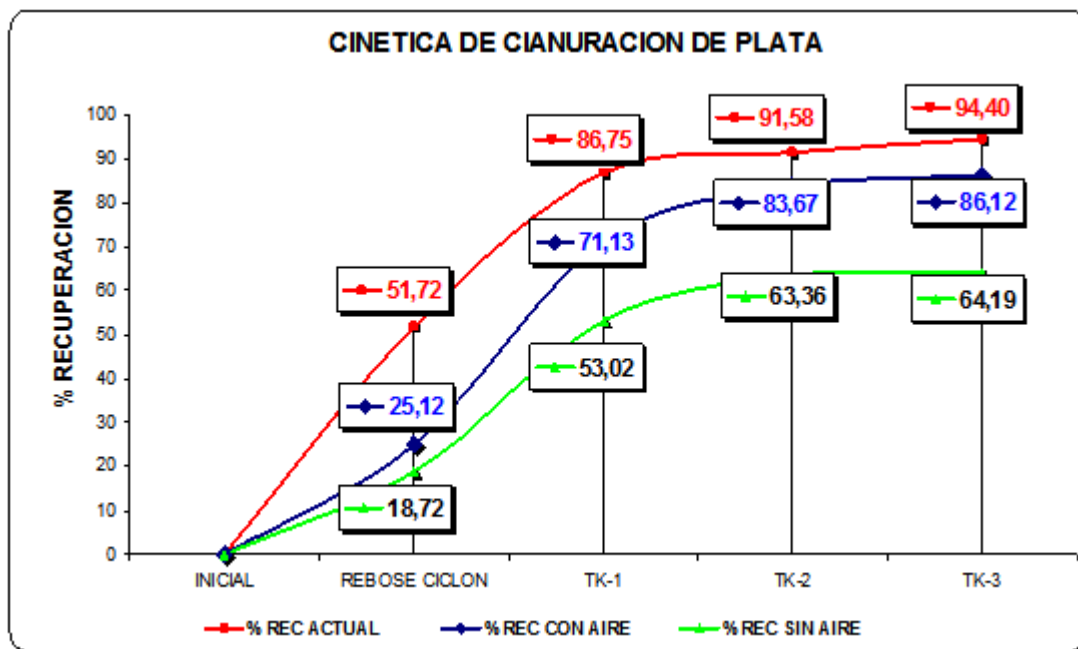


Figura 4.6: Efecto en la cinética de cianuración de la plata en la planta beneficio, desde la puesta en marcha (1998).

CONCLUSIONES

- La adición de Nitrato de plomo a 300 g/t, tuvo un efecto significativo especialmente en la recuperación de la plata que aumentó en 5.50 unidades porcentuales y la de oro en 2.16 unidades porcentuales.
- Para estas pruebas se han considerado parámetros de operación, con el fin de asemejarse a la operación real de la planta de beneficio. Por lo tanto el uso de barren como solución lixivante, se justifica con el empleo de un menor consumo de cianuro de sodio fresco.
- Mediante la pruebas realizadas se puede comprobar las mejoras en cuanto a la cinética de cianuración del oro con la adición de Nitrato de plomo en las primera 4 horas de cianuración con respecto a las pruebas sin adición de nitrato de plomo, esto es debido a que inhibe la pasivación de la superficie del oro a causa de los sulfuros presentes.

- Al contrario al aumento de cianuro el aumento del nitrato de plomo puede ser perjudicial a la cianuración esto es debido a que su incremento pasiva la superficie del oro, evitan así su lixiviación como se muestra en las pruebas preliminares a diferente adición de nitrato.
- Al añadir la solución de nitrato de plomo y solución cianurada fresca en la descarga del molino de bolas, presenta un efecto positivo en la cinética de cianuración en el caso del oro puede llegar a los tanques de lixiviación con casi 80% de recuperación mientras la plata con 60% recuperación aproximadamente, estos datos son reflejados en cada auditoria de muestreo que realizamos a la planta de beneficio cada mes.

BIBLIOGRAFIA

1. ALAIN F. TSHILOMBO, ROELØF F. SANDENBERGH, An electrochemical study of the effect of lead and sulphide ions on the dissolution rate of gold in alkaline cyanide solutions.
2. BARSKY, G., S.J. SWAINSON, AND N. HEDLEY. 1934. Dissolution of gold and silver in cyanide solution. Transactions A of the Institution of Mining and Metallurgy 112:660-677
3. CARUSO, S.G. 1975. The Chemistry of Cyanide Compounds and Their Behaviour in the Aquatic Environment. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon Institute of Research
4. CATHRO, K.J., Y A. WALKLEY. 1961. The Cyanidation of Gold. CSIRO Publication Melbourne, Australia: CSIRO

5. CATHRO, K.J., Y D.F.A. KOCH. 1964. The anodic dissolution of gold in cyanide solutions. *Journal of Electrochemical Society* 111:1416-1420
6. DOMIC MIHOVILOVIC, Esteban Miguel. *Hidrometalurgia- Fundamentos, proceso y aplicaciones*. Edición 2001, Editorial Andros Impresores Ltda. – Chile.
7. F. HABASHI, *Principles of extractive metallurgy, Hydrometallurgy vol. 2*, Gordon & Breach, New York, 1970.
8. FINKELSTEIN, N.P. 1972. The chemistry of the extraction of gold from its ores. Páginas 284-351 in *Gold Metallurgy on the Witwatersrand*. Editado por R.J. Adamson. Cape Town, South Africa: Cape & Transvaal Printers Ltd.
9. HISKEY, J.B., Y V.M. SANCHEZ. 1990. Mechanistic and kinetic aspects of silver dissolution in cyanide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry* 20:479-487
10. JOHN O. MARSDEN AND C. LAIN HOUSE. *The Chemistry of Gold Extraction*. Edición 2006.

11. NICOL, M.J., C.A. FLEMING, Y R.L. PAUL. 1987. The chemistry of the extraction of gold. Páginas 831-905 en The extractive Metallurgy of Gold. Monograph M7. Editado por G.G. Stanley. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy

12. NICOL, M.J. 1980. The anodic behavior of gold. Part II. Oxidation in alkaline solutions. Gold Bulletin 13:105-111

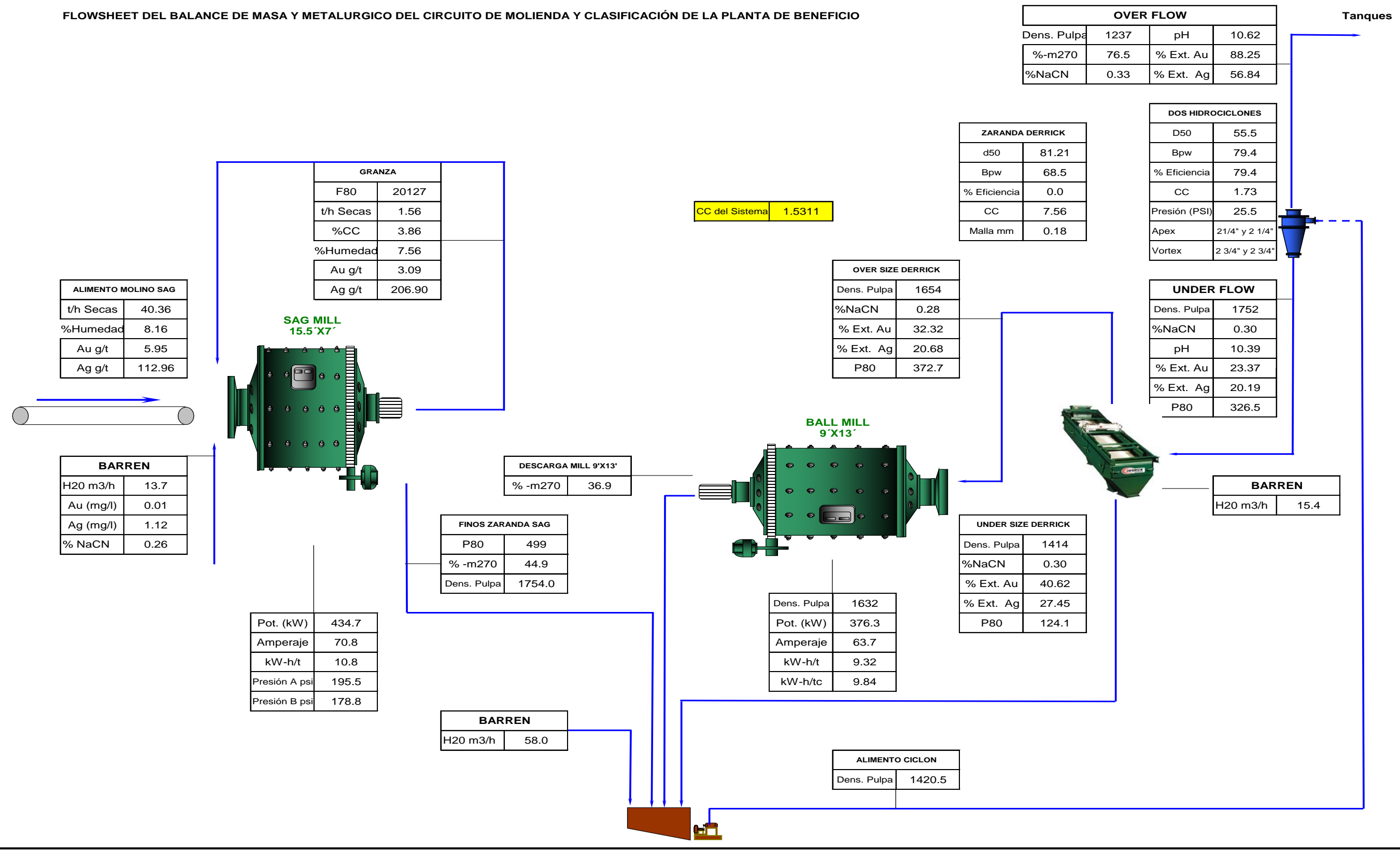
13. WEAST, R.C. 1981. Handbook of Chemistry and Physics. 62nd Edition. Boca Raton, FL: CRC Press

ANEXOS

Anexo N°1: Diagrama de Flujo de la Molienda

Anexo N° 2: Diagrama de Flujo de los Tanques de Lixiviación

FLWSHEET DEL BALANCE DE MASA Y METALURGICO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO



ALIMENTO MOLINO SAG	
t/h Secas	40.36
%Humedad	8.16
Au g/t	5.95
Ag g/t	112.96

BARREN	
H2O m3/h	13.7
Au (mg/l)	0.01
Ag (mg/l)	1.12
% NaCN	0.26

Pot. (kW)	434.7
Amperaje	70.8
kW-h/t	10.8
Presión A psi	195.5
Presión B psi	178.8

GRANZA	
F80	20127
t/h Secas	1.56
%CC	3.86
%Humedad	7.56
Au g/t	3.09
Ag g/t	206.90

FINOS ZARANDA SAG	
P80	499
% -m270	44.9
Dens. Pulpa	1754.0

BARREN	
H2O m3/h	58.0

DESCARGA MILL 9'X13'	
% -m270	36.9

CC del Sistema	1.5311
----------------	--------

Dens. Pulpa	1632
Pot. (kW)	376.3
Amperaje	63.7
kW-h/t	9.32
kW-h/tc	9.84

OVER SIZE DERRICK	
Dens. Pulpa	1654
%NaCN	0.28
% Ext. Au	32.32
% Ext. Ag	20.68
P80	372.7

UNDER SIZE DERRICK	
Dens. Pulpa	1414
%NaCN	0.30
% Ext. Au	40.62
% Ext. Ag	27.45
P80	124.1

ALIMENTO CICLON	
Dens. Pulpa	1420.5

ZARANDA DERRICK	
d50	81.21
Bpw	68.5
% Eficiencia	0.0
CC	7.56
Malla mm	0.18

OVER FLOW			
Dens. Pulpa	1237	pH	10.62
%-m270	76.5	% Ext. Au	88.25
%NaCN	0.33	% Ext. Ag	56.84

DOS HIDROCICLONES	
D50	55.5
Bpw	79.4
% Eficiencia	79.4
CC	1.73
Presión (PSI)	25.5
Apex	2 1/4" y 2 1/4"
Vortex	2 3/4" y 2 3/4"

UNDER FLOW	
Dens. Pulpa	1752
%NaCN	0.30
pH	10.39
% Ext. Au	23.37
% Ext. Ag	20.19
P80	326.5

BARREN	
H2O m3/h	15.4

Tanques

DIAGRAMA DE FLUJO DEL CIRCUITO DE LIXIVIACION EN TANQUES

