

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

“Rediseño de un modelo operativo existente que permita asegurar la eficiencia en la recuperación de oro y plata lixiviados dentro de un proceso de minería con decantación a contracorriente.”

José Manuel Córdova Mendoza

Guatemala
2010

“Rediseño de un modelo operativo existente que permita asegurar la eficiencia en la recuperación de oro y plata lixiviados dentro de un proceso de minería con decantación a contracorriente.”

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA


Facultad de Ingeniería

“Rediseño de un modelo operativo existente que permita asegurar la eficiencia en la recuperación de oro y plata lixiviados dentro de un proceso de minería con decantación a contracorriente.”

Trabajo de investigación presentado por
José Manuel Córdova Mendoza
para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Química


Guatemala
2010


Vo. Bo.:

(f) 
Ing. José Fernando Mendoza Pérez
Colegiado No. 1274

Tribunal Examinador

(f) 
Ing. José Fernando Mendoza Pérez
Colegiado No. 1274

(f) 
Ing. Oscar Armando Maldonado Ordoñez
Colegiado No. 90

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano
Colegiado No. 686

Fecha de aprobación: Guatemala, 27 de enero de 2010

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
A. Lixiviación – Generalidades	2
B. Preparación del sólido	3
C. Extracción de oro y plata – Generalidades	3
D. Descripción del proceso	5
1. Espesamiento	5
2. Circuito de lixiviación	10
3. Circuito de Decantación a Contracorriente (DCC)	12
III. JUSTIFICACIÓN	15
IV. OBJETIVOS	16
E. Objetivo general	16
F. Objetivos específicos	16
V. PROBLEMA A RESOLVER	17
VI. METODOLOGÍA	18
VII. RESULTADOS	20
VIII. DISCUSIÓN	22
IX. CONCLUSIONES	26
X. RECOMENDACIONES	27
XI. BIBLIOGRAFÍA	28
XII. APÉNDICE	29
A. DATOS ORIGINALES	29
B. DATOS DE PROCESO	34
C. CÁLCULO DE MUESTRA	37
D. DATOS CALCULADOS	39

LISTA DE CUADROS

Cuadro No. 1. Identificación de variables críticas que intervienen en la recuperación de oro y plata lixiviados	20
Cuadro No. 2. Datos de operación nuevos de los esperadores del sistema DCC. No. 1 al No. 4.	20
Cuadro No. 3. Datos obtenidos a partir del rediseño en la de operación del esperador del sistema DCC. No. 5.	21
Cuadro No. 4. Datos obtenidos a partir del rediseño en la de operación reestructuración del esperador del sistema DCC. No. 6.	21
Cuadro No. 5. Aumento en la capacidad de recuperación de oro y plata.	21
Cuadro No. 6. Eficiencia alcanzada en el proceso tomando como base los requerimientos planteados y a la molienda aplicada.	21
Cuadro No. 7. Utilidad de la recuperación	21
Cuadro No. 8. Datos de operación originales de los esperadores del sistema DCC. No. 1 al No. 4.	29
Cuadro No. 9. Datos de operación originales de los esperadores del sistema DCC. No. 5 y No. 6.	29
Cuadro No. 10. Niveles de operación de los tanques del proceso.	30
Cuadro No. 11. Niveles máximos de concentración en la recuperación de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6 (Análisis de colas), antes de la reestructuración.	30
Cuadro No. 12. Niveles de molienda y niveles de recuperación de mineral.	30
Cuadro No. 13. Niveles de concentración máximos requeridos en las colas del espesador de DCC No. 6.	30
Cuadro No. 14. Datos varios.	30
Cuadro No. 15. Niveles de recuperación promedio de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6 (Análisis de colas).	34
Cuadro No. 16. Mejora neta de la recuperación de oro y plata lixiviados.	34
Cuadro No. 17. Soluciones al problema planteadas y descartadas.	34
Cuadro No. 18. Densidad del bajo flujo requerida en el espesador de DCC No. 5.	39
Cuadro No. 19. Tonelaje descargado en los espesadores del sistema de DCC	39
Cuadro No. 20. Tonelaje descargado en los espesadores del sistema de DCC	39
Cuadro No. 21. Recuperación neta de oro y plata lixiviados	39
Cuadro No. 22. Eficiencia alcanzada en el proceso tomando como base los requerimientos planteados y a la molienda actual aplicada.	39
Cuadro No. 23. Utilidad neta de la recuperación	39

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar el rediseño de un modelo operativo existente que permitiera asegurar la eficiencia en la recuperación de oro y plata lixiviados dentro de un proceso de minería, sin incurrir en costos operativos adicionales.

Partiendo de un proceso existente y del desarrollo experimental dentro de un marco real, se presentaron tres soluciones dentro de las cuales se encuentran: primero, la instalación de un séptimo espesador en el sistema de decantación contracorriente, la cual fue declinada ya que conllevaba una inversión adicional de dinero y tiempo. Segundo, aumentar el flujo de agua de lavado al circuito de decantación a contracorriente (DCC) para mejorar la eficiencia de lavado, la cual se declinó ya que se afectaba el balance general del sistema. Y tercero, el rediseño de las variables críticas del proceso. Al lograr el rediseño se determinaron los niveles de recuperación promedio de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6, los cuales fueron de 0.15 ppm para el oro y 1.4 ppm para la plata. Esto representa una mejora de 57.4% y 60.0% respectivamente para el oro y la plata con respecto a los análisis de colas antes del rediseño. Esto representa una mejora neta de la recuperación de oro y plata lixiviados de 0.20 ppm para el oro y 2.10 ppm para la plata. La recuperación adicional de oro y plata lixiviados es de 3,809.59 oz de oro al mes y de 40,030.2 oz de plata al mes.

La utilidad aproximada de la recuperación con el rediseño sería de 0.01% adicional al mes para el oro y 0.09% adicional al mes para la plata con base a la producción anual a la que fue diseñada la planta.

ABSTRACT

The main objective of this study was to develop the redesign of an existing operating model that would ensure efficiency in the recovery of gold and silver leaching in a mining process, without incurring additional operating costs.

Based on an existing process and experimental development within a real, were three solutions within them: first, the installation of a seventh thickener in countercurrent decantation system, which was declined as it entailed an investment additional time and money. Second, increase the flow of wash water to countercurrent decantation circuit (DCC) to improve the washing performance, which was declined as it affected the balance of the system. And third, the redesign of the critical process variables. By achieving the redesign, the levels of average recovery of metals from low-flow analysis of DCC thickener No. 6, which were 0.15 ppm for gold and 1.4 ppm for silver. This represents an improvement of 57.4% and 60.0% respectively for the gold and silver with respect to the analysis of queues before the redesign. This represents a marked improvement in the recovery of gold and silver leaching of 0.20 ppm and 2.10 ppm gold for silver. Additional recovery of gold and silver is leached 3,809.59 oz of gold per month and 40,030.2 oz silver per month.

The approximate value of the recovery with the restructuring would be 0.01% additional per month for gold and 0.09% additional per month for the silver.

I. INTRODUCCIÓN

Las plantas industriales buscan ser líderes en un ambiente competitivo, dinámico, diversificado e innovador. Una característica común de los procesos industriales actuales es el constante y rápido crecimiento en la capacidad de producción y calidad.

La minería es una actividad económica, que a lo largo del tiempo ha ido cambiando de lugar e intensidad y como cualquier otra industria, en aras de incrementar su producción, busca extraer y recuperar la mayor cantidad de mineral en el menor tiempo posible. Pero cada vez que se aumenta la producción por encima del diseño de una planta se necesita hacer las modificaciones de reingeniería y de rediseño tanto de los equipos como de los modelos operativos para ajustar ese incremento en la producción sin descuidar la calidad de la recuperación del mineral explotado.

El proceso de la industria minera está compuesto por varias etapas para lograr la producción de los minerales, dentro de las cuales se encuentran el proceso de extracción, trituración, molienda, lixiviación y recuperación.

El proceso de minería para la producción de oro y plata posee como una de sus partes principales el sistema de recuperación de minerales por decantación a contracorriente (DCC).

El objetivo total del circuito de DCC es procesar el flujo continuo de pulpa de mineral desde el circuito de lixiviación y recuperar el oro y la plata de una solución rica. Razón por la cual, dicho sistema juega un papel sumamente importante dentro del proceso, por lo que se torna necesario el mantener un nivel de recuperación máximo de los metales preciosos.

Así, la elaboración de este trabajo busca el rediseño de un proceso existente en la industria minera guatemalteca, para lograr aumentar la eficiencia en la recuperación de minerales lixiviados.

II. ANTECEDENTES

El proceso hidrometalúrgico más utilizado en la recuperación del oro de sus menas, es aquel en donde el oro se disuelve mediante soluciones alcalinas cianuradas, en presencia de oxígeno (Udupa *et al* 1990).

El mineral de mina debe ser reducido de tamaño hasta alcanzar una granulometría que permita a la solución lixivante alcanzar el metal valioso y llevarlo a solución. La granulometría de operación se consigue, mediante la aplicación de molienda en molinos de bolas operando en húmedo. En esta etapa es donde comienza la lixiviación del oro, pues es practica común agregar al molino cianuro de sodio y cal; esto es para que en la medida que la partícula se quiebre y deje expuesta la superficie fresca del mineral de oro, la solución comience a actuar y a disolver a este último (Chaves, 1985). Dependiendo de la refractariedad del mineral, en esta etapa, se puede alcanzar un porcentaje importante en la disolución de este metal. El resto del oro no disuelto aún, es lixiviado en una serie de tanques agitadores, cuyo volumen es determinado en función del tiempo de residencia, obtenido previamente en ensayos de laboratorio. La agitación puede ser mecánica, mediante el insuflado de aire, o mediante la aplicación de ambas. (Ellis y Senanayake, 2004)

En el proceso convencional, decantación en contracorriente mas filtración, la solución con oro es separada del sólido por decantación y por sucesivos lavados de la pulpa en contracorriente y finalmente es filtrada. La torta que sale de los filtros, presenta aproximadamente un 10 % de humedad. Esta humedad, no es otra cosa más que solución con algo de oro disuelto, que será enviado junto con los sólidos, previa destrucción del cianuro, al dique de colas. Por último la solución rica es clarificada, desoxigenada, y el oro precipitado con polvo de zinc muy fino, de alta pureza y doblemente sublimado. El precipitado Zn-Au-Pb, es separado de la solución mediante filtros de presión, luego es secado y enviado a fundición, en donde se obtiene un bullón (Pb, Zn, Au), factible de enviar a refinación. La solución con oro disuelto regresa al circuito de lixiviación. El oro que por alguna razón (normalmente falta de molienda) quedó ocluido dentro de la partícula de mineral, más algunas partículas que no tuvieron suficiente tiempo de contacto con la solución (partículas gruesa), más el oro disuelto contenido en solución que acompaña a los sólidos hacia el dique de colas, constituyen las pérdidas del proceso y estas estarán reflejadas en el valor de la recuperación final del oro (Chaves,1985).

A. Lixiviación – Generalidades

La lixiviación es la disolución preferente de uno o más componentes de una mezcla sólida por contacto con un disolvente líquido. Esta operación unitaria, una de las más antiguas en la industria química, ha recibido muchos nombres, según la técnica más o menos compleja utilizada para llevarla a cabo.

Tal vez las industrias metalúrgicas son las que más utilizan las operaciones de lixiviación. La mayoría de los minerales útiles se encuentran en forma de mezclas, con grandes proporciones de componentes indeseables; por eso, la lixiviación del material valioso es un método de separación que se aplica con frecuencia. (Treybal, 1980:792)

B. Preparación del sólido

El éxito de una lixiviación y la técnica que se va a utilizar dependen con mucha frecuencia de cualquier tratamiento anterior que se le pueda dar al sólido. En algunos casos, las pequeñas partículas del material soluble están completamente rodeadas de una matriz de materia insoluble. Entonces, el disolvente se debe difundir en la masa y la solución resultante se debe difundir hacia el exterior antes de poder lograr una separación. Esto es lo que sucede con muchos materiales metalúrgicos. La trituración y molienda de estos sólidos acelerará bastante la acción de lixiviación, porque las porciones solubles son entonces más accesibles al disolvente. (Treybal, 1980:793)

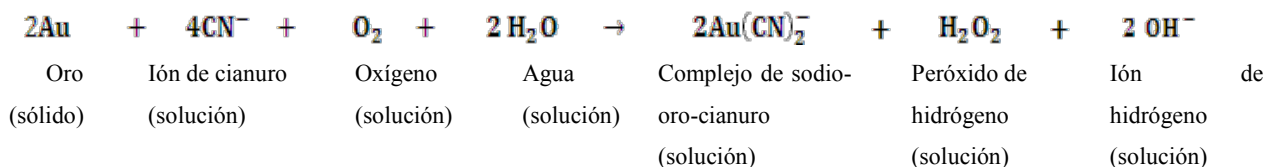
C. Extracción de oro y plata – Generalidades

El oro es uno de los metales más durables y resistentes a la corrosión, y es extremadamente difícil de disolver. Puede ser disuelto por unas cuantas soluciones entre las que se incluyen cianuro de sodio (NaCN), cianuro de potasio (KCN), agua regia (una potente mezcla de 25 por ciento de ácido nítrico [HNO₃] y 75 por ciento de ácido hidroclorehídrico [HCl]), y un pequeño número de otros reactivos especiales. El cianuro de sodio es la opción de reactivos más común, principalmente debido a la efectividad en términos de costos, y es el reactivo seleccionado para el proyecto. La plata también se disuelve con cianuro de sodio. Para simplificar las explicaciones en esta sección, todas las referencias a la disolución de oro, absorción, y desorción también se aplican a la plata.

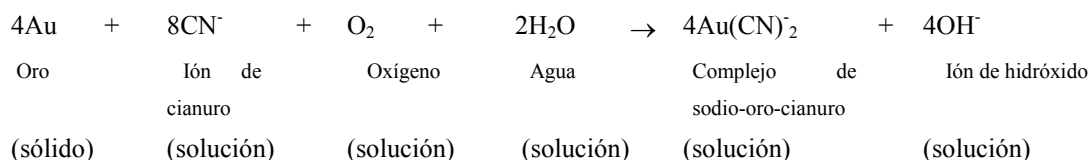
Se agrega aproximadamente 0.22 gramos de cianuro de sodio por tonelada de mineral, y suficiente cal [CaO] como lechada de cal en el circuito de molienda para mantener el pH a aproximadamente 10.5. (PAI, 2004:1)

La reacción química para disolver las partículas sólidas de oro (Au) en los tanques de lixiviación con la solución de cianuro diluido consiste de las siguientes dos etapas:

La mayoría de oro es disuelto por reacción:



Una pequeña, pero significativa parte del oro se disuelve de acuerdo a la siguiente reacción:



El complejo resultante de sodio-oro-cianuro es muy estable en la solución de lixiviación rica.

La tasa de disolución de oro es directamente proporcional a la concentración de cianuro en solución, hasta una tasa máxima. Más allá de este máximo, los aumentos en la concentración de cianuro pueden empezar a inhibir la tasa de disolución. La reacción también depende de la temperatura, y la temperatura óptima en un depósito de lixiviación agitado es 85°C, a pesar de que en la práctica esta temperatura no se obtiene pues es prohibitivamente costosa para calentar grandes volúmenes de pulpa en las plantas de proceso.

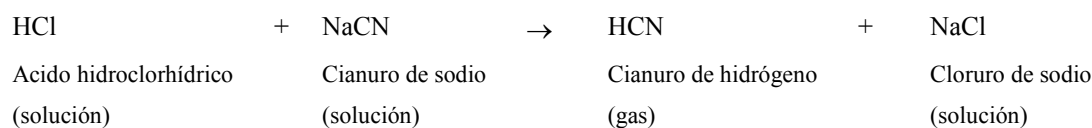
La disolución de oro consume solamente la mitad de un por ciento del cianuro usado en el proceso de lixiviación. El resto del cianuro es consumido por otros elementos como hierro y cobre (denominados cianicidas) o es destruido por oxidación en la planta o en la destoxificación de relaves. (PAI, 2004: 11)

La mayoría del resto de los minerales sigue sin disolver. La pulpa ahora contiene lo siguiente:

- Ganga.
- Solución del proceso.
- Compuestos solubles de material no deseado.
- Complejos de cianuro-plata y cianuro-oro disueltos.

La disolución de oro con soluciones de cianuro debe realizarse en un medio alcalino. El cianuro de sodio se descompone, generando gas de cianuro de hidrógeno nocivo, cuando el pH de la solución está por debajo de 10. Para mantener la alcalinidad protectora de la solución de lixiviación, minimizando de esa manera la generación de gas de cianuro hidrógeno, generalmente se agrega cal hidratada ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) o cáustica (NaOH) a las soluciones que contienen cianuro.

A continuación se muestra un ejemplo de la reacción básica de la solución de cianuro de sodio con un ácido común.



En el circuito de molienda, se agrega aproximadamente 1.8 kilogramos de cal por tonelada de mineral al molino para aumentar el pH en el espesador de molienda y antes que se agregue la solución de cianuro al circuito de lixiviación. Ello mantiene la alcalinidad protectora de las pulpas y las soluciones que contienen cianuro. Se coloca un sensor medidor de pH en el rebalse del espesador de molienda para controlar la adición de cal en el molino. (PAI, 2004:12)

D. Descripción del proceso

La operación de lixiviación y decantación contracorriente (DCC) comprende el espesamiento de mineral molido para prepararlo para la lixiviación con cianuro. La solución de lixiviación con cianuro disuelve el oro y la plata. En una posterior sección de decantación contracorriente (DCC), se lava el oro y la plata disueltos del mineral molido lixiviado.

El metal importante en la operación es el oro, siendo la plata de importancia secundaria. El oro contenido en el mineral tal como sale de la mina (ROM) se encuentra a una ley promedio de 5.51 g/t (gramos de oro por tonelada de mineral), y la plata a una ley promedio de 91.80 g/t. El mineral se tritura y muele para exponer las partículas de mineral a una solución de lixiviación con cianuro. El cianuro disuelve el oro y la plata, que son posteriormente recuperados con el lavado de DCC. (PAI, 2004: 1)

Esta sección comprende los siguientes sistemas principales. A continuación se describe de manera breve sus funciones.

Espesamiento	En el espesamiento se recupera el oro y la plata disueltos en una <i>solución rica</i> (solución que contiene oro y plata disueltos) y produce una pulpa espesada lista para la lixiviación.
Lixiviación	El circuito de lixiviación proporciona el tiempo de permanencia para permitir que la solución de cianuro disuelva el oro y la plata. Esta sección también presenta los aspectos importantes del proceso de lixiviación del oro y la plata.
DCC	La función del circuito de DCC es lavar el oro y la plata disueltos de los sólidos de la pulpa.

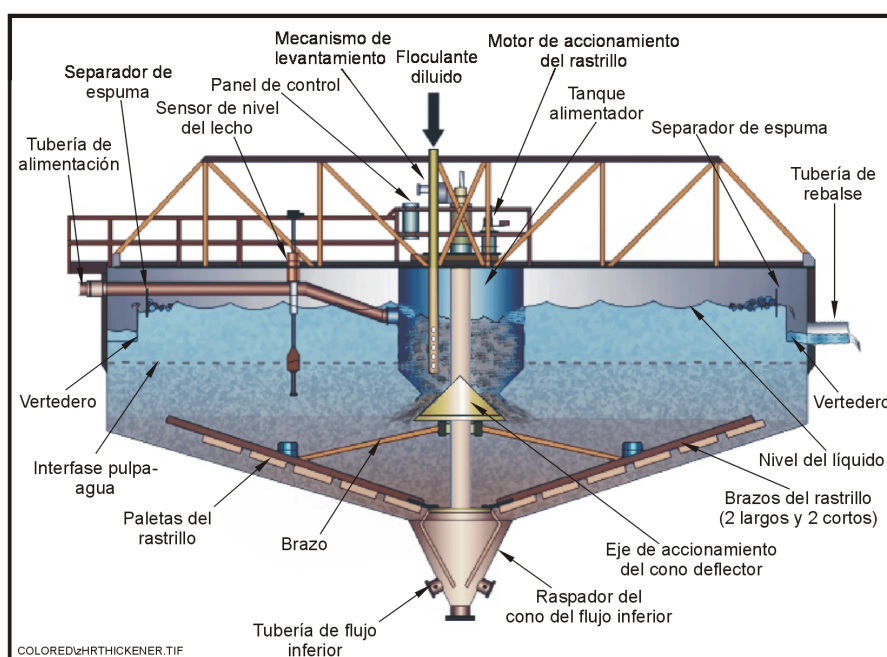
1. **Espesamiento.** La pulpa de mineral es molida a un tamaño en el que 80 por ciento de las partículas son más pequeñas que tamiz 100 (150 micras) en el circuito de molienda. La pulpa molida se descarga de la malla de desechos lineal; luego los tanques disipadores de velocidad reducen la velocidad del flujo cuando ingresa al tanque mezclador de alimentación del espesador de molienda. La pulpa tiene una densidad de aproximadamente 24 por ciento de sólidos.

La pulpa diluida fluye por gravedad del tanque mezclador de alimentación del espesador al espesador de molienda. La pulpa es parcialmente drenada hasta 45 por ciento de sólidos en el espesador de molienda.

La solución contiene valores de metal de oro y plata disueltos. El espesador de molienda separa los sólidos de la solución, ayudado por la adición de floculante.

Hay diferentes tipos de depósitos del espesador, a los que generalmente se denomina convencional o de alta velocidad. La Figura No. 1 ilustra un espesador de alta velocidad, y a continuación se indica el principio de operación. (Treybal, 1980:796)

Figura No. 1
Espesador de alta velocidad



(Treybal, 1980: 796)

a. Principio de operación de espesador de alta velocidad. Los espesadores están diseñados para separar las partículas sólidas de una pulpa del líquido, dejando que los sólidos se asienten por gravedad y formen una pulpa de mayor densidad que es extraída en la base del espesador. El objetivo operacional es producir un líquido claro libre de sólidos en el rebalse y un producto densificado en el flujo inferior. Este líquido rebosa el borde superior (vertedero) del espesador y cae a una batea interna. El rebalse combinado del espesador fluye al cajón externo de rebalse.

El espesador consiste de un tanque, un medio para introducir la alimentación con un mínimo de turbulencia, y un rastrillo para llevar los sólidos asentados hasta un punto de descarga. La fuerza de

accionamiento en el centro del brazo del rastrillo se aplica con un motor hidráulico y una caja de engranajes. Los brazos del rastrillo tienen funciones de levantamiento y bajada automáticas para evitar el alto torque del rastrillo.

Los espesadores de alta velocidad son más pequeños en diámetro que los espesadores convencionales. Por lo tanto, ocupan mucho menos espacio que los espesadores convencionales. Entre otras ventajas, los espesadores de alta velocidad tienen un volumen de tanque más pequeño, de manera que aceleran los arranques o paradas, y se requiere menos volumen para almacenar el producto en el caso que el tanque tenga que vaciarse. Los espesadores de alta velocidad consumen más floculante y tienen un rastrillo más fuerte.

La alimentación que ingresa al pozo de alimentación en una tangente promueve la mezcla de la pulpa sin turbulencia. El líquido de la superficie del espesador fluye al pozo de alimentación para diluir la alimentación que ingresa (autodilución). El floculante diluido es inyectado al pozo de alimentación por tuberías de rociado. La dispersión eficiente del floculante se asegura con la acción mezcladora de la pulpa.

Esta adición de floculante empieza a unir las partículas finas formándose aglomerados, también conocidos como flóculos, y aumenta de manera significativa la tasa de asentamiento en el espesador.

La alimentación floculada es inyectada al espesador por debajo de la interfase a un ángulo controlado por el cono de deflexión. Las partículas sólidas se asientan, formando una zona de compactación en la porción inferior del espesador. La introducción de sólidos por debajo de la interfase permite que las partículas en la capa de la pulpa por encima del punto de ingreso actúen como un filtro, dando como resultado una mayor tasa de asentamiento que en el espesador convencional.

La porción más baja de la zona de compactación es surcada por los rastrillos hacia el cono de descarga en la base del espesador. Cuando el espesador está trabajando de manera adecuada y cuenta con una adecuada profundidad de sólidos, la densidad del flujo inferior es alta. La densidad del flujo inferior del espesador es un buen indicador del equilibrio entre la velocidad de alimentación y la de descarga. Se puede lograr una alta densidad permitiendo que se acumule el lecho de pulpa en el espesador. Ello da tiempo para que la pulpa se compacte y para que el exceso de agua se percole desde el lecho.

La mayoría de los espesadores pueden trabajar cerca a la densidad máxima de flujo inferior sin formar una carga demasiado alta en el rastrillo. A medida que la densidad aumenta al máximo absoluto, la carga en los rastrillos aumenta considerablemente lo que significa que el espesador se acerca a una sobrecarga. Si la densidad es demasiado alta, la velocidad de extracción de la pulpa de flujo inferior (la velocidad de extracción) debe aumentar temporalmente con el fin de reducir la cantidad de sólidos en el espesador. De manera similar, una densidad demasiado baja indica que el lecho de pulpa es muy poco profundo y que se

debe reducir la extracción de flujo inferior y/o aumentar la adición de floculantes. Siempre mantenga presente que el tonelaje de sólidos retirado debe ser igual a lo alimentado al espesador, es decir, el tonelaje de sólidos en el espesador debe seguir constante.

Una forma de asegurar un tonelaje constante de sólidos en el espesador es midiendo la presión cerca a la parte inferior. Debido a que los sólidos en el espesador son más densos que el agua que desplazan, una columna de pulpa ejerce más fuerza cerca de la parte inferior del espesador que la columna de agua solamente. Esta presión puede ser directamente relacionada con el tonelaje de sólidos (o volumen del lecho) en el espesador.

A medida que las densidades de la pulpa se hacen mayores, la pulpa se hace más viscosa. La fuerza necesaria para llevar los rastrillos por el espesador aumenta, y, si no se baja, puede afectar los rastrillos y la estructura de soporte de rastrillo. La medida del torque (resistencia al giro) puede usarse para controlar la velocidad de la descarga del flujo inferior, que cambia la densidad del flujo inferior y la viscosidad de la pulpa.

Se proporcionan alarmas para alertar al operador cuando el rastrillo experimenta un torque mayor. Un alto nivel de torque en el rastrillo indica una mayor densidad de pulpa o la unión mecánica del rastrillo. Si el torque continua aumentando, un mecanismo levantador eleva los rastrillos lentamente mientras el motor continúa haciéndolos girar. A medida que los rastrillos se levantan del lecho de lodos, el torque se reduce. Si el torque continúa aumentando hasta llegar a un nivel muy alto aunque se estén levantando los rastrillos, el motor del rastrillo se detiene para evitar ocasionar daños a los rastrillos.

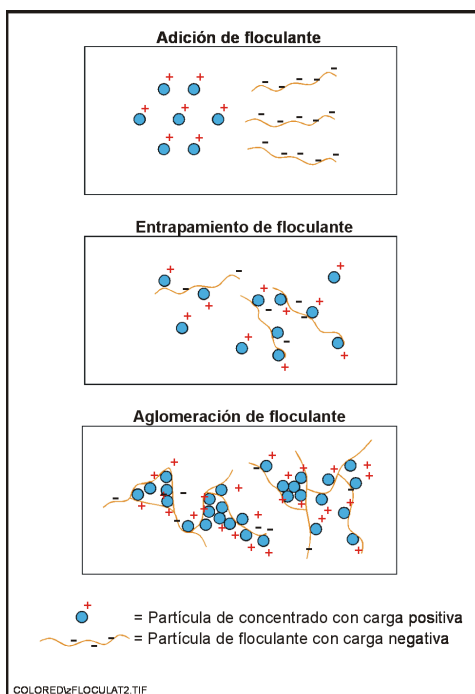
Los rastrillos del espesador de molienda rotan por la acción de un motor hidráulico y pueden ser levantados con un mecanismo levantador hidráulico. (Treybal, 1980:796)

b. Principio de operación del floculante. Los sólidos finos suspendidos en agua se asientan muy lentamente debido a su corto tamaño. Los floculantes son productos químicos diseñados para hacer que las partículas finas en suspensión se aglomeren en partículas más grandes. Los sólidos aglomerados, denominados flóculos, se asientan más rápidamente que las partículas individuales. El agua de donde se asientan los sólidos es más clara y ya no contiene partículas demasiado finas que se asienten.

Los floculantes usados en este caso son polímeros (cadenas de moléculas juntas), que son capaces de capturar partículas finas de sólidos en suspensión en sus redes y hacer que se formen flóculos. La verdadera mecánica tras la unión de las partículas de sólidos es similar a la atracción causada por la electricidad estática.

Esto está relacionado con muy pequeñas cargas eléctricas en las superficies de las partículas. Dependiendo de la aplicación específica, el floculante se adapta para recibir carga fuerte o débil. Es aniónico (con carga negativa, que atrae partículas de carga positiva) o catiónico (de carga positiva, que atrae partículas de carga negativa). (PAI, 2004: 4)

Figura No. 2
Floculante



(PAI, 2004: 4)

La acción de entrapamiento de los floculantes se produce tan pronto entran en contacto con los sólidos. A menos que las moléculas de floculantes estén dispersas en la pulpa que está siendo floculada, todo el floculante puede emplearse atrapando tan solo unas cuantas partículas. Si las moléculas del floculante se dispersan de manera adecuada, la mayoría de las partículas se aglomerarán. Para mejorar la dispersión, siempre se agrega floculante como una solución muy diluida (en este caso, 0.015 por ciento por peso disuelto en agua). De ser posible, también se usan varios puntos de adición.

Cuando una bomba dosificadora de floculantes del espesador de molienda extrae el floculante del tanque de almacenamiento, el floculante tiene una concentración de 0.5 por ciento. Luego se bombea al tanque mezclador de alimentación del espesador de molienda. Se agrega agua de lavado por los mezcladores en línea para diluir el floculante hasta obtener una solución de aproximadamente 0.015 por ciento de concentración. La bomba dosificadora del espesador de molienda es una de las siete bombas usadas para agregar floculantes a los espesadores. Una de las siete es una bomba standby. Las bombas

dosificadoras de floculante son bombas de cavidad progresiva. Las bombas de cavidad progresiva se usan porque no producen el tipo de corte que produciría una bomba centrífuga, haciendo que el floculante se deteriore.

2. **Circuito de lixiviación.** La pulpa espesada es bombeada a un cajón de distribución de la alimentación de lixiviación para preparar la pulpa para el lixiviado. El objetivo del circuito de lixiviación es disolver el oro y la plata de los sólidos del flujo inferior del espesador de molienda. También se agregan las siguientes corrientes al cajón de distribución de la alimentación de lixiviación:

- Solución de cianuro.
- Lechada de cal.
- Derrame y agua de lavado del sumidero del área de lechada.

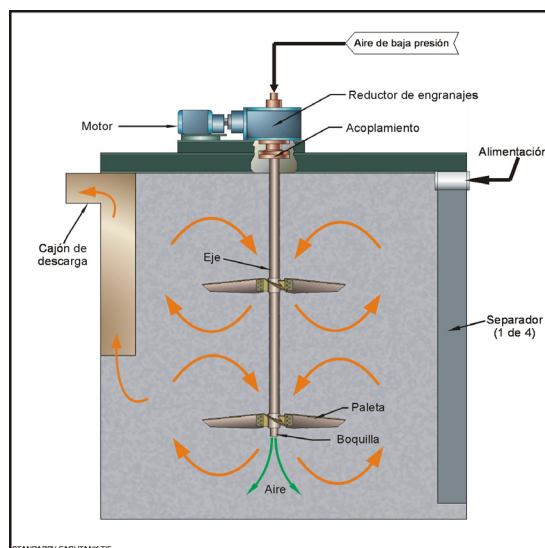
La solución de cianuro se agrega como una relación del peso del cianuro con los sólidos descargados de las bombas de flujo inferior del espesador de molienda. La solución de cianuro también puede ser agregada manualmente a los Tanques de lixiviación a través de válvulas de control.

La lechada de cal se agrega para mantener el pH del primer tanque de lixiviación. El distribuidor de alimentación de lixiviación es un tanque cerrado. La pulpa que descarga del tanque puede ser enviada al primer o segundo de seis tanques de lixiviación agitados dispuestos en serie. El distribuidor de alimentación de lixiviación cuenta con dos válvulas de cuchilla accionadas manualmente, una envía el flujo de pulpa al primer tanque de lixiviación, y la otra se usa cuando es necesario desviar el primer tanque y dirigir el flujo al segundo.

Los tanques de lixiviación, que se ilustran en la Figura 4.8, tienen una altura equivalente a su diámetro. Cada tanque tiene un tiempo de retención de aproximadamente ocho horas a la velocidad de diseño, por un tiempo de retención de 48 horas para la lixiviación de todo el circuito.

Cada tanque cuenta con un agitador de bombeo descendente axial dual accionado por un motor eléctrico conectado a un reductor de engranajes. (Treybal, 1980:812)

Figura No. 3.
Tanque de lixiviación agitado



(Treybal, 1980:812)

a. Principio de operación del Tanque de lixiviación agitado. El tanque de lixiviación está diseñado (1) para proporcionar una completa y continua mezcla de pulpa, y (2) para inyectar aire (que contiene oxígeno) a la pulpa para la reacción química con el cianuro que disuelve el oro y la plata. El trabajo de prueba metalúrgica inicial en el mineral determina el tiempo total necesario para la lixiviación. El tiempo requerido para la lixiviación y el flujo de pulpa por hora determina el volumen de tanque total necesario para la lixiviación. El tiempo requerido para la lixiviación y el flujo de pulpa por hora determina el volumen de tanque total necesario. Incluso si se calculara que un tanque es suficiente, los diseñadores normalmente proporcionan dos o tres tanques del volumen requerido. De esta manera se asegura que no haya un cortocircuito de la pulpa, es decir, que no haya una derivación accidental de una parte de la pulpa fuera del tanque, lo que daría como resultado un tiempo de contacto insuficiente entre el mineral y el cianuro. (Treybal, 1980, 809)

Los tanques de lixiviación están hechos de acero al carbono. Están equipados con un mecanismo agitador de un solo impulsor accionado por un motor eléctrico a través de un reductor de engranajes para mantener la pulpa en suspensión. Además, para contribuir a una mezcla adecuada, la pulpa es introducida al tanque por la parte superior, y baja por una derivación vertical que se extiende por el centro del tanque.

Se cuenta con un distribuidor múltiple de aire que proporciona aire a baja presión al tanque a través del eje hueco del agitador. El oxígeno contenido en el aire es un elemento necesario para la reacción de lixiviación. (Treybal, 1980: 810)

La pulpa ingresa por la parte superior del tanque, fluye a la zona de mezcla en la base del tanque y luego por la caja de descarga sale al siguiente tanque. A medida que la pulpa fluye por los tanques de lixiviación, el oro es disuelto en el proceso de cianuración. La pulpa sale del tanque por una de las dos líneas de salida, cada una con una válvula de cuchilla. Una de las válvulas envía el flujo al siguiente tanque en la serie, y la otra puede ser usada cuando sea necesario para pasar el tanque siguiente aguas abajo. Cada tanque aguas abajo está ligeramente más bajo que el anterior con el fin de asegurar un adecuado flujo de la pulpa sin que se sedimenten los sólidos y se obture la batea. (PAI, 2004:15)

El aire a baja presión es introducido al tanque de lixiviación por el eje del agitador para proporcionar el oxígeno necesario para que se produzca la reacción de lixiviación. La cantidad de aire es inicialmente ajustada por el operador usando una válvula de flujo y monitoreando el flujo en un indicador local de flujo, pero el operador debe observar la superficie de la pulpa y observar la apariencia general de las burbujas de aire. Deben aparecer de manera uniforme en toda la superficie del tanque, y tener aproximadamente 2 centímetros de diámetro. Las burbujas grandes generalmente indican un flujo de aire excesivo. Un flujo bajo o algunas pocas y pequeñas burbujas pueden indicar que hay una tubería de distribución o una boquilla del agitador atorada. (PAI, 2004:15)

Cualquier derrame que se produzca en el área de lixiviación queda contenido en un depósito de cemento. El depósito drena a un sumidero del área de lixiviación donde una bomba de sumidero vertical bombea el derrame al distribuidor de alimentación de lixiviación. (PAI, 2004:15)

3. Circuito de Decantación a Contracorriente (DCC)

El objetivo del circuito de decantación a contracorriente es:

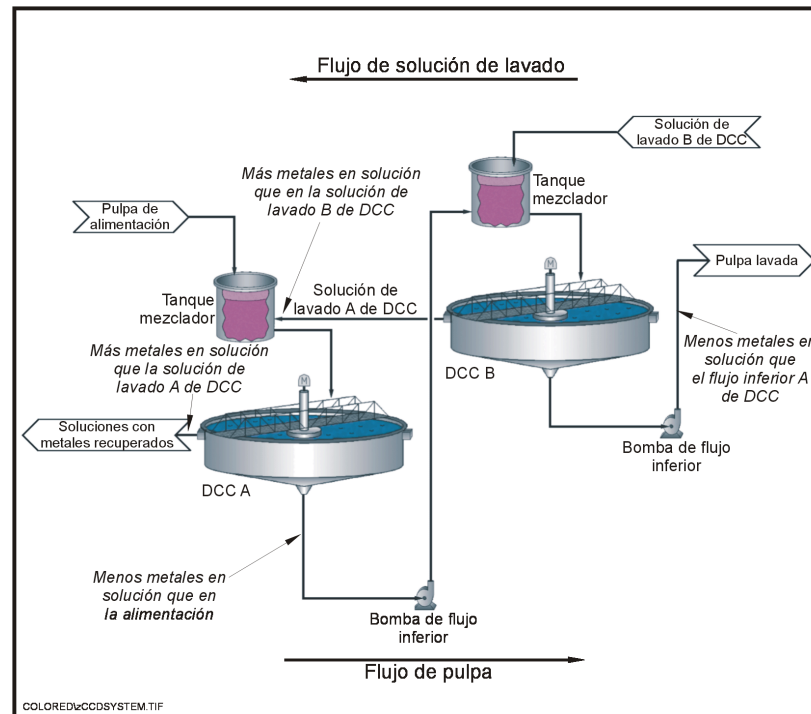
- Recuperar los complejos de oro y plata solubles contenidos en la solución.
- Lavar el residuo estéril, o *relaves*.
- Recuperar el cianuro de los relaves.

El circuito de DCC consiste de dos secciones. La primera sección está compuesta de cinco tanques mezcladores de alimentación, espesadores y bombas de flujo inferior que permiten la recuperación de oro y plata solubles. La segunda sección comprende el tanque mezclador de alimentación, el espesador, y la bomba de flujo inferior para lavar los relaves y recuperar el cianuro. (PAI, 2004:16)

a. Principio de operación de DCC. El DCC es una secuencia de proceso en la que los sólidos en una pulpa son lavados de manera progresiva para recuperar la alta concentración inicial de metales disueltos (por ejemplo, oro y plata). Los metales son recuperados en una solución libre de sólidos denominada solución rica. Los sólidos en forma de pulpa fluyen por una serie de pasos de lavado y asentamiento en cada espesador hacia el circuito de neutralización del cianuro. El líquido del lavado se

mueve en dirección opuesta, desplazando la solución desde la pulpa de alimentación y recuperando los metales disueltos. (Treybal, 1980:814)

Figura No. 4
Sistema de decantación a contra corriente.



(Treybal, 1980:815)

El proceso de DCC se produce en una serie de espesadores idénticos. En cada espesador, se produce el mismo proceso:

La pulpa de alimentación (pulpa de flujo inferior del espesador anterior) se mezcla en un pequeño tanque mezclador con solución de lavado. La solución de lavado tiene menos contenido de metales disueltos que la pulpa. (PAI, 2004:17)

La solución de lavado diluye la pulpa que ingresa al espesador.

Los sólidos se asientan en el espesador para formar una nueva pulpa que tiene el mismo porcentaje de sólidos que la pulpa de alimentación no diluida. La nueva pulpa contiene menos valores de metal. (PAI, 2004:17)

La solución restante después que los sólidos se asientan tiene aproximadamente el mismo flujo que la solución de lavado que se alimenta al espesador. Esta solución contiene los valores de metal lavados de la pulpa. La solución rebalsa del espesador al siguiente espesador como solución de lavado. (PAI, 2004:17)

La recuperación de los metales disueltos es principalmente una función de:

El número de espesadores que intervienen en el proceso de lavado. Los espesadores adicionales mejoran la recuperación; no obstante, el efecto de cada espesador es cada vez menor. (PAI, 2004:17)

La relación de lavado es la relación volumétrica de la solución de lavado y la solución en la pulpa de alimentación que ingresa. Mientras la relación de lavado sea más alta, mejor será la recuperación del metal. Sin embargo, mientras la relación de lavado sea mayor, más diluida será la solución de lixiviación recuperada por los espesadores de DCC. (PAI, 2004:17)

Cada etapa mejora la recuperación total del oro disuelto. Cuando solo se usa la mitad del flujo de lavado nominal, la recuperación total en cada etapa disminuye, lo que disminuye la recuperación total del sistema. (PAI, 2004: 17)

III. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la industria y el comercio en Guatemala han presentando un crecimiento de manera sorprendente. Un ejemplo claro de este comportamiento lo constituye el desarrollo de la industria minera, ya que hoy en día podemos encontrar varias empresas transnacionales que se han decidido por nuestro país al darse cuenta que poseemos las condiciones geológicas idóneas para la explotación de minerales preciosos.

Sin embargo, a pesar de la vasta experiencia que dichas empresas poseen como resultado de varias décadas dedicándose a esta actividad industrial, han encontrado una serie de barreras operativas, específicamente, al momento de querer aumentar la producción hasta un nivel por encima de la capacidad para la cual fue diseñado el proceso y se encontró que la eficiencia del mismo disminuía de forma tal que hacia inútil dicho aumento en la producción; ya que lo que se ganaba en tonelaje se perdía en recuperación de los metales lixiviados. Y es en este punto donde este proyecto pretende aportar de manera directa la reestructuración de un modelo operativo existente, la cual permita asegurar la eficiencia en la recuperación de metales preciosos lixiviados dentro de un proceso de minería a cielo abierto, sin incurrir en costos operativos adicionales. Permitiendo a la empresa en estudio incrementar su productividad sin descuidar su calidad y, por ende, aportar de manera directa y positiva a la economía del país.

IV. OBJETIVOS

E. Objetivo general

1. Desarrollar el rediseño de un modelo operativo existente que permita asegurar la eficiencia en la recuperación de metales preciosos lixiviados dentro de un proceso de minería a cielo abierto, sin incurrir en costos operativos adicionales.

F. Objetivos específicos

1. Identificar las variables críticas que intervienen en la recuperación de oro y plata lixiviados.
2. Establecer nuevos parámetros operativos que permitan incrementar la recuperación de oro y plata lixiviados.
3. Determinar las utilidades de las implementaciones.

V. PROBLEMA A RESOLVER

La industria minera, como cualquier otra industria, en aras de incrementar su producción, busca extraer la mayor cantidad de mineral en el menor tiempo posible. Pero cada vez que se aumenta la producción por encima del diseño de una planta se necesita hacer las modificaciones de reingeniería y de rediseño tanto de los equipos como de los modelos operativos para ajustar ese incremento en la producción sin descuidar la calidad de la recuperación del mineral explotado. Por lo tanto se busca evitar que ese incremento en la producción repercuta en la disminución de la calidad del proceso.

VI. METODOLOGÍA

Por parte de la empresa en estudio se realizó un análisis previo y conclusión de las variables que permitirían aumentar la recuperación de oro y plata. El estudio presentó que las condiciones que permitirían aumentar la recuperación serían un aumento en el tiempo de residencia de las soluciones lixiviadas dentro del circuito de decantación a contracorriente, así como un mejor lavado de la pulpa en el circuito de decantación a contracorriente. Ya que en las áreas de trituración molienda lixiviación y refinería la empresa ya había implementado proyectos de mejora del proceso y por esto ya se encuentran trabajando bajo condiciones ideales de operación. Por lo tanto la empresa necesitaba formular una estrategia operativa con la cual no se alterara de manera significativa el balance del proceso normal del DCC ni los costos de la implementación de la mejora. Por lo tanto se procedió a realizar:

A. Revisión de la bibliografía

1. Se realizó una revisión exhaustiva del proceso de extracción, lixiviación y recuperación de metales preciosos; así como un estudio a profundidad del proceso de operación normal de la planta en estudio.
2. Se identificó y analizó cada una de las variables críticas involucradas dentro del proceso de recuperación de metales lixiviados.
3. Se tomó como base el balance de masa normal del proceso y a partir de aquí se modificaron las variables a manera de hallar el proceso obtenido.

B. Realización de una visita guiada

1. Se realizó una visita guiada a una mina de extracción de oro y plata ubicada en el departamento de San Marcos. Dicha visita fue guiada por el Ingeniero de contacto, con el cual se observó el proceso de molienda, lixiviación y recuperación de minerales. En dicho recorrido se analizaron las operaciones antes mencionadas. De aquí se conocieron las variables que regían el proceso.

C. Formulación de posibles soluciones

1. Se procedió a desarrollar tres posibles soluciones al problema planteado con anterioridad.
2. Se conjugó el conocimiento del proceso y de las variables críticas para formular los planteamientos presentados.

D. Análisis de balance del proceso

1. Se realizaron los balances de proceso a partir de las variables críticas para determinar los parámetros más adecuados que permitirían aumentar la eficiencia en cuanto a la recuperación de oro y plata.

E. Viabilidad

1. Se evaluó la factibilidad para su aplicación en el proceso de la planta. Se descartaron las que no presentaban funcionalidad, basándose en la experiencia y conocimientos del Ingeniero de contacto.
2. La solución presentada desarrollo una viabilidad aceptable debido a que no requería de inversión adicional.

F. Pruebas de laboratorio

1. Para determinar la cantidad de oro y plata en las colas obtenidas del espesador de recuperación de cianuro (DCC No. 6), se realizaron análisis cuantitativos en el laboratorio de control de la empresa en estudio. Los análisis se realizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica.

G. Evaluación del beneficio obtenido

1. Para determinar la eficiencia de recuperación de metales se compararon los resultados obtenidos con datos que la empresa tenía previo al rediseño del modelo operativo.

VII. RESULTADOS

Cuadro No. 1. Identificación de variables críticas que intervienen en la recuperación de oro y plata lixiviados

<i>Variable de operación</i>	<i>Unidades de medida</i>
Flujo de agua de lavado al circuito de DCC	m ³ /h
Flujo de agua recuperada hacia espesador de recuperación de cianuro	m ³ /h
Bajo flujo en espesador de DCC No. 5	m ³ /h
Bajo flujo en espesador de recuperación de cianuro (Espesador de DCC No. 6)	m ³ /h
Flujo de floculante hacia DCC No. 5	m ³ /h
Flujo de floculante hacia DCC No. 6	m ³ /h
Densidad de pulpa en descarga de DCC No. 5.	%
Densidad de pulpa en descarga de DCC No. 6.	%
Presión de lecho de cama en espesadores	kPa
Torque de las rastras en los espesadores	%
Descarga de espesador de DCC No. 5	ton/h
Descarga de espesador de DCC No. 6	ton/h

Cuadro No. 2. Datos de operación nuevos de los espesadores del sistema DCC. No. 1 al No. 4.

<i>Descripción de la variable</i>	<i>Rango de medición de la variable</i>
Densidad en el espesador (%)	40-50
Nivel de Interfaz (%)	0-20
Presión de lecho de cama (kPa)	40-50
Torque de las rastras (%)	26-35
Flujo de alimentación (m ³ /h)	300-650
Dosificación de floculante (m ³ /h)	0.5-1.5
Flujo de tonelaje de descarga (ton/h)	180-450

Cuadro No. 3. Datos obtenidos a partir del rediseño en la de operación del esperador del sistema DCC. No. 5.

<i>Descripción de la variable</i>	<i>Rango de medición de la variable</i>
Densidad en el espesador (%)	40
Nivel de interfaz (%)	20-30
Flujo de agua de lavado (m ³ /h)	875-1000
Dosificación de floculante (m ³ /h)	0.15
Flujo de descarga (m ³ /h)	600
Flujo tonelaje descargado (ton/h)	200-350

Cuadro No. 4. Datos obtenidos a partir del rediseño en la de operación reestructuración del esperador del sistema DCC. No. 6.

<i>Descripción de la variable</i>	<i>Rango de medición de la variable</i>
Densidad en el espesador (%)	48
Nivel de Interfaz (%)	0
Flujo de agua recuperada (m ³ /h)	300-325
Dosificación de floculante (m ³ /h)	0.9-2.0
Flujo de descarga (ton/h)	500
Flujo descargado (ton/h)	200-350

Cuadro No. 5. Aumento en la capacidad de recuperación de oro y plata.

Cantidad recuperada	3,809.59 oz Au/mes	40,030.2 oz Ag/mes
Porcentaje de aumento en la recuperación	57.14 %	60.00 %

Cuadro No. 6. Eficiencia alcanzada en el proceso tomando como base los requerimientos planteados y a la molienda aplicada.

<i>Molienda actual aplicada</i>	<i>Eficiencia con respeto a los requerimientos planteados</i>
300 ton/h	94.82%

Cuadro No. 7. Utilidad de la recuperación

<i>Oro</i>	<i>Plata</i>
0.01%/mes	0.09%/mes

VIII. DISCUSIÓN

Partiendo del objetivo principal de este trabajo, el cual consistía en desarrollar el rediseño de un modelo operativo existente que permitiera asegurar la eficiencia en la recuperación de oro y plata lixiviados dentro de un proceso de minería a cielo abierto, sin incurrir en costos operativos adicionales. Se procedió a realizar una serie de planteamientos que pudieran aportar de forma directa una solución al problema planteado.

El proceso original contaba con una molienda de 250 ton/h, sin embargo la empresa aumentó dicha molienda a 300 ton/h. Esto repercutió en la eficiencia de recuperación de minerales, debido a que al momento de aumentar la molienda la cantidad de materia ingresada al sistema es mayor y por ende ésta necesita mayor tiempo de residencia para la extracción y recuperación de minerales.

La primera solución planteada fue la instalación de otro espesador en el sistema de decantación a contracorriente en paralelo al espesador de DCC No. 1 (por ser éste donde se da la mayor recuperación). Esta implementación podría mejorar la recuperación de oro y plata lixiviados, ya que así se aumentaría el tiempo de residencia al dividir la alimentación del DCC No. 1 con el nuevo espesador. Sin embargo, fue descartada, por el momento, debido a que se debía incurrir en gastos adicionales; además de necesitar de mayor tiempo para su implementación.

Segundo, se planteó un rediseño del sistema de decantación a contracorriente. Dicho rediseño consistía en la manipulación de una de las variables críticas de control para aumentar el tiempo de residencia de la pulpa en el sistema. Se analizó la posibilidad de aumentar el flujo de agua de lavado hacia el circuito de DCC como único cambio. Sin embargo, esto presentaba la desventaja que, debido a que el rebalse del espesador de DCC No. 6 llena el tanque de agua de lavado, al mantenerlo sin cambio el tanque de lavado comienza a perder nivel hasta una situación crítica para el proceso. Para mantener dicho nivel en el tanque el espesador de DCC No. 6 debe rebalsar la cantidad ideal para mantener el balance del sistema. Tomando en cuenta que las entradas del espesador de DCC No. 6 son el bajo flujo del espesador de DCC No. 5 y el agua recuperada de la represa de colas, las cuales son las variables que rigen el rebalse del mismo.

Por lo que adicional a esto, sabiendo que para aumentar la recuperación de oro y plata lixiviados era necesario aumentar el tiempo de residencia; se realizó un análisis del balance del sistema. Así se buscó una readecuación de las variables críticas del proceso a manera de aumentar el tiempo de residencia de la pulpa dentro de los espesadores del sistema de DCC sin afectar las demás variables como el nivel del tanque de agua recuperada.

Se debe controlar el flujo del agua de lavado a los valores predeterminados objetivos que dependen del flujo de sólidos de la pulpa. La recuperación del oro y la plata solubles depende en gran medida de la relación del flujo de agua de lavado con el flujo de sólidos de la pulpa. Un aumento en esta relación aumenta la recuperación del oro y plata solubles.

Para lograr esto se perfiló un sistema en el que se opere con alto flujo de agua de lavado al espesador de DCC No. 5 y a su vez con menor dosificación de floculante. Esto para que se transfiera mayor cantidad de líquido en el bajo flujo a la alimentación del espesador de DCC No. 6. Debido a que la dosificación de floculante es menor la cantidad de sólidos sedimentados disminuye por lo que el bajo flujo del DCC No. 5 presenta menor cantidad de sólidos y por ende el flujo másico de pulpa o tonelaje disminuye. El floculante junto con el bajo flujo permite controlar el porcentaje de sólidos en cada espesador. Así el DCC No. 6 tendría un rebalse mayor hacia el tanque de almacenamiento de agua de lavado ya que esta recibiendo un caudal de entrada menos denso. El problema es que la presión de lecho de cama en el DCC No. 5 pueda aumentar drásticamente, si no se manejan adecuadamente, debido a una acumulación de sólidos no descargados en el bajo flujo. Puesto que la presión de lecho de cama determina que tan cargado esta un espesador, ésta da una idea del grueso de la cama de sólidos que esta desde el fondo del espesador hasta la interfaz. Cuando la cama es muy gruesa el riesgo que se corre es que en cualquier momento pueda aumentar de sobremanera el torque de la rastra que homogeniza la cama y por ende se pueda quebrar el rastrillo o disparar el motor por alto amperaje y ello causaría una disminución en la eficiencia del proceso ya que se haría necesaria la desviación de la alimentación que se dirige a este espesador hacia el siguiente, para poder reparar la rastra o vaciar a un nivel de cama operativamente seguro; además de que esto representaría un gasto elevado extra y perdidas millonarias en el proceso de recuperación. El floculante junto con el bajo flujo permite controlar la presión, el porcentaje de sólidos de cada espesador. A más floculante la tasa de sedimentación aumenta. Con el mismo bajo flujo se descarga mayor cantidad de sólidos. Es por esto que se debe aumentar el bajo flujo del espesador de DCC No. 5 para que se logre extraer la misma cantidad de sólidos con un tonelaje bajo.

Conjuntamente, dosificar más floculante al DCC No. 6 para que la tasa de sedimentación de sólidos aumente, si es mayor la tasa de sedimentación y el bajo flujo sigue igual la cantidad de sólidos en la tubería de succión de la bomba de bajo flujo aumenta, es decir, con el mismo bajo flujo se descarga más sólidos del espesador y la presión de lecho de cama se mantiene en el rango aceptable de operación.

Esto permite que el balance favorezca el ingreso de más agua de lavado al circuito de DCC No. 5 porque se puede manejar el nivel en el tanque de lavado al hacer que el espesador de DCC 6 rebalse más. Manteniendo constante el bajo flujo del espesador de DCC No. 6 se asegura el tiempo de residencia, porque el bajo flujo se mantiene igual. Ya que el tiempo de residencia esta en función del flujo volumétrico y no al tonelaje. Debido a que con las condiciones anteriores se aumentaba el tiempo de residencia pero lo que se ganaba en tiempo de residencia se perdía en calidad de lavado porque el agua ya no lograba entrar y lavar

mucha área superficial de pulpa debido a la alta cantidad de sólidos. Por lo tanto el espesador de DCC No. 6 necesita más agua recuperada, ya que al retener muchos sólidos la pulpa se torna más espesa y eso repercute en la agitación y turbulencia dentro del espesador y esto afecta la recuperación, por lo que se aumenta el flujo de agua recuperada al espesador de DCC No. 6, de tal forma que aún teniendo altos sólidos se logre la misma turbulencia.

Al implementar la reestructuración planteada se modificaron las variables que se determinaron eran las más críticas, debido a que su modificación incidía directamente en la recuperación de minerales. Dentro de las variables críticas de operación se determinó que estas consistían en el flujo de agua de lavado al circuito de DCC, ya que el agua de lavado permite realizar la recuperación de minerales, siendo ésta, como su nombre lo indica, la que realiza el lavado de la pulpa. El agua de lavado ingresa al sistema de DCC a través del espesador de DCC No. 5. Es una variable crítica de proceso, además, porque se debe de mantener un nivel óptimo en el tanque de ésta para asegurar el correcto balance en el sistema y no provocar un paro en el proceso.

El flujo de agua recuperada hacia espesador de recuperación de cianuro o espesador de DCC No. 6. El bajo flujo en espesador de DCC No. 5, el cual es la alimentación del espesador de DCC No. 6. Es de vital importancia ya que a través de ésta se transfiere la cantidad de sólidos al siguiente paso, por lo que en el caso de la reestructuración se debe de mantener a aproximadamente $100 \text{ m}^3/\text{h}$ en relación con el bajo flujo de en espesador de DCC No. 6.

El flujo de floculante de DCC 5 y el flujo de floculante de DCC 6 determinan, junto con el bajo flujo, la presión de lecho de cama de cada uno de estos espesadores. Así también determinan la razón de sedimentación de los sólidos en los espesadores. La dosificación de floculante es mayor en el espesador de DCC No. 6, 0.9 a $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$, que en el espesador de DCC No. 5, $0.15 \text{ m}^3/\text{h}$, debido a que se requiere que el DCC No. 5 descargue menor cantidad de sólidos al DCC No. 6 y a su vez éste descargue mayor cantidad de sólidos para evitar que la cantidad de sólidos aumente y por lo tanto aumente de manera drástica la presión de lecho de cama y el torque de la rastra. Es por esto que se requiere que espesador de DCC No. 5 tenga bajo flujo neto $100 \text{ m}^3/\text{h}$ mayor que el bajo flujo del espesador de DCC No. 6 para que el tonelaje de descarga del primero presente menor densidad de sólidos, pero el tonelaje se mantenga en $200\text{-}350 \text{ ton/h}$. Así para el espesador de DCC No 6 por la mayor adición de floculante presenta mayor densidad en la descarga de bajo flujo manteniendo con un bajo flujo menor que el cinco un tonelaje de $200\text{-}350 \text{ ton/h}$.

La adición del floculante al circuito de DCC tiene un efecto directo en el nivel de interfase, que afecta la densidad de la pulpa del flujo inferior y la claridad del rebalse. En el circuito de DCC, la densidad del flujo inferior es mucho más importante que la claridad del rebalse. La adición de floculante al espesador de recuperación de cianuro (DCC No. 6) tiene un efecto directo en la densidad de la pulpa del flujo inferior y la claridad del rebalse. Para el espesador de recuperación del cianuro, la claridad del rebalse es mucho más

importante que la densidad del rebalse. El operador debe controlar el nivel de interfase del espesador mediante la adición de floculante para mantener un rebalse claro.

Para cuantificar los resultados de las modificaciones realizadas al proceso se hicieron análisis cuantitativos en la sección de control de la empresa a las colas del bajo flujo del espesador de DCC No. 6 para determinar la cantidad de oro y plata contenidos en ellas. Dicha determinación supone la pérdida de metales en las colas. Es decir, a menor concentración de metales en las colas, menor es la cantidad de metales que se esta perdiendo y que es enviado a la represa de colas. Los niveles de recuperación promedio de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6, resultó de 0.15 ppm para el oro y 1.4 ppm para la plata. Lo cual comparado con los análisis antes de la reestructuración, los cuales eran de 0.70 ppm para el oro y 7.00 ppm para la plata, se puede inferir que la recuperación de oro aumentó en un 57.14%, lo cual significa 5.29 oz de oro por hora (3,809.59 oz/mes) recuperadas adicionales en el proceso. Para la plata se obtuvo una mejora en la recuperación de 60%, lo cual significa 55.60 oz por hora (40,030.20 oz/mes) recuperadas adicionales. La utilidad aproximada de la recuperación con el rediseño sería de 0.01% adicional al mes para el oro y 0.09% adicional al mes para la plata en base a la producción anual a la que fue diseñada la planta.

Se logró llegar al objetivo que la empresa requería sin incurrir en costos adicionales con lo cual se esta implementando una mejora a partir de las herramientas ya existentes con el hallazgo de una mejor forma de administrar los recursos que ya se poseen.

IX. CONCLUSIONES

1. Los niveles de recuperación promedio de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6 (Análisis de colas) fueron de 0.15 ppm para el Oro y 1.4 ppm para Ag, mejorando en un 57.4% y 60.0% respectivamente con respecto a los análisis de colas antes de la reestructuración.
2. La mejora neta de la recuperación de oro y plata lixiviados fue de 0.20 ppm y 2.10 ppm menos, para el oro y la plata respectivamente, en las colas del DCC No. 6.
3. La recuperación adicional de oro y plata lixiviados fue de 3,809.59 oz de oro al mes y de 40,030.2 oz de plata al mes.
4. La utilidad aproximada de la recuperación con el rediseño sería de 0.01% adicional al mes para el oro y 0.09% adicional al mes para la plata con base a la producción anual a la que fue diseñada la planta.
5. La opción de la instalación de otro espesador se descarta por el momento por requerir de inversión y tiempo de aplicación adicional.

X. RECOMENDACIONES

1. La instalación de otro espesador en el sistema de decantación a contracorriente en paralelo al espesador de DCC No. 1, podría mejorar la recuperación de oro y plata lixiviados. Para aumentar el tiempo de residencia al dividir la alimentación del DCC No. 1 con el nuevo espesador.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Chaves, Arturo. 1985. *Métodos de concentración y extracción de Oro*. Brasilia, Editorial Rocco. 50 páginas.
2. Ellis, Sara. 2003. *The effects of dissolved oxygen and cyanide dosage on gold extraction*. Estados Unidos. Elsevier B.V. 73 páginas.
3. Guatemala. 2004. Primer Foro Nacional de la Minería en Guatemala. *Caracterización de la Minería en Guatemala*. Ministerio de Energía y Minas. 31 páginas.
4. *Manual de operación de lixiviación y DCC*. 2004. Performance Associates International, Inc. Estados Unidos. 84 páginas. (Bibliografía no disponible para el público en general)
5. Treybal, Robert. 1986. *Operaciones de transferencia de masa*. 2da edición. México D.F. McGraw Hill. 858 páginas.
6. Udupa, A., Kawatra, S., Prasad, M. 1990. *Developments in gold leaching: a literature survey. Mineral processing and extractive metallurgy*. Estados Unidos. 150 páginas.

XII. APÉNDICE

A. DATOS ORIGINALES

A continuación se presentan los cuadros que muestran las magnitudes de las variables críticas para la recuperación de minerales lixiviados, los resultados promedio del análisis de colas antes de la reestructuración, así como algunos datos de utilidad.

Cuadro No. 8. Datos de operación originales de los esperadores del sistema DCC. No. 1 al No. 4.

<i>Descripción de la variable</i>	<i>Rango de medición de la variable</i>
Densidad en el espesador (%)	40-50
Nivel de Interfaz (%)	0-20
Presión de lecho de cama (kPa)	40-50
Torque de las rastras (%)	26-35
Flujo de alimentación (m ³ /h)	300-650
Dosificación de floculante (m ³ /h)	0.5-1.5
Flujo de tonelaje de descarga (ton/h)	180-450

Cuadro No. 9. Datos de operación originales de los esperadores del sistema DCC. No. 5 y No. 6.

<i>Descripción de la variable</i>	<i>Rango de medición de la variable</i>
Densidad en el espesador (%)	40-50
Nivel de Interfaz (%)	0-20
Presión de lecho de cama (kPa)	40-50
Torque de las rastras (%)	26-35
Flujo de alimentación (m ³ /h)	300-650
Dosificación de floculante (m ³ /h)	0.5-1.5
Flujo de descarga (ton/h)	300-650
Flujo tonelaje	180-450

Cuadro No. 10. Niveles de operación de los tanques del proceso.

<i>Descripción de la variable</i>	<i>Rango de medición de la variable</i>
Tanque de agua de lavado (%)	40-75
Tanque de agua de proceso (%)	50-75
Tanque de solución rica (%)	60-75
Tanque de solución estéril (%)	40-95

Cuadro No. 11. Niveles máximos de concentración en la recuperación de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6 (Análisis de colas), antes de la reestructuración.

<i>Colas Au (ppm)</i>	<i>Colas Ag (ppm)</i>
0.35	3.00

Cuadro No. 12. Niveles de molienda y niveles de recuperación de mineral.

<i>Molienda original</i>	<i>Porcentaje de recuperación</i>
260 ton /h	40.00
<i>Molienda objetivo</i>	<i>Porcentaje de recuperación objetivo</i>
300 ton /h	90

Cuadro No. 13. Niveles de concentración máximos requeridos en las colas del espesador de DCC No. 6.

<i>Colas Au (ppm)</i>	<i>Colas Ag (ppm)</i>
0.35	1.30

Cuadro No. 14. Datos varios.

<i>Dato</i>	<i>Descripción</i>
Tipo de cambio de moneda aplicado	\$1.00 = Q. 8.20
Valor promedio de la onza de oro en el mercado internacional aplicada	1 oz de Au = Q. 1,000.00
Valor promedio de la onza de plata en el mercado internacional aplicada	1 oz Ag = Q. 17.00
Densidad específica del mineral	1.5

Figura No. 5. Balance de masa original para el espesador de DCC No. 5

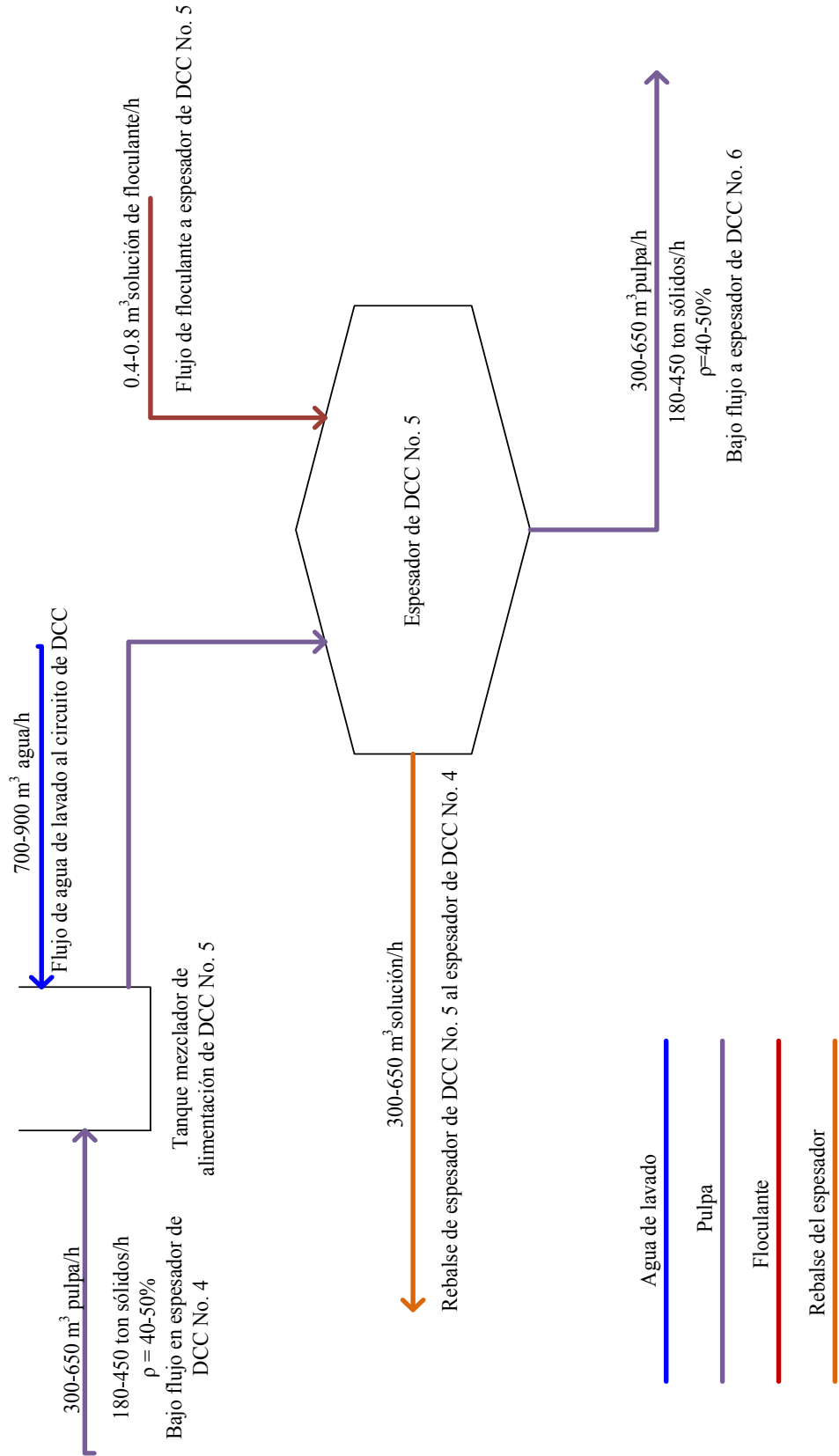


Figura No. 6. Balance de masa original para el espesador de DCC No. 6

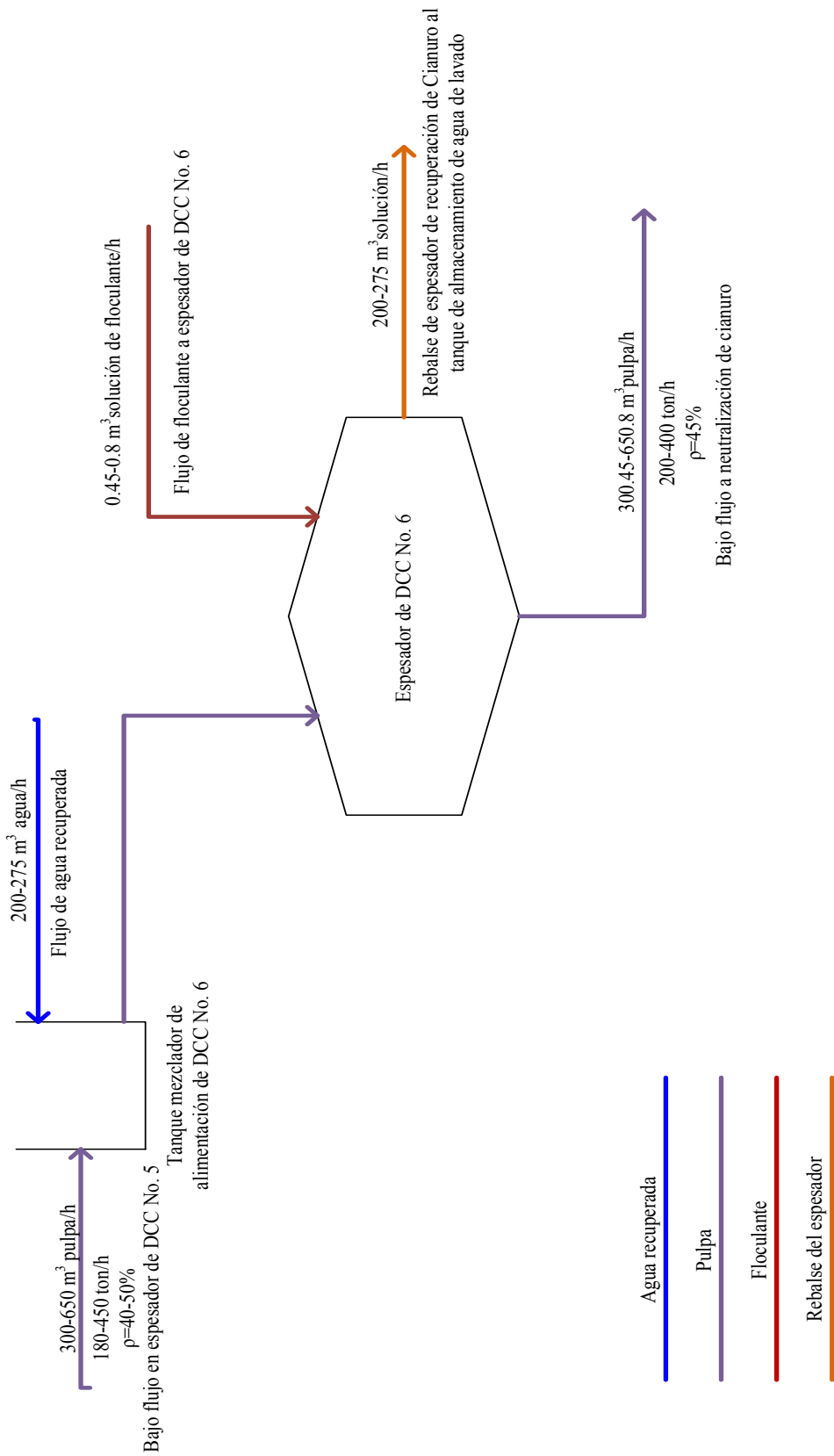
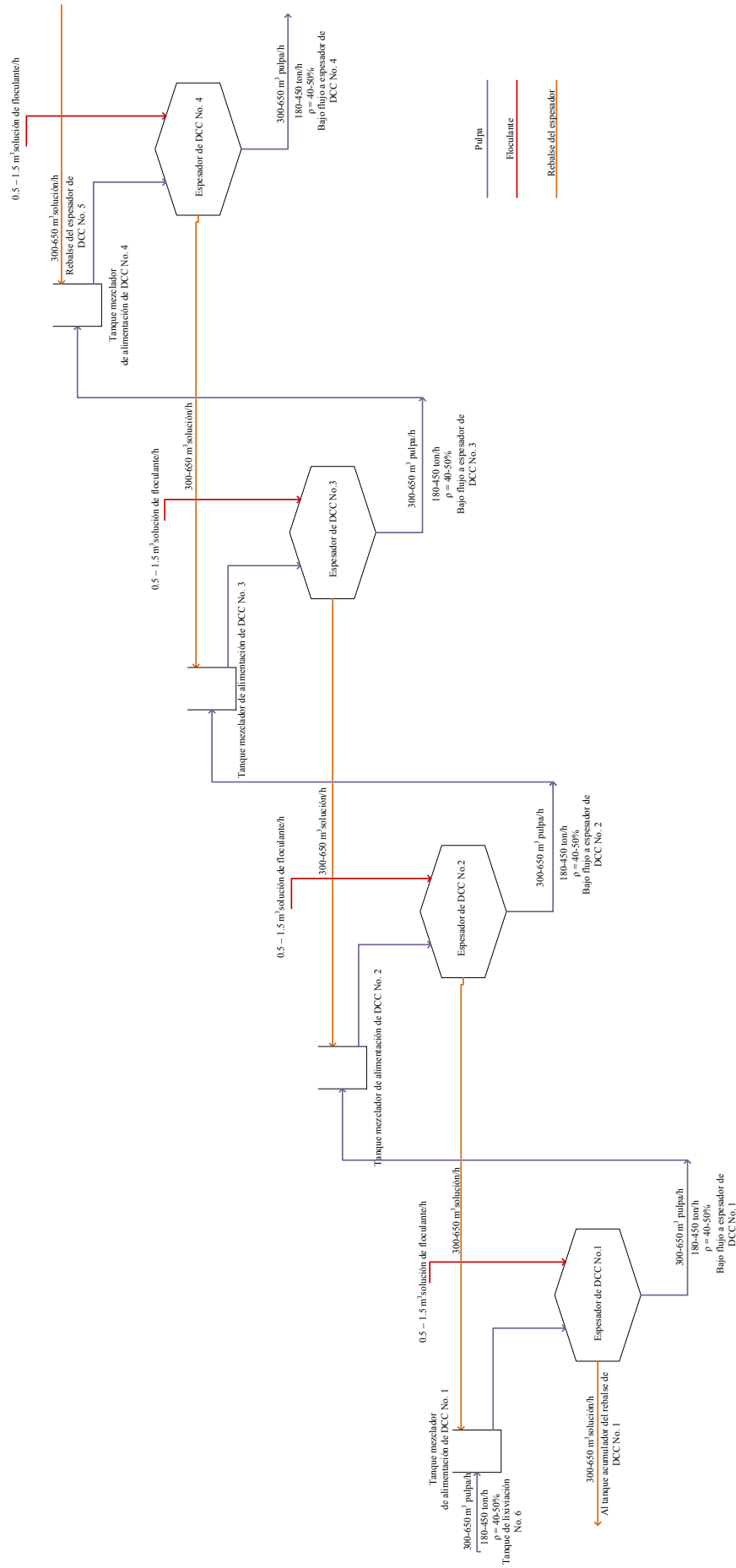


Figura No 7. Balance de masa para el sistema de DCC, espesadores del No. 1 al No. 4



B. DATOS DE PROCESO

Cuadro No. 15. Niveles de recuperación promedio de metales a partir de análisis del bajo flujo del espesador de DCC No. 6 (Análisis de colas).

<i>Colas Au</i>	<i>Colas Ag</i>
0.15 ppm	1.4 ppm

Cuadro No. 16. Mejora neta de la recuperación de oro y plata lixiviados.

<i>Colas Au (ppm)</i>	<i>Colas Ag (ppm)</i>
0.20 ppm	2.10 ppm

Cuadro No. 17. Soluciones al problema planteadas y descartadas.

<i>No.</i>	<i>Solución planteada</i>	<i>Requerimientos/Limitaciones</i>	<i>Condición operativa modificada</i>
1.	Instalación de un séptimo espesador para el circuito de DCC	Costo adicional Tiempo de implementación adicional.	Aumento de tiempo de residencia.
2.	Aumentar el flujo de agua de lavado.	Afecta el balance de operación del sistema.	Mejora en el lavado de la pulpa.

Figura No 8. Balance de masa para el espesador de DCC No. 5

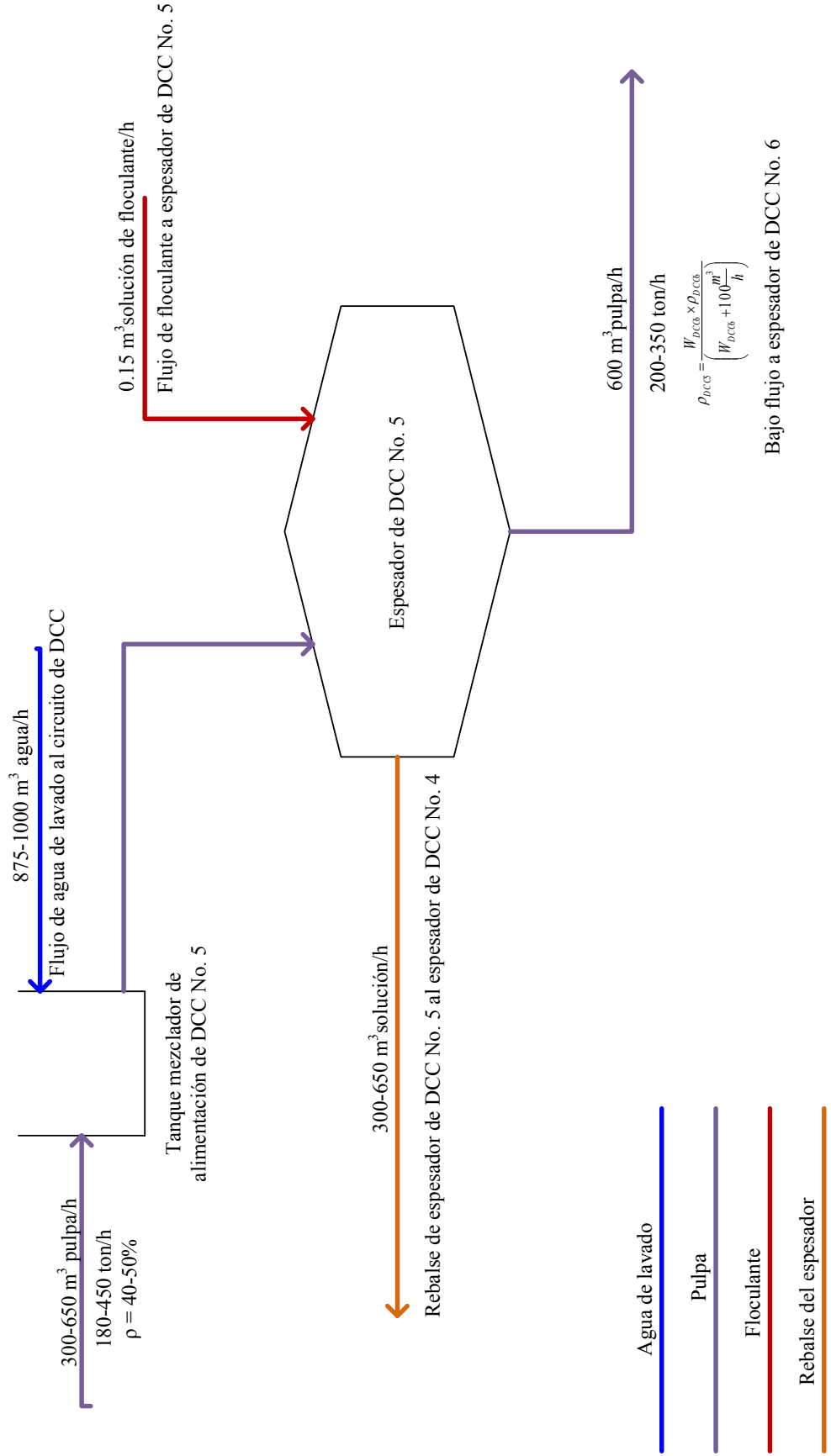
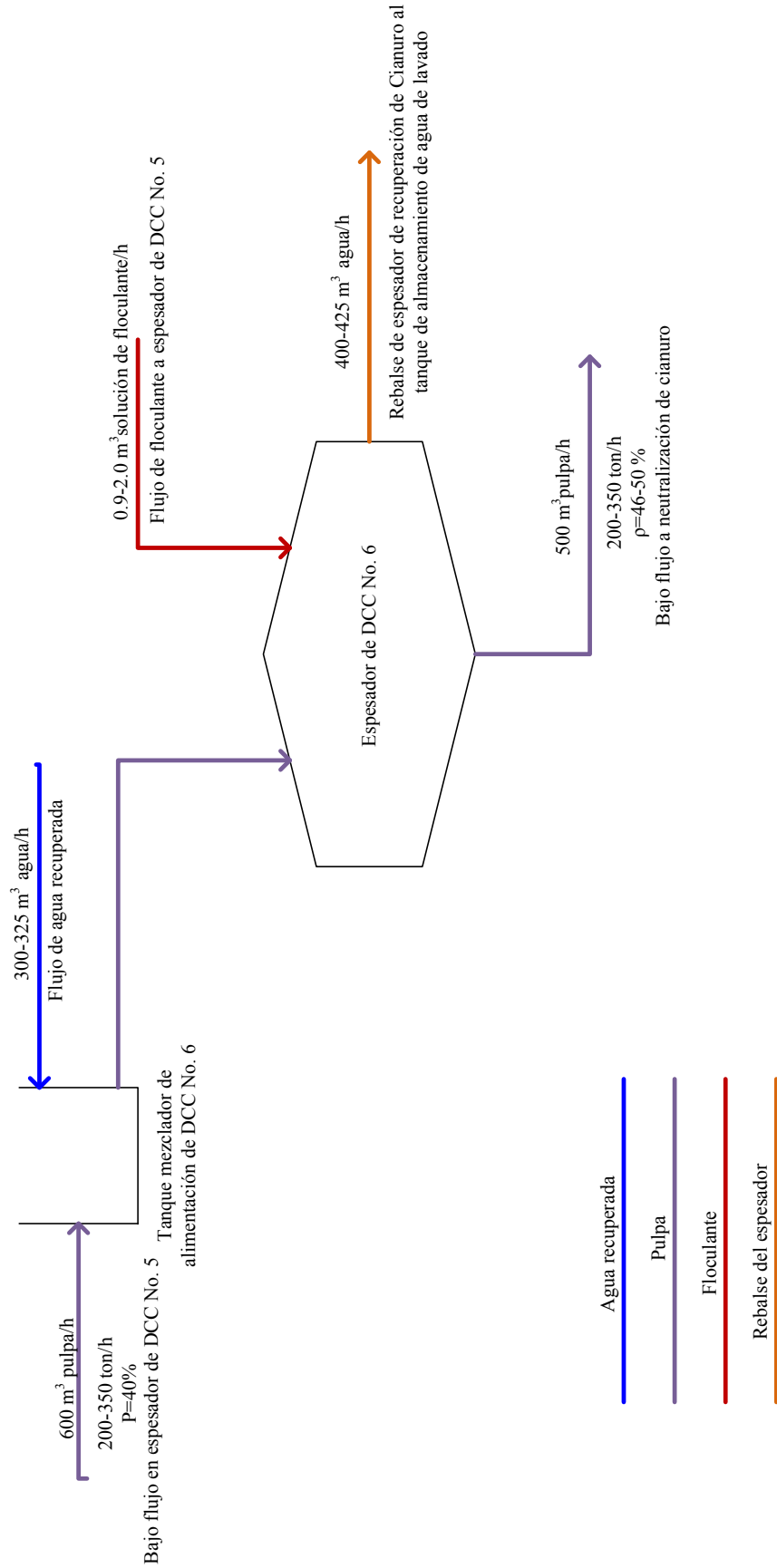


Figura No 9. Balance de masa para el espesador de DCC No. 6



C. CÁLCULO DE MUESTRA

- **Balance para la determinación de la densidad del bajo flujo requerida en el espesador de DCC No. 5.**

$$W_{DCC6} \times \rho_{DCC6} = W_{DCC5} \times \rho_{DCC5}$$

Ecuación No. 1

Donde:

W_{DCC6} = Flujo de tonelaje del espesador de DCC No. 6

ρ_{DCC6} = Densidad de solución en espesador de DCC No. 6

W_{DCC5} = Flujo de tonelaje de espesador de DCC No. 5

ρ_{DCC5} = Densidad de solución en espesador de DCC No. 5

Debido a que el tonelaje del espesador de DCC No. 5 se quiere que sea de $100 \frac{m^3}{h}$ mayor que el tonelaje del espesador de DCC No. 6.

$$W_{DCC5} = W_{DCC6} + 100 \frac{m^3}{h}$$

Entonces,

$$W_{DCC6} \times \rho_{DCC6} = \left(W_{DCC6} + 100 \frac{m^3}{h} \right) \times \rho_{DCC5}$$

Por lo tanto,

$$\rho_{DCC5} = \frac{W_{DCC6} \times \rho_{DCC6}}{\left(W_{DCC6} + 100 \frac{m^3}{h} \right)}$$

Si

$$W_{DCC6} = 500 \frac{m^3}{h}$$

$$\rho_{DCC6} = 48\%$$

$$\rho_{DCC5} = \frac{500 \frac{m^3}{h} \times 48\%}{\left(500 \frac{m^3}{h} + 100 \frac{m^3}{h} \right)}$$

$$\rho_{DCC5} = 40\%$$

- **Determinación del tonelaje descargado en los espesadores del sistema de DCC**

$$\dot{m}(\text{ton} / \text{h}) = W_{DCC6} \times DEM \times \rho_{DCC6} \quad \text{Ecuación No. 2}$$

$$\dot{m}(\text{ton} / \text{h}) = \frac{300\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1,500\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{ton}}{1000\text{Kg}} \times 0.4 = 180 \text{ ton/h}$$

- **Determinación de las utilidades de la implementación de la reestructuración del modelo operativo**

Concentración de mineral en la pulpa:

$$0.20 \text{ ppm} = \frac{0.20\text{mg Au}}{1 \text{ m}^3 \text{ de Pulpa}} \times 1500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = \frac{300\text{mg Au}}{\text{m}^3 \text{ de pulpa}}$$

Siendo el flujo de pulpa que se descarga del espesador de DCC No. 6, 500 m³/h

$$\frac{300\text{mg Au}}{\text{m}^3 \text{ de pulpa}} \times \frac{500\text{m}^3 \text{ de pulpa}}{\text{h}} = 150,000 \text{ mg Au/h}$$

La conversión a onzas por ser la unidad de medida del mercado del oro y la plata se obtiene a partir de

$$\frac{150,000\text{mg Au}}{\text{h}} \times \frac{3.53 \times 10^{-5} \text{ oz Au}}{\text{mg Au}} = 5.29 \text{ oz Au/h}$$

Recuperación mensual

$$\frac{5.29 \text{ oz Au}}{\text{h}} \times \frac{24\text{h}}{1\text{día}} \times \frac{30\text{días}}{1\text{mes}} = 3,812.40 \text{ oz Au/mes}$$

Utilidad obtenida a partir de la mejora en la recuperación

$$\frac{120,833.00\text{ton mineral}}{\text{mes}} \times \frac{35,273.94\text{oz}}{1 \text{ ton}} = 4.26 \times 10^9 \text{ oz mineral / mes}$$

$$\frac{120,833.00 \text{ oz Au/mes}}{4.26 \times 10^9 \text{ oz mineral / mes}} \times 100 = 0.01\%$$

Se realizaron los mismos cálculos para la determinación de la plata. Véase datos calculados en la página.

- **Determinación de la eficiencia de recuperación de oro y plata en relación al requerimiento planteado.**

A partir de los requerimientos de concentración de oro y plata en las colas del espesador de DCC No. 6.

(Ver Cuadro No. 15, página 27)

$$\text{Eficiencia: } \frac{\left(\frac{0.150\text{ppmAu}}{0.155\text{ppmAu}} + \frac{1.30\text{ppmAg}}{1.4\text{ppmAg}} \right)}{2} = *100 = 94.82\%$$

D. DATOS CALCULADOS

Cuadro No. 18. Densidad del bajo flujo requerida en el espesador de DCC No. 5.

<i>Densidad requerida en el bajo flujo de DCC No. 5</i>
40%

Cuadro No. 19. Tonelaje descargado en los espesadores del sistema de DCC

<i>Tonelaje en los DCC No. 1 al 4</i>
180-450 ton/h

Cuadro No. 20. Tonelaje descargado en los espesadores del sistema de DCC

<i>Tonelaje en el espesador de DCC No. 5</i>	<i>Tonelaje en el espesador de DCC No. 6</i>
230-650 ton/h	230-650 ton/h

Cuadro No. 21. Recuperación neta de oro y plata lixiviados

<i>Oro</i>	<i>Plata</i>
3,809.59 oz Au/mes	40,030.2 oz Ag/mes

Cuadro No. 22. Eficiencia alcanzada en el proceso tomando como base los requerimientos planteados y a la molienda actual aplicada.

<i>Porcentaje de eficiencia</i>
94.82%

Cuadro No. 23. Utilidad neta de la recuperación

<i>Oro</i>	<i>Plata</i>
0.01%/mes	0.09%/mes