

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Optimización de la dosificación de reactivos en el proceso de destrucción de Cianuro en una planta de beneficio ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe.

### **PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Magíster en Minas Mención Mineralurgia y Metalurgia  
Extractiva**

Presentado por:

Verónica Geanella Rojas Cuenca

Wilmer José Cabrera Espinosa

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

## DEDICATORIA

A Dios.

A mi familia, en especial a madre quien me enseñó a ser perseverante y mi hermana y sobrina quienes me han brindado su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros de la empresa donde se realizó el proyecto.

**Wilmer C.**

A Dios, que cada día me muestra gracia y bendiciones, por ser mi mejor aliado en cada paso de doy.

A mis padres, que me han amado y apoyado siempre.

A mi hermana, que es mi compañera y mejor amiga.

**Verónica R.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestra imperecedera gratitud a todas las personas que con su soporte técnico y humano colaboraron para realizar este trabajo de investigación.

A la empresa que nos permitió desarrollar el proyecto, creyendo en nosotros para aportar al desarrollo de la minería responsable.

Agrademos en especial y sincera a la Dra. Dulce Gómez Limón, por su paciencia, disponibilidad para compartir su conocimiento y experiencia.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución a *Verónica Geanella Rojas Cuenca* y *Wilmer José Cabrera Espinosa* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Verónica Geanella  
Rojas Cuenca

Wilmer José Cabrera  
Espinosa

# **EVALUADORES**

**PhD. Dulce María Gómez Limón**

PROFESOR TUTOR

**PhD. Samantha Jiménez**

PROFESOR EVALUADOR

**PhD. Pía Hernández**

PROFESOR EVALUADOR

## RESUMEN

En los últimos años, Ecuador ha incrementado la extracción y procesamiento de minerales a pequeña, mediana y gran escala usando distintos métodos. El presente proyecto se desarrolla en una planta de beneficio ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe, la cual cuenta con un proceso de lixiviación en el que se usa cianuro de sodio y carbón activado para la recuperación de oro. Además, la planta de tratamiento cuenta con un proceso posterior de destrucción del cianuro usado.

El objetivo de este estudio es evaluar la dosificación del metabisulfito de sodio y sulfato de cobre, reactivos que son usados en el proceso INCO ( $\text{SO}_2/\text{Aire}$ ) para la destrucción de cianuro. Esta evaluación permite el análisis del gasto operativo y presenta propuestas para la optimización del consumo de los reactivos mencionados. Para el desarrollo de este proyecto se realizaron pruebas a escala industrial, donde se planteó reducir el consumo de metabisulfito de sodio de 1.06 Kg/t a 0.8 Kg/t y el consumo de sulfato de cobre de 0.67 Kg/t a 0.42 Kg/t, lo cual fue logrado. Para lograr este objetivo se empleó el método de trabajo ON/OFF.

Modo ON (turno día) con dosificaciones de:

- Metabisulfito de sodio: 70% en tanque DETOX 1 y 30 % en tanque DETOX 2.
- Sulfato de cobre: 90 % en tanque acondicionador y 10 % en tanque DETOX 2.

Modo OFF (turno noche), donde la dosificación de reactivos al circuito de destrucción de cianuro es:

- 100% de metabisulfito de sodio a tanque DETOX 1.
- 100% de sulfato de cobre a tanque acondicionador DETOX.

Esta manera de dosificar el metabisulfito de sodio y sulfato de cobre en el proceso de destrucción de cianuro mantiene la eficiencia del proceso y disminuye de manera significativa el gasto de reactivos usados. La adición de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre se reduce, representando una mejora significativa tanto ambiental como económica en la planta de beneficio.

Palabras clave: Cianuro de sodio, destrucción de cianuro, sulfato de cobre, metabisulfito de sodio, recuperación de oro.

## ***ABSTRACT***

In recently Ecuador has increased the development of small, medium, and large-scale mineral extraction and process using different methods. The present project is in a process plant located in Zamora Chinchipe province, which has a leaching process where cyanide and activated carbon are used for gold recovery, as well as a subsequent process of destruction of the cyanide that was use.

The main objective of this project is to evaluate the dosing of sodium metabisulfite and copper sulfate, reagents that are used in the INCO process ( $\text{SO}_2/\text{Air}$ ) for the destruction of cyanide, this evaluation to allow the analysis of the operating expenses and the optimization of the consumption of the mentioned reagents.

To execute this project, industrial scale tests were carried out to reduce the consumption of metabisulfite from 1.06 Kg/t to 0.8 Kg/t and the consumption of copper sulfate from 0.67 Kg/t to 0.42 Kg/t. To achieve this objective, the ON/OFF methodology is used, where during the day shift the process is operated in ON mode, with dosages of:

- Sodium metabisulfite: 70% in DETOX 1 tank and 30% in DETOX 2 tank.
- Copper sulphate: 90 % in conditioner tank and 10 % in DETOX 2 tank.

And during the night shift we work in OFF mode, where the dosing of reagents to the cyanide destruction circuit is carried out as follows:

- 100% of copper sulfate to DETOX conditioning tank.
- 100% sodium metabisulfite to DETOX 1 tank.

This way of dosing sodium metabisulfite and copper sulfate in the cyanide destruction process maintains the efficiency of the process and significantly decreases the expense of reagents used. The addition of sodium metabisulfite and copper sulfate is reduced, representing a significant environmental and economic improvement in the process plant.

Keywords: Cyanide, cyanide destruction, copper sulfate, sodium metabisulfite.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Minería de oro en Ecuador.....	1
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Marco teórico .....	5
1.4.1 Cianuro .....	5
1.4.2 Compuestos de cianuro.....	5
1.4.3 Riesgos de manipulación de cianuro .....	9
1.4.4 Procesos de lixiviación con cianuro.....	10
1.4.5 Métodos de destrucción de cianuro .....	11
1.4.6 Regulaciones Ambientales .....	20
CAPÍTULO 2 .....	22
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1 Descripción del proceso CIL y DETOX. ....	22
2.2 Pruebas industriales en circuito DETOX. ....	27
2.3 Replica de prueba industrial.....	31

CAPÍTULO 3 .....	34
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	34
3.1 Resultados prueba DETOX.....	34
3.1.1 Resultados de consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre .	34
3.1.2 Resultados de consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre durante las pruebas ON/OFF .....	37
3.1.3 Resultados de la destrucción de cianuro WAD respecto al consumo de reactivos	38
3.1.4 Resultados de la destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 1.....	41
3.1.5 Resultados de la destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 2.....	42
3.1.6 Resultados de destrucción de cianuro total y WAD en relaves (TSF). .	44
3.1.7 Resultado de generación de sulfatos y sólidos totales en DETOX.....	45
3.2 Resultados réplica pruebas DETOX .....	48
3.2.1 Resultados del consumo del metabisulfito de sodio y sulfato de cobre	48
3.2.2 Resultados de consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre durante las pruebas ON/OFF .....	50
3.2.3 Resultados de la destrucción de cianuro WAD respecto del consumo de reactivos	51
3.2.4 Resultados de la destrucción de cianuro WAD en DETOX 1. ....	54
3.2.5 Resultados de la destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 2.....	55
3.2.6 Resultados de destrucción de cianuro total y WAD en relaves (TSF). .	56
3.2.7 Resultado de generación de sulfatos y sólidos totales en DETOX.....	57
CAPITULO 4 .....	60
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	60
4.1 Conclusiones.....	60
4.2 Recomendaciones .....	61
5. Bibliografía .....	63

APÉNDICES .....	66
APÉNDICE A: Datos de alimentación a DETOX (descarga CIL 6) .....	66
APÉNDICE B: Datos del proceso DETOX (tanque 1 y tanque 2) .....	70
APÉNDICE C: Datos descarga a relaves (TSF).....	75
APÉNDICE D: Preparación de metabisulfito de sodio.....	79
APÉNDICE E: Preparación de sulfato de cobre.....	80
APÉNDICE F: Datos de alimentación a DETOX (descarga CIL 6) - Replica .....	81
APÉNDICE G: Datos del proceso DETOX (tanque 1 y tanque 2) - Replica .....	86
APÉNDICE H: Datos de descarga a relaves (TSF) - replica .....	91

## ABREVIATURAS

CIL	Lixiviación con carbón activado
DETOX	Detoxificación de cianuro
TSF	Instalaciones de almacenamiento de relaves (relavera)
RLV TSF	Relave final enviado al tratamiento de relaves
pH	Potencial de Hidrógeno
Pre-Leach	Espesador de pre-lixiviación
m	Metro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
Fe	Hierro
CN <sup>-</sup>	Cianuro libre
CN Wad	Cianuro disociable con ácido débil
CN total	Cianuro Total
HCN	Ácido cianhídrico
TPH	Toneladas por hora
Kg/t	Kilogramos por toneladas
Ppm	Partes por millón
DO	Oxígeno disuelto
TNK A	Tanque acondicionador
TNK D1	Tanque DETOX 1
TNK D2	Tanque DETOX 2
TNK CIL	Tanque CIL 1 al 6

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Zonas mineras en Ecuador [Ministerio del Ambiente, 2020] .....	3
Figura 1.2. Lixiviación de oro CIL .....	11
Figura 1.3. Diagrama proceso INCO [Álvarez, 2005] .....	15
Figura 1.4. Diagrama $E_h - pH$ para el sistema Fe-CN- $H_2O$ a 25 °C [Mamani,2014].	19
Figura 2.1. Proceso CIL - DETOX de la planta de beneficio objeto de estudio .....	23
Figura 2.2. PID proceso DETOX .....	25
Figura 2.3. Descripción prueba industrial .....	30
Figura 2.4. Descripción réplica prueba industrial .....	33
Figura 3.1. Consumo de metabisulfito de sodio prueba ON/OFF .....	35
Figura 3.2. Consumo de sulfato de cobre prueba ON/OFF .....	36
Figura 3.3. Comparación de consumo durante prueba ON y operación normal (OFF) .....	38
Figura 3.4. Destrucción de cianuro WAD respecto del consumo de reactivos .....	40
Figura 3.5. Destrucción de cianuro total y WAD con relación al pH del proceso.....	41
Figura 3.6. Destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 2 .....	43
Figura 3.7. Cianuro total y WAD presente en la descarga de relaves TSF .....	44
Figura 3.8. Sulfatos y sólidos totales antes y después de la adición de reactivos ...	47
Figura 3.9. Consumo de metabisulfito de sodio prueba ON/OFF - Replica.....	48
Figura 3.10. Consumo de sulfato de cobre prueba ON/OFF - Replica.....	49
Figura 3.11. Comparación de consumo prueba (ON) y prueba (OFF) .....	50
Figura 3.12. Destrucción de cianuro WAD respecto del consumo de reactivos .....	53
Figura 3.13. Destrucción de cianuro WAD en DETOX 1 .....	54
Figura 3.14. Destrucción de cianuro WAD en DETOX 2 .....	55

Figura 3.15. Cianuro total y WAD presente en la descarga de relaves TSF ..... 56

Figura 3.16. Sulfatos y sólidos totales antes y después de la adición de reactivos . 58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Concentración de cianuro en plantas [ Guerrero, 2013].....	5
Tabla 1.2. Métodos de destrucción de cianuro.....	19
Tabla 1.3. Niveles de Efluentes Líquidos [IFC, 2007].....	21
Tabla 2.1. Plan de dosificación de reactivos prueba DETOX.....	28
Tabla 2.2. Plan de dosificación de reactivos prueba DETOX, Replica. ....	32

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha presentado la agenda de objetivos de desarrollo sostenible (ODS), donde se muestra un interés constante por la conservación del medio ambiente, así mismo, estos objetivos se han aplicado en la actualidad para fortalecer el creciente establecimiento de la minería responsable en el Ecuador (Álvarez , 2019). Es por lo que esta investigación estuvo enfocada en la optimización de uno de los procesos más importantes en cuanto al manejo de efluentes cianurados en el procesamiento de minerales de oro y plata: la detoxificación de cianuro.

El cianuro es un reactivo muy utilizado en la industria minera de oro, el mismo se utiliza para los procesos de lixiviación en pilas, CIP (carbón en pulpa), CIL (carbón en lixiviación), CIC (carbón en columna), entre otros. Estos procesos son muy controlados ya que el cianuro en su forma compleja conlleva distintos problemas ambientales, como la contaminación de fuentes hídricas (ECYT-AR, 2012).

En la planta de beneficio a estudiar, el cianuro a remover proviene de un circuito CIL (carbón en lixiviación), mismo que es destruido en el proceso DETOX mediante un sistema INCO, el resultante de este proceso y una vez cumplidos los parámetros establecidos por la normativa nacional e internacional es enviada a dos puntos: planta de pasta y relavera o TSF.

### 1.1 Minería de oro en Ecuador

La minería se refiere a la actividad productiva que consiste en la extracción y explotación de los minerales existentes en el suelo y subsuelo. En Ecuador la minería se inicia como una actividad productiva desde la época incaica, durante la misma, inicia la explotación de oro de manera comercial en Portovelo, Zaruma y Loja (Ordoñez, 2012).

Según el informe del Banco Central del Ecuador, la minería artesanal y pequeña minería exportaron aproximadamente 490 Kg de oro al año en el periodo entre 2005 y 2012, mientras que entre 2013 al 2016 alcanza los 7700 Kg, entre 2016 y 2017 ARCOM implementa controles por concepto de la ilegalidad de la minería pequeña artesanal, y las exportaciones de oro disminuyeron notablemente (Banco Central del Ecuador, 2018).

Como se acaba de mencionar, para la extracción del oro es muy común el uso de cianuro de sodio, este reactivo se considera tóxico a concentraciones altas (mayor a 300 ppm) tanto para el organismo (piel, sistema respiratorio, sistema digestivo) como para el medioambiente. Por esta razón, se requiere un control de la descarga de cianuro, de ahí la importancia que la destrucción de éste se realice previo a su evacuación al medioambiente (Ministerio de Energía y Minas, 1996).

En Ecuador, el cianuro (CN<sup>-</sup>) se utiliza en piscinas de lixiviación para la extracción del oro (Oviedo, Moina, Naranjo, & Barcos, 2017). Y también en tanques donde se adiciona el cianuro con pH mayor a 10.5 y carbón activado a contracorriente de la pulpa (CIL), su control se realiza mediante la titulación de cianuro con nitrato de plata, obteniendo la concentración de cianuro libre en el proceso (Rodríguez, 2016).

En la figura 1.1 se muestran las zonas de explotación minera de oro en Ecuador. En el año 2012, la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) organizó al país en nueve zonas de planificación que abarcan provincias, cantones y parroquias con el fin de descentralizar la gestión pública y desconcentrar los recursos del presupuesto nacional para la ejecución de proyectos (ONUDI, 2020).

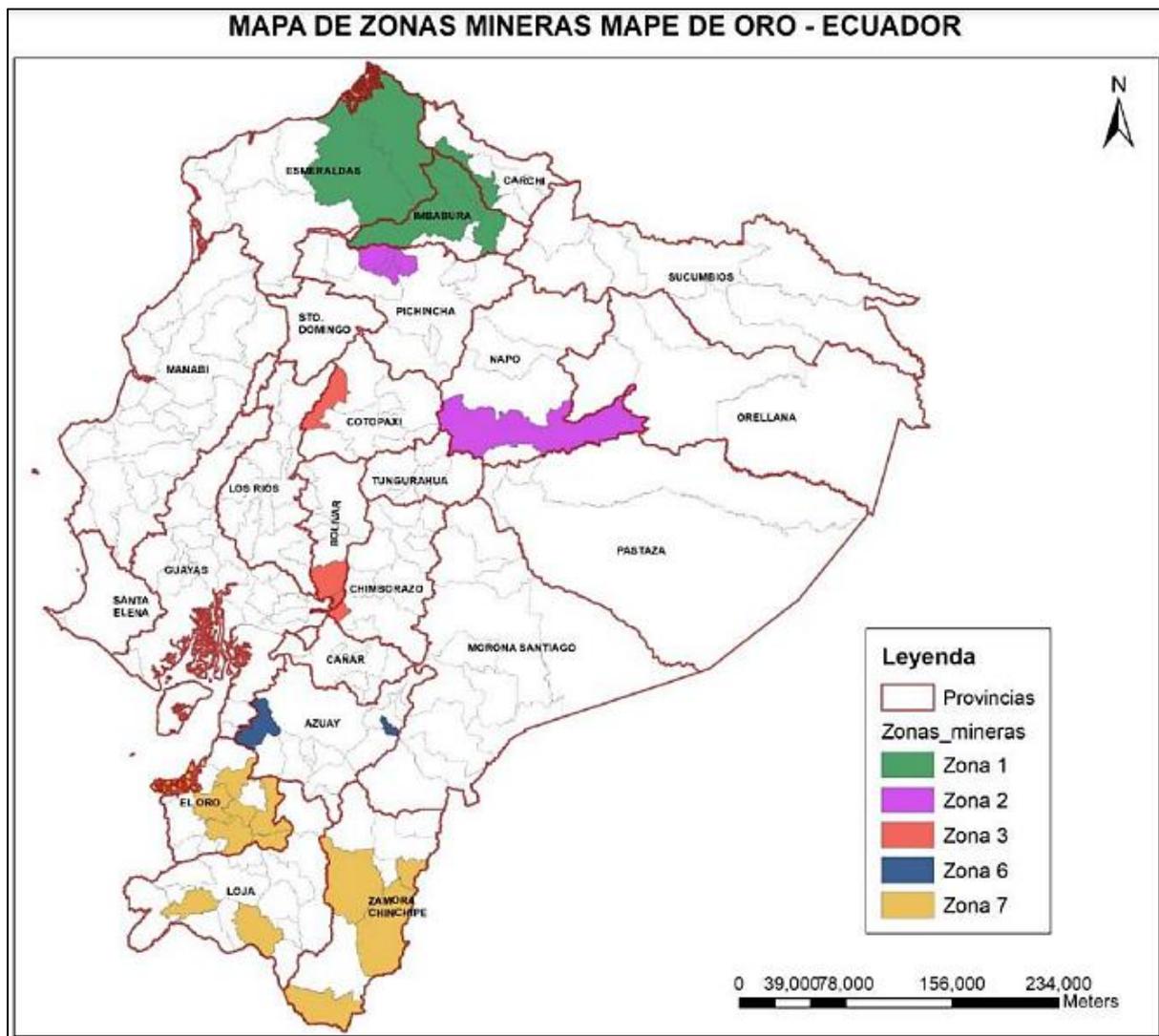


Figura 1.1. Zonas mineras en Ecuador [Ministerio del Ambiente, 2020]

## 1.2 Descripción del problema

Actualmente en la planta de beneficio objeto de este estudio, se evidencia un exceso en el consumo de reactivos como metabisulfito de sodio (consumo actual de 1.1 Kg/t, límite de consumo de 1.06 Kg/t) y sulfato de cobre (consumo actual de 0.7 Kg/t, límite de consumo de 0.67 Kg/t) empleados para la destrucción del cianuro en el circuito DETOX. Este incremento es generado por diversos factores como: variabilidad en el tonelaje de procesamiento (TPH), concentración de cianuro de sodio en el circuito de carbón en lixiviación (CIL), flujo de alimentación de pulpa, porcentaje de sólidos, dosificación de químico, aire y rango de pH.

La inestabilidad del circuito dificulta el control de los reactivos. En términos económicos aumenta el OPEX (gasto operativo) y en términos operativos impacta negativamente en los procesos de tratamiento de efluentes posteriores (relavera, tratamiento de aguas). Históricamente la planta de beneficio ha obtenido resultados de cianuro disociable con ácido débil (CN WAD) y cianuro total (CN TOTAL) por debajo de los límites máximos permisibles en el vertido, cumpliendo con el 99.9% y 99.8% de destrucción, respectivamente, aun así, para obtener esta destrucción, se ha elevado el consumo de reactivos como ha sido expuesto anteriormente.

El control de las variables que intervienen en el proceso de destrucción de cianuro permite identificar el punto de equilibrio, reduciendo el consumo de reactivos, optimizando los costos y lo más importante, continuar dentro de los límites máximos permisibles para CN WAD, CN TOTAL de la normativa nacional e internacional (Gaviria y Meza, 2006).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Evaluar la dosificación de los reactivos en el proceso de destrucción de cianuro de una planta de beneficio ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe, analizando el gasto operativo para la optimización del consumo de reactivos, cumpliendo con la normativa ambiental vigente de Ecuador.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar las variables actuales que afectan a las condiciones de operación del proceso DETOX en la planta de beneficio.
- Modificar la dosificación de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre en los tanques del circuito de destrucción de cianuro durante pruebas industriales para evaluar el comportamiento de dicho circuito.
- Analizar las condiciones de operación que representan el menor gasto de reactivos, minimizando el impacto ambiental.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Cianuro

El cianuro es un grupo químico que contiene un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple, suele encontrarse asociado con elementos como el sodio, potasio o como enlace libre ( $\text{CN}^-$ ) conocido como cianuro libre o hidrógeno de cianuro.

El hidrógeno de cianuro es un gas incoloro que se caracteriza por tener un olor amargo. El cianuro de sodio y de potasio, son sólidos blancos que en ambientes húmedos desprenden un olor amargo. En la tabla 1.1. se menciona la concentración de este químico en ciertas plantas y alimentos como la manzana, almendras, frijoles, soja, etc.

**Tabla 1.1 Concentración de cianuro en plantas [ Guerrero, 2013].**

<b>Especies de Plantas</b>	<b>Concentración (mg/Kg)</b>
<b>Yuca</b>	
<b>Hojas</b>	377 – 500
<b>Raíces</b>	138
<b>Raíces desecadas</b>	46 -< 100
<b>Pure</b>	81
<b>Punte de Bambú</b>	Max. 800
<b>Poroto Blanco (Birmania)</b>	2100
<b>Almendra</b>	280 2500
<b>Sorgo (planta joven)</b>	Max. 2500

Este producto químico también es utilizado en el revelado fotográfico, manufactura de plásticos, procesos mineros y metalúrgicos, entre otros (ATSDR, 2006).

En su manipulación y almacenaje se deben tener muchos cuidados y precauciones ya que se trata de un reactivo tóxico y venenoso.

### 1.4.2 Compuestos de cianuro

A continuación, se muestran las diferentes formas en las que se puede encontrar el cianuro, éstas son:

### **1.4.2.1 Cianuro Total**

Se denomina así a todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa. El cianuro total incluye: el cianuro libre [  $\text{CN}^-$ ,  $\text{HCN}$  ], cianuros simples [  $\text{NaCN}$ ,  $\text{KCN}$ ,  $\text{Ca}(\text{CN})_2$ ,  $\text{Hg}(\text{CN})_2$  ], cianuros complejos, este último conformado por: complejos débiles [  $\text{Zn}(\text{CN})_4^{-2}$ ,  $\text{Cd}(\text{CN})_3^{-2}$  ]; moderadamente fuertes: [  $\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}$ ,  $\text{Ni}(\text{CN})_4^{-2}$  ] y fuertes [  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{-4}$ ;  $\text{Co}(\text{CN})_6^{-4}$  ];  $\text{Au}(\text{CN})_2$  (Gaviria, 2006).

### **1.4.2.2 Cianuro Libre**

Esta denominación comprende tanto al ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno ( $\text{HCN}$ ) molecular como al ión cianuro. Esta terminología se emplea tanto para la descripción analítica del cianuro como para evaluar su toxicidad.

Las soluciones ácidas favorecen la presencia de ácido cianhídrico ( $\text{HCN}$ ), a valores de pH menores a 7 casi todo el cianuro libre está presente como  $\text{HCN}$ , a un pH de 9.24, las concentraciones de  $\text{HCN}$  y  $\text{CN}^-$  son iguales y aun pH de 12 el cianuro libre se encuentra como ión cianuro (Gutiérrez, 2021).

A pH menor a 10.5 la presencia de ácido cianhídrico ( $\text{HCN}$ ) es inminente e incrementa a medida que el pH decrece, este gas es incoloro e inodoro para la mayoría de las personas, inflamable y se dispersa rápidamente en espacios abiertos, y al ser menos denso que el aire tiende a elevarse. Es tóxico y venenoso al ser inhalado afecta a distintas partes del cuerpo humano. Si durante operación el detector de  $\text{HCN}$  marca valores de 4.5 partes por millón (ppm) se debe retirar del área y a 10 ppm evacuar (Pizzorni, 2021).

### **1.4.2.3 Cianuros Simples**

Los cianuros simples son todos aquellos compuestos que se definen como sales del ácido cianhídrico ( $\text{HCN}$ ), tales como  $\text{NaCN}$ ,  $\text{KCN}$ , etc., los cuales se disuelven completamente en el agua liberando un catión y un ión cianuro. Los cianuros libres y simples pueden convertirse en cianatos ( $\text{CNO}^-$ ) cuando se les somete a procesos de oxidación, también pueden formar tiocianato por efecto de la reacción entre sustancias que contengan azufre y el ión cianuro (Vargas, 2016).

#### 1.4.2.4 Cianuros Complejos

Los cianuros complejos son todos aquellos compuestos que están formados por la unión del ión cianuro con los metales de transición del bloque “d” de la tabla periódica y sus vecinos como el Zn, Cd, y Hg. De los cuales los veintiocho elementos, en diferentes estados de oxidación son capaces de formar hasta setenta y dos complejos con la molécula de cianuro, un alto porcentaje de todos son aniónicos. También pueden existir complejos mixtos como  $[M(CN)_5X]^{n-}$ , donde **M** es un metal y **X** puede ser una molécula de agua H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CO, NO, H o un halógeno (Castillón, 2015).

El proceso de formación de un complejo metálico en una solución cianurada es un fenómeno secuencial, es decir, a medida que el metal inicia la formación de un producto de solubilidad baja, este a su vez interactúa con el ión cianuro en exceso para formar un complejo de cianuro soluble y estable. La cantidad de complejos solubles que se forman está determinada por la concentración del ión cianuro libre. El cianuro de hierro es uno de los complejos de cianuro más resistentes a la oxidación, existe hasta pH bajos, pero puede ser descompuesto fotolíticamente por la luz ultravioleta, liberando cianuro libre (Castillón, 2015).

#### 1.4.2.5 Compuestos derivados del cianuro

- **Cianato (CNO<sup>-</sup>)**: es un producto generado durante el procesamiento de minerales, debido a la reacción entre el ión cianuro libre y el ión metálico o durante el tratamiento de efluentes que contienen cianuro por medio de un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno o el ión hipoclorito. Por otra parte, el cianato en una circunstancia específica también puede formarse por la reacción de un mineral que contenga carbonato cúprico mediante la siguiente reacción (1):



La hidrólisis del cianato a ión bicarbonato y amonio no tiene lugar en condiciones alcalinas, por lo que esta reacción ocurre cuando el pH es de carácter ácido en la solución. No se conoce la totalidad de la hidrólisis del

cianato, aunque hay estudios que demuestran que este compuesto es estable en un periodo de 28 días en soluciones sintéticas. El cianato también puede ser oxidado por el ión hipoclorito a un pH 8 - 9 formando nitrógeno y carbonato como productos de reacción. Hay muy poca información sobre el comportamiento del cianato en solución, por lo que asumir que la descomposición del cianato es la hidrólisis para formar amoníaco y carbonato no deja de ser una simplificación y abre la puerta hacia líneas de investigación más profundas (Pérez, 2007).

- **Tiocianato (SCN<sup>-</sup>):** se forma por la reacción del ión cianuro, oxígeno y átomos de azufre, pueden estar presentes en forma de minerales o polisulfuros.

Los tiocianatos son más estables en solución e inclusive son más resistentes a la fotodescomposición, sin embargo, pueden ser degradados por microorganismos como el Thiobacillus thiocyanoxidans que lo oxida formando amoníaco y sulfato. También pueden ser oxidados total o parcialmente por agentes oxidantes para formar cianato dependiendo del tipo de agente, tiempo de retención y dosificación de oxidante (Pérez, 2007).

En la tabla 1.2., se muestra un resumen de los compuestos de cianuro mencionados anteriormente.

**Tabla 1.2. Compuestos de cianuro [Fernández, 2007]**

<b>Clasificación</b>	<b>Compuestos</b>
<i>Cianuro Libre</i>	CN <sup>-</sup> , HCN
<i>Cianuros simples</i>	
- <i>Fácilmente solubles</i>	NaCN, KCN, Ca (CN) <sub>2</sub> , Hg (CN) <sub>2</sub>
- <i>Sales neutras insolubles</i>	Zn (CN) <sub>2</sub> , CuCN, AgCN
<i>Cianuros complejos débiles</i>	Zn (CN) <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , Cd (CN) <sub>3</sub> <sup>-1</sup> , Cd (CN) <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
<i>Cianuros complejos moderadamente fuertes</i>	Cu (CN) <sub>1</sub> <sup>-2</sup> , Cu (CN) <sub>2</sub> <sup>-3</sup> , Ni (CN) <sub>2</sub> <sup>-4</sup> , Ag (CN) <sub>1</sub> <sup>-2</sup>
<i>Cianuros complejos fuertes</i>	Fe (CN) <sub>6</sub> <sup>-4</sup> , Au (CN) <sub>2</sub> <sup>-1</sup> , Fe (CN) <sub>6</sub> <sup>-3</sup>

### 1.4.3 Riesgos de manipulación de cianuro

Para el transporte de las briquetas de cianuro de sodio sólido se mantiene una temperatura y humedad controladas, los diferentes fabricantes envasan este producto en cajas desechables con revestimientos no retornables, cilindros de acero no retornables o recipientes de acero reutilizables (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001).

Por normativa el código internacional para el manejo del cianuro (International Cyanide Management Institute, 2021) solicita que todos los embarques de cianuro cuenten con su hoja de seguridad (MSDS) con la información del reactivo, toxicidad, información de primeros auxilios, etc.

Para la manipulación del cianuro, es importante conocer que se trata de una sustancia peligrosa clase 6.1 (materia tóxica) y número UN 1689.

Con las indicaciones de peligro descritas a continuación:

- H290 - Puede ser corrosivo para los metales.
- H372 - Provoca daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.
- H410 - Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
- H300 + H310 + H330 - Mortal en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación.
- EUH032 - En contacto con ácidos libera gases muy tóxicos.

Los consejos de prudencia para el manejo de esta sustancia son:

- P390 - Absorber el vertido para que no dañe otros materiales.
- P330 - Enjuagarse la boca.
- P280 - Llevar guantes/ prendas de protección.
- P302 + P350 – En caso de contacto con la piel: Lavar suavemente con agua y jabón abundantes.
- P310 - Llamar inmediatamente a un Centro de Información Toxicológica o a un médico.

- P304 + P340 – En caso de inhalación: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración.

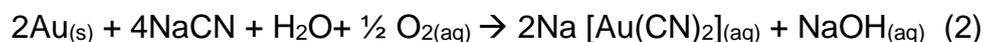
Además, hay que recordar que, al ser una sustancia ambientalmente tóxica, también representa peligro para invertebrados terrestres, para organismos del suelo y vertebrados terrestres.

#### 1.4.4 Procesos de lixiviación con cianuro

Generalmente para la extracción de oro por lixiviación con cianuro se utilizan soluciones diluidas de cianuro de sodio, potasio o calcio, en concentraciones entre 100 a 500 ppm, estas soluciones se ajustan a un pH mayor a 10 con soda cáustica o lechada de cal para evitar la formación del gas ácido cianhídrico (HCN) (Eppers, 2014).

El cianuro actúa en condiciones ligeramente oxidantes, de esta manera su función es disolver el oro contenido en el mineral, formando un complejo soluble en agua. La solución con gran contenido de oro se denomina “solución cargada”, esta suele ser filtrada en columnas de carbón activado donde el complejo de oro y cianuro es adsorbido (Eppers, 2014).

El cianuro en contacto con el oro, forma complejos estables, de ahí su importancia en la industria minera de extracción de oro, la interacción entre el cianuro y el oro se muestra en la siguiente fórmula (2):



Es así como del 20% del cianuro usado en la industria mundial, el 18% es usado en la industria minera. En estos procesos se conocen varias formas de cianuro: total, libre, y disociable en ácido débil (WAD), las mismas que mostraron anteriormente en el apartado 1.4.2 (Guerrero, 2005).

La solución pobre o con bajo contenido de oro y contenido de cianuro libre, puede ser recirculada en el proceso para extraer más oro o ser enviada a los relaves, no sin

antes destruir el cianuro residual, ya que estos efluentes suelen ser vertidos al medio ambiente (Ministerio de Energía y Minas, 1996).

En la figura 1.2 se puede observar el proceso de carbón en lixiviación (CIL) el cual integra la lixiviación y el carbón en pulpa en una única operación y en una sola unidad en la que los tanques de lixiviación están equipados con filtros de retención de carbón y de esta manera se prescinde de los tanques de carbón en pulpa. Es un método a contracorriente en la cual la pulpa ingresa al tanque uno y el carbón activo al tanque n (último) con dirección al tanque uno, la disolución y adsorción ocurre de forma paralela, el cianuro disuelve los metales preciosos y el carbón absorbe los mismos en un proceso a contracorriente.

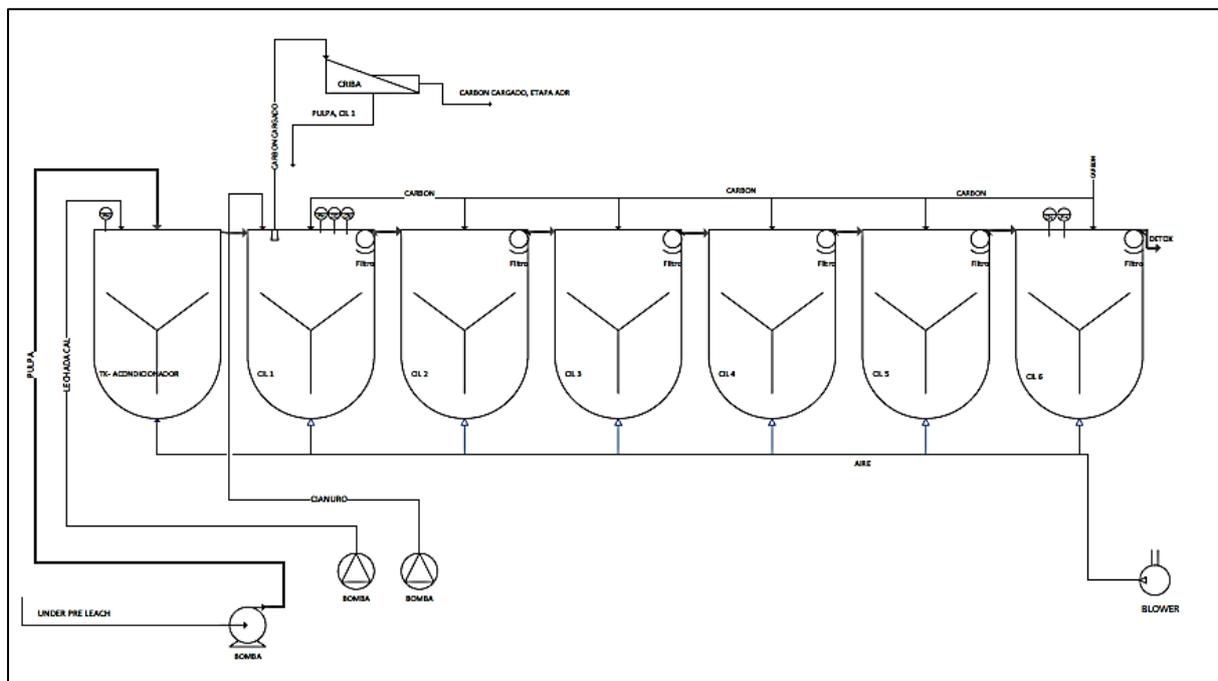


Figura 1.2. Lixiviación de oro CIL

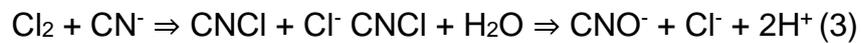
#### 1.4.5 Métodos de destrucción de cianuro

Existen numerosos métodos de destrucción del cianuro, a continuación, se muestran algunos de los más importantes:

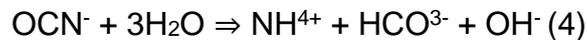
### 1.4.5.1 Cloración

Este método fue muy utilizado para eliminar cantidades de cianuro hasta niveles muy pequeños, pero resulta costoso debido al elevado consumo de reactivos pues, aunque el uso teórico de consumo de cloro para oxidar el cianuro a cianato es de 2.73 gramos de Cl<sub>2</sub> por gramo de CN oxidado, en la práctica es de 3 a 8 gramos de Cl<sub>2</sub> por gramo de CN oxidado.

El proceso tiene lugar en dos fases. En la primera, el cianuro se convierte en cloruro de cianógeno (CNCl) y, en la fase posterior, el cloruro de cianógeno se hidroliza formando cianato (3):



Con un exceso pequeño de cloro, el cianato es posteriormente hidrolizado a amonio en esta reacción (4):



Con un exceso suficiente de cloro se llega al punto en el que todo el amonio es oxidado a nitrógeno gas (5):



Además de cianuro, cianato y amonio, el cloro puede oxidar al tiocianato, pero provoca un consumo muy elevado de cloro (6):

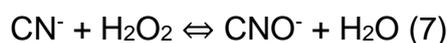


La ventaja de este proceso es que se aplica tanto para cianuro libre como para WAD, pero sólo se consiguen eliminar pequeñas cantidades de cianuro de hierro, dependiendo de la cantidad de otros metales presentes (Leiva, 2012).

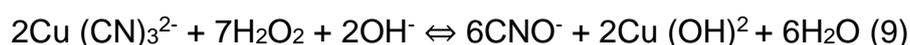
#### **1.4.5.2 Peróxido de hidrógeno**

Este método de destrucción de cianuro usa el peróxido de hidrógeno ya que se trata de un reactivo oxidante no contaminante, este método ha sido usado en distintos proyectos metalúrgicos en el mundo (Leiva, 2012).

Para que la reacción sea eficiente, se requiere pH básico de 10, durante este proceso de destrucción se llevan a cabo las reacciones (7-8):



En pH 9 se oxidan complejos cianurados de metales como el Cu y Zn, esta oxidación permite la precipitación de hidróxidos (9):



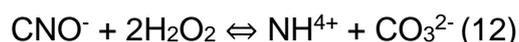
Los ferrocianuros no son oxidados, pero precipitan como sales de metal insoluble (Fe, Cu, Zn) junto con los precipitados de hidróxido (10):



El exceso de peróxido durante el proceso favorece la formación de iones carbonato y nitrito, mismo que deriva en nitrato (11):



El cianato formado durante el proceso se hidroliza espontáneamente formando ión amonio e ión carbonato (la reacción sólo ocurre de forma apreciable a temperatura ambiente y a valores de pH por debajo de 7). Se estima que, entre un 10 y un 15 % de los iones cianato generados reaccionan de este modo (12):



Finalmente, cualquier nivel residual de oxidante se descompone espontáneamente generando oxígeno (13):



#### **1.4.5.3 Proceso INCO SO<sub>2</sub> / Aire**

Este proceso de oxidación patentado en 1984 por la INCO (International Nickel Company), aplicada en varias operaciones mineras en los Estados Unidos de Norteamérica; basado en la inyección de una mezcla de dióxido de azufre y aire en el tanque de detoxificación, la cual rápidamente oxida el cianuro libre y el cianuro disociable en ácido débil presente en la solución acuosa, utilizando como catalizador iones de cobre (II) (Viveros, 2019).

En la figura 1.3 se muestra un esquema de este método en la cual la pulpa que ingresa al circuito es acondicionada con el sulfato de cobre, posteriormente ocurre la adición de metabisulfito de sodio. La adición de lechada de cal dependerá de la lectura de los potenciómetros de pH, el porcentaje de sólidos de la pulpa es regulado con la adición de agua. La inyección de aire ocurre por la parte inferior. El proceso requiere de agitación constante.

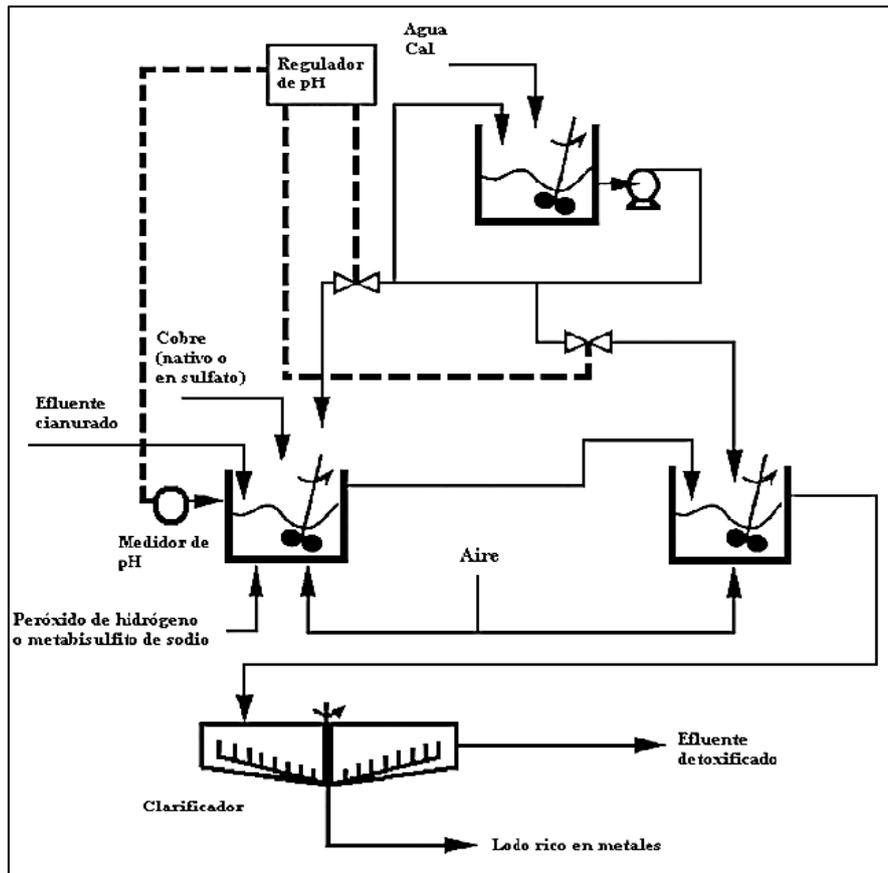
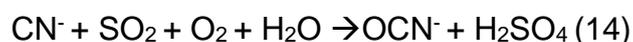


Figura 1.3. Diagrama proceso INCO [Álvarez, 2005]

El pH óptimo para el proceso es de 8 a 9 evitando la aparición de cianuro de hidrógeno (HCN), la dosis de dióxido de azufre en el aire inyectado está en torno al 1 - 2% (en volumen), aunque operativamente puede llegar hasta valores del 10%. El dióxido de azufre se suele inyectar en fase líquida o gaseosa (combustión de azufre puro). Otras fuentes de dióxido de azufre son el metabisulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) y el sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ).

Las reacciones fundamentales que están involucradas en el Proceso INCO  $\text{SO}_2$ /Aire para la destrucción de cianuros y sus etapas de oxidación, neutralización y precipitación, quedan descritas en el siguiente esquema reaccional:

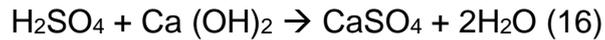
Oxidación (14 -15):



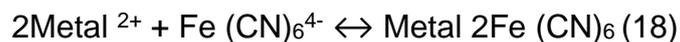
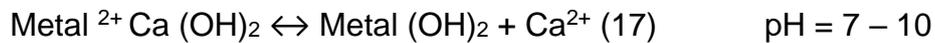


(Metal)  $\text{Me}^{2+} = \text{Zn}^{2+}; \text{Cu}^{2+}; \text{Ni}^{2+}; \text{Cd}^{2+}; \text{etc.}$

Neutralización (16):



Precipitación (17 - 18):



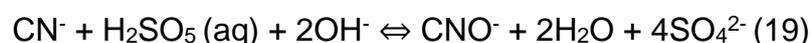
Estas reacciones son catalizadas por iones de cobre (II) en solución.

Dióxido de azufre / cianuro disociable en ácido débil ( $\text{SO}_2/\text{CN Wad}$ ) = 2.46 g/g.

El control del Proceso INCO requiere el conocimiento de la concentración de cianuros, metales en la carga y en el efluente, así como los parámetros de control del reactor: pH, cianuros libres, demanda de oxígeno, temperatura, etc (Lizarte, 2001).

#### **1.4.5.4 Ácido Caro.**

El ácido caro o peroximonosulfúrico es una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_5$  (peroxo-mono-sulfuric-acid) que se produce de la mezcla de altas concentraciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 95% con  $\text{H}_2\text{O}_2$  en concentración del 50 - 60%. Además, este ácido requiere una base como  $\text{NaOH}$  o  $\text{Ca (OH)}_2$ , para mantener un pH de 9 a 9.5 que es el requerido operativamente. Este proceso presenta las reacciones (19 – 20):





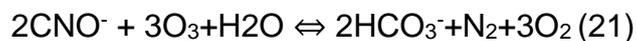
Comparado con otros oxidantes, el ácido de Caro tiene una elevada velocidad de oxidación, no requiere adición de catalizadores y es muy eficaz, tanto en soluciones claras como en fangos (Leiva, 2012).

#### **1.4.5.5 Ozono.**

Agente oxidante generado por aire seco o por oxígeno, método innovador aun en investigación.

La ozonización muestra que la oxidación de 1 mol de cianuro consume 1 mol  $\text{O}_3$  y produce 1 mol de cianato. La primera reacción, denominada “ozonación simple”, libera oxígeno molecular que puede continuar el proceso de oxidación del cianuro. La segunda denominada “ozonación catalítica” es de alta eficiencia oxidante.

Una vez que el cianuro ha sido oxidado, el cianato es oxidado lentamente por el ozono aun disponible según la siguiente reacción (21):

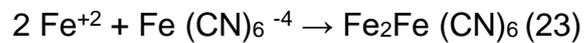
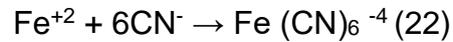


Para ello se requiere 1.85 gramos de  $\text{O}_3$  por gramo de CN. Los valores actuales están en el rango de 3 – 6 gramos de  $\text{O}_3$  por gramo de CN oxidado. Es necesario controlar el pH por debajo de 11 durante todo el proceso debido a que los iones hidronio pueden descomponer al ozono afectando la oxidación si hay valores de pH superior a 11 (Gómez, 2012).

#### **1.4.5.6 Sulfato Ferroso.**

Este proceso es utilizado para transformar el cianuro libre a ferrocianuro y/o ferricianuro que son compuestos más estables considerados de baja toxicidad y se realiza a un pH óptimo de 7.5 – 10.5, La adición de iones ferrosos a soluciones que

contienen cianuro férrico deja un precipitado azul conocido como azul de Turnbull. Las reacciones del proceso son (22 – 23):



El tiempo de reacción necesario para precipitar el cianuro libre en forma de complejo de hierro mixto varía entre unos 15 y 30 minutos. Cuando el cianuro libre se ha convertido en cianuro complejo de hierro estable, su velocidad de degradación disminuye, siendo necesarios periodos de tiempo más largos para llegar a contenidos aceptables.

Entre los inconvenientes derivados del proceso se encuentran los siguiente: el primero es la acumulación de cianuro de hierro en los estériles convirtiéndolos en un residuo peligroso, el segundo los cianuros precipitados son de naturaleza ácida y pueden provocar la generación de agua ácida de mina si se evacúan junto con materiales capaces de formar ácidos (sulfuros) (Mamani, 2014).

En la figura 1.4 se representa el diagrama de Pourbaix, el cual traza un equilibrio estable en las fases de un sistema electroquímicamente acuoso. Los límites de iones predominantes son representados por las líneas  $E_h$  frente al pH para el sistema Fe–CN–H<sub>2</sub>O a 25°C, los minerales de óxido que no se disuelven producen un complejo cianurado Fe (II),  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ , este puede oxidarse más adelante a cianuro Fe (III),  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ , dependiendo de las condiciones de la solución, pero la velocidad de oxidación con oxígeno disuelto es baja, por lo que los oxidantes fuertes como el ozono o el peróxido de hidrogeno son necesarios. La zona de predominancia del complejo Fe (III) depende de la concentración de cianuro y el pH.

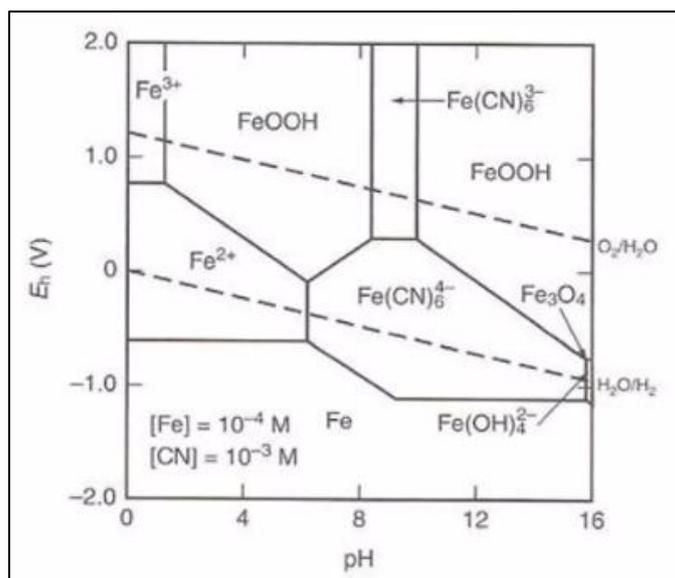


Figura 1.4. Diagrama  $E_h$  – pH para el sistema Fe-CN- $H_2O$  a 25 °C [Mamani,2014]

A continuación, se muestra la tabla 1.2 como resumen de los diferentes métodos de destrucción del cianuro anteriormente expuestos, donde se comparan y analizan las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Tabla 1.2. Métodos de destrucción de cianuro

Tratamiento	Reactivo por g de cianuro – teórico	Reactivo por g de cianuro – práctico	Ventajas	Desventajas	Referencias
<b>Cloración</b>	2.73	3-8	Fácil control de dosificación y manipulación	Para altas concentraciones de cianuro la reacción es exotérmica produciendo gases tóxicos	(Leiva, 2012)
<b>Peróxido de hidrógeno</b>	1.31	2-8	Oxidante eficaz y de fácil manipulación.	Proceso lento en ausencia de iones Cu II	(Leiva, 2012)
<b>INCO <math>SO_2</math>/aire</b>	2.46	3-4	Oxidación rápida de cianuro libre. Usa el ion cobre como catalizador	Subproductos tóxicos. Alta concentración de sales disueltas Sensible a cambios de pH	(Gómez, 2012)
<b>Acido Caro</b>	5.7	-	Eliminación de iones metálicos No requiere catalizador	Elevado consumo de reactivos. Requiere adición de un alcalinizante.	(Leiva, 2012)

<b>Ozono</b>	1.85	3-6	Oxidación de fenoles y cromóforos, transformándolos en sustancias no tóxicas	Estrictas medidas de seguridad para almacenar ozono.	(Gómez, 2012)
<b>Sulfato ferroso</b>	-	12	Fácil manipulación y dosificación. Bajo costo operativo.	El ferrocianuro se descompone en cianuro. Efluente coloreado de azul.	(Mamani, 2014)

#### 1.4.6 Regulaciones Ambientales

La normativa legal e institucional que aplica al proyecto de tesis es la siguiente:

Según la Constitución de la República del Ecuador (2008) publicada en el Registro Oficial (R.O.) N°. 449, el 20 de octubre. En el Artículo 3 considera como deberes del Estado el “Proteger el patrimonio natural y cultural del país”; en el Artículo 14, “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*”; en el Artículo 66, numeral 27, reconoce y garantiza; “El derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza.

Acuerdo Ministerial No. 099 Registro Oficial 601, 2015 del Ministerio del Ambiente, Instructivo para el registro de Sustancias químicas Peligrosas y las Obligaciones Ambientales, artículo 52, inciso d; dar cumplimiento a los criterios que apliquen en base a lo establecido en la NTE INEN 2266 sobre “Transporte, Almacenamiento y Manejo de Materiales Peligrosos. Requisitos”, en su sección Disposiciones Transitorias (Ministerio del Ambiente, 2015).

Acuerdo Ministerial No. 003 registro Oficial 909, 2013, el cianuro de sodio subpartida arancelaria 2837.11.10 y cianuro de potasio subpartida arancelaria 2837.19.00, son sustancias consideradas de uso severamente restringido (Ministerio del Ambiente, 2013).

### 1.4.6.1 Límites permisibles

Según el anexo I del libro VI del texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente ecuatoriano: “Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua”, en la tabla 9: límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, el límite máximo permisible del cianuro total es de 0.1 mg/L (Ministerio de Ambiente, 2015).

En los estándares de la Corporación Financiera Internacional (IFC), como se observa en la tabla 1.3., sobre los niveles de efluentes líquidos, el límite máximo permisible para el cianuro total es 1.0 mg/L, cianuro libre 0.1 mg/L, cianuro disociable en ácido débil (CN<sup>-</sup> WAD) 0.5 mg/L (IFC, 2007).

**Tabla 1.3. Niveles de Efluentes Líquidos [IFC, 2007]**

<i>Niveles de Efluentes Líquidos</i>		
<i>Contaminante</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valor indicativo</i>
<i>Sólidos en suspensión totales</i>	mg/L	50
<i>pH</i>	S. U	6 – 9
<i>DQO</i>	mg/L	150
<i>DBO<sub>5</sub></i>	mg/L	50
<i>Aceite y grasa</i>	mg/L	10
<i>Arsénico</i>	mg/L	0.1
<i>Cadmio</i>	mg/L	0.05
<i>Cromo (VI)</i>	mg/L	0.1
<i>Cobre</i>	mg/L	0.3
<i>Cianuro</i>	mg/L	1
<i>Cianuro Libre</i>	mg/L	0.1
<i>Cianuro disociable en ácido débil</i>	mg/L	0.5
<i>Hierro (total)</i>	mg/L	2
<i>Plomo</i>	mg/L	0.2

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

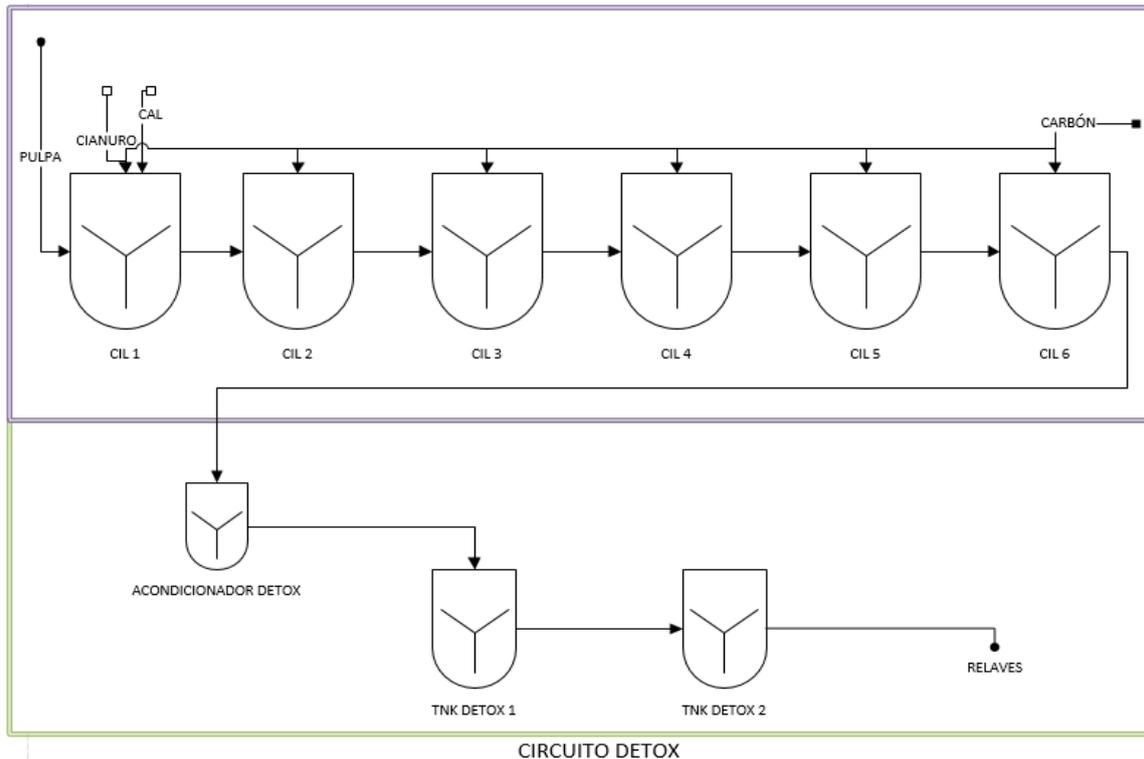
Se desarrolla la metodología del presente estudio de la siguiente manera:

- Descripción del proceso CIL – DETOX
  - Conocer el proceso CIL, de donde se obtiene el cianuro que ingresa al proceso DETOX.
  - Conocer la operación normal del proceso DETOX.
- Pruebas industriales en circuito DETOX
  - Conocer la propuesta para realizar las pruebas industriales en el circuito DETOX.
  - Conocer los flujos de cada reactivo a evaluar.
- Replica de prueba industrial
  - Evaluar el mejor resultado de la primera prueba industrial para mayor recolección de datos.

### 2.1 Descripción del proceso CIL y DETOX.

El proceso de destrucción de cianuro - DETOX de la planta de beneficio a estudiar para la optimización de los reactivos, se encuentra ubicada después del proceso de carbón en lixiviación (CIL), el cual se inicia con la alimentación de pulpa proveniente del espesador (Pre-Leach), el acondicionamiento del pH, la dosificación de cianuro de sodio (150 a 200 ppm), la adición de carbón y la inyección de aire.

El circuito CIL consta de 6 tanques interconectados con un tiempo de residencia total de 18 a 24 horas, el método de trabajo es a contracorriente, es decir, la pulpa va desde el tanque 1 al 6 y el carbón del tanque 6 al 1 (Figura 2.1).



**Figura 2.1. Proceso CIL - DETOX de la planta de beneficio objeto de estudio**

A partir del tanque 6 del CIL, se inicia el proceso de destrucción de cianuro, el cual consta de un tanque acondicionador de 5 m<sup>3</sup> y 2 tanques reactores de 700 m<sup>3</sup>, con un volumen efectivo de 560 m<sup>3</sup> cada uno y un tiempo de residencia variable de 2 a 3 horas. Estas dimensiones se deben a las siguientes características de tratamiento:

- Tonelaje de alimentación a molienda lo que genera una variación en peso de la alimentación a DETOX.
- Porcentaje de sólidos de alimentación.
- Flujos de bomba de sumideros a tanque acondicionador.
- Agua de dilución.

La pulpa con cianuro entra desde el tanque CIL 6, con un contenido de cianuro entre 90 y 120 ppm de cianuro libre. Para la reacción de destrucción de cianuro se emplean reactivos como sulfato de cobre y metabisulfito de sodio, también se inyecta aire al proceso por la parte inferior de los tanques para favorecer la reacción, el cual es ecualizado por un difusor. Ambos tanques cuentan con un sistema de agitación constante, se controla el oxígeno disuelto (DO) en el sistema por medio de medidores estacionarios.

La adición de reactivos (sulfato de cobre, metabisulfito de sodio) al sistema es efectuada a través de bombas centrifugas y neumáticas controladas de forma automática y manual, el flujo de descarga es registrado a través de flujómetros y monitoreado desde la sala de control.

En la parte superior de los tanques se cuenta con distintos sensores los cuales miden: oxígeno disuelto (DO), potencial de hidrogeno (pH), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ácido cianhídrico (HCN), cianuro libre (CN<sup>-</sup>), cianuro Wad (CN WAD). Estos dispositivos permiten una operación segura tanto para el personal como para la automatización del proceso.

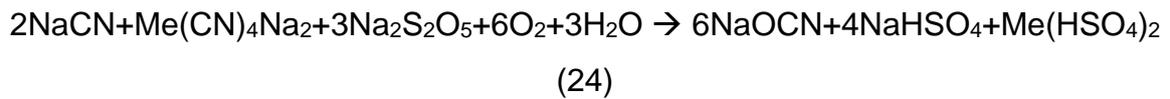
El control del pH en el proceso se realiza con potenciómetros colocados en ambos tanques. Si estos medidores identifican valores menores a 8.3, se adiciona una solución de hidróxido de calcio para mantener los niveles de pH entre 8.3 y 8.9.

El análisis de la destrucción de cianuro se lleva a cabo en el proceso con un analizador de cianuro libre y WAD en línea denominado Cynoprobe. De igual manera, se tiene un programa de toma de muestra de forma manual cada determinado tiempo para análisis de laboratorio y control operativo. El porcentaje de sólidos que ingresa al sistema oscila entre un 33 a 40% determinado por medio de un densímetro nuclear y corroborado de forma manual con la balanza Marcy, de este valor depende la adición o no de agua de dilución al sistema.

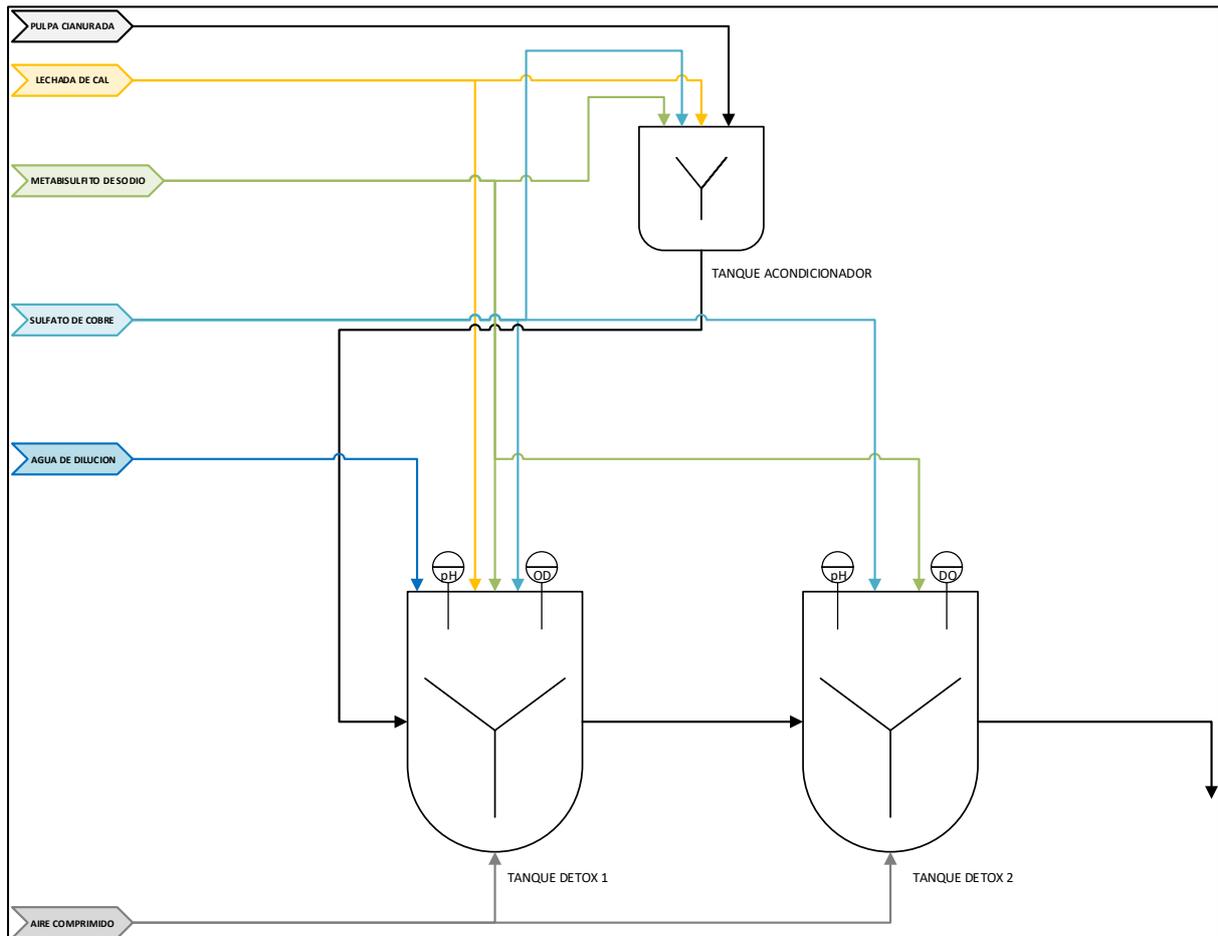
Para el proceso de destrucción de cianuro se emplea el método INCO SO<sub>2</sub>/Aire, y como se indicó en el capítulo anterior, la relación entre SO<sub>2</sub>/CN WAD es de 2.46 para garantizar las condiciones correctas para la canalización de las reacciones de oxidación, neutralización y precipitación, con objeto de obtener la destrucción eficaz del cianuro libre, WAD y total.

El sulfato de cobre cumple doble función, la primera, acondicionar el cianuro, es decir, aportar iones cobre, creando enlaces para que el cianuro pueda ser destruido efectivamente por el metabisulfito de sodio, la segunda, actúa como un catalizador de la reacción, es decir, que con las condiciones correctas acelera el proceso de destrucción del cianuro.

El metabisulfito de sodio cumple con la destrucción del cianuro mediante la oxidación, neutralización y precipitación de cianuros libres y acomplejados, según la reacción (24):



En la figura 2.2. se muestra un esquema del proceso DETOX de la planta de beneficio.



**Figura 2.2. PID proceso DETOX**

### Operación normal del circuito DETOX

En operación normal del circuito de destrucción de cianuro (DETOX) la variación en la dosificación de reactivos es significativa y por tiempos prolongados, provocada por los siguientes factores:

- Lectura elevada de cianuro Wad, cianuro libre por parte de los equipos analizadores en línea (cynoprobe) en tanque détox uno y détox dos, caja de

relaves, lo que genera automáticamente elevar al cien por ciento la velocidad de las bombas dosificadoras de reactivo, agregando al circuito aproximadamente 8 m<sup>3</sup>/hora de metabisulfito de sodio y 2.3 m<sup>3</sup>/hora de sulfato de cobre por tiempos prolongados.

- Bomba dosificadora de sulfato de cobre de tipo neumática y de control manual, el flujo de descarga es manipulado por medio de una válvula manual de aire en terreno, como resultado la dosificación es inestable y los cambios de flujos son tardíos.
- Contaminación de muestras por parte de operadores las cuales son entregadas al laboratorio químico para análisis de cianuro wad y cianuro total, cuyos resultados elevados provocan aumentar la dosificación de sulfato de cobre y metabisulfito de sodio, esto se mantiene hasta obtener el resultado de las contramuestras y poder normalizar los reactivos.
- Puntos actuales de dosificación de reactivos inadecuados, lo que genera el no aprovechamiento del cien por ciento del circuito DETOX, en temas de tiempo de residencia y reacción química, dando como resultado un consumo elevado de reactivos.
- Flujos de ingreso al circuito DETOX adicionales y que no son contabilizados por el sistema que controla la dosificación de reactivos (sulfato de cobre, metabisulfito de sodio), provocando perturbaciones en el circuito.

A continuación, se muestran, los parámetros más habituales durante una operación normal de planta:

### **Parámetros generales**

- Tonelaje tratado: 200 – 220 t/h.
- Concentración de cianuro ingreso a DETOX: 90 – 120 ppm.
- Porcentaje de sólidos DETOX: 33 – 40%.
- pH de operación 8.3 – 9.
- Oxígeno disuelto 6 a 10 mg/L.
- Concentración de metabisulfito de sodio: 3.9%.
- Dosificación actual de metabisulfito de sodio: 1.06 Kg/t (3.5 a 7 m<sup>3</sup>/h).
- Punto de dosificación: 100% tanque détox 1.
- Concentración de sulfato de cobre: 5.9%.
- Dosificación actual de sulfato de cobre: 0.67 Kg/t (1.3 a 2.3 m<sup>3</sup>/h).
- Punto de dosificación: 100% tanque acondicionador détox.

## **2.2 Pruebas industriales en circuito DETOX.**

Para el diseño y ejecución de pruebas a escala industrial se tomaron ciertas variables de control y seguimiento del sistema de destrucción de cianuro DETOX. De igual manera, las pruebas se realizaron en modo ON/OFF, detallado a continuación:

- Modo ON: ejecución de pruebas durante el turno día, manipulando las variables descritas en la figura 2.3.
- Modo OFF: normalización de reactivos, retomando dosificación estándar (100% de sulfato de cobre a tanque acondicionador DETOX y 100% de metabisulfito de sodio a tanque DETOX 1) durante el turno noche.

Como trabajos previos a la ejecución de las pruebas se verificó el estado de equipos de medición: Cynoprobe (CN<sup>-</sup>, CN WAD), potenciómetros de pH, medidores de oxígeno disuelto (OD), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ácido cianhídrico (HCN), densímetro nuclear, flujómetros; se verificó la concentración y dosificación de reactivos en el sistema DETOX. A continuación, se muestran los parámetros de mayor relevancia:

### **Parámetros generales**

- Tonelaje tratado: 200 – 220 t/h.
- Concentración de cianuro ingreso a DETOX: 90 – 120 ppm.
- Porcentaje de sólidos DETOX: 33 – 40%.
- pH de operación 8.3 – 9.
- Oxígeno disuelto 6 a 8 mg/L.
- Concentración de Metabisulfito de sodio: 3.9%.
- Dosificación actual de Metabisulfito de sodio: 1.06 Kg/t.
- Concentración de sulfato de cobre: 5.9%.
- Dosificación actual de Sulfato de cobre: 0.67 Kg/t.

### **Desarrollo de prueba industrial**

Considerando un tonelaje de 200 – 220 t/h, se estableció el siguiente plan de dosificación de reactivos mostrado en la tabla 2.1.

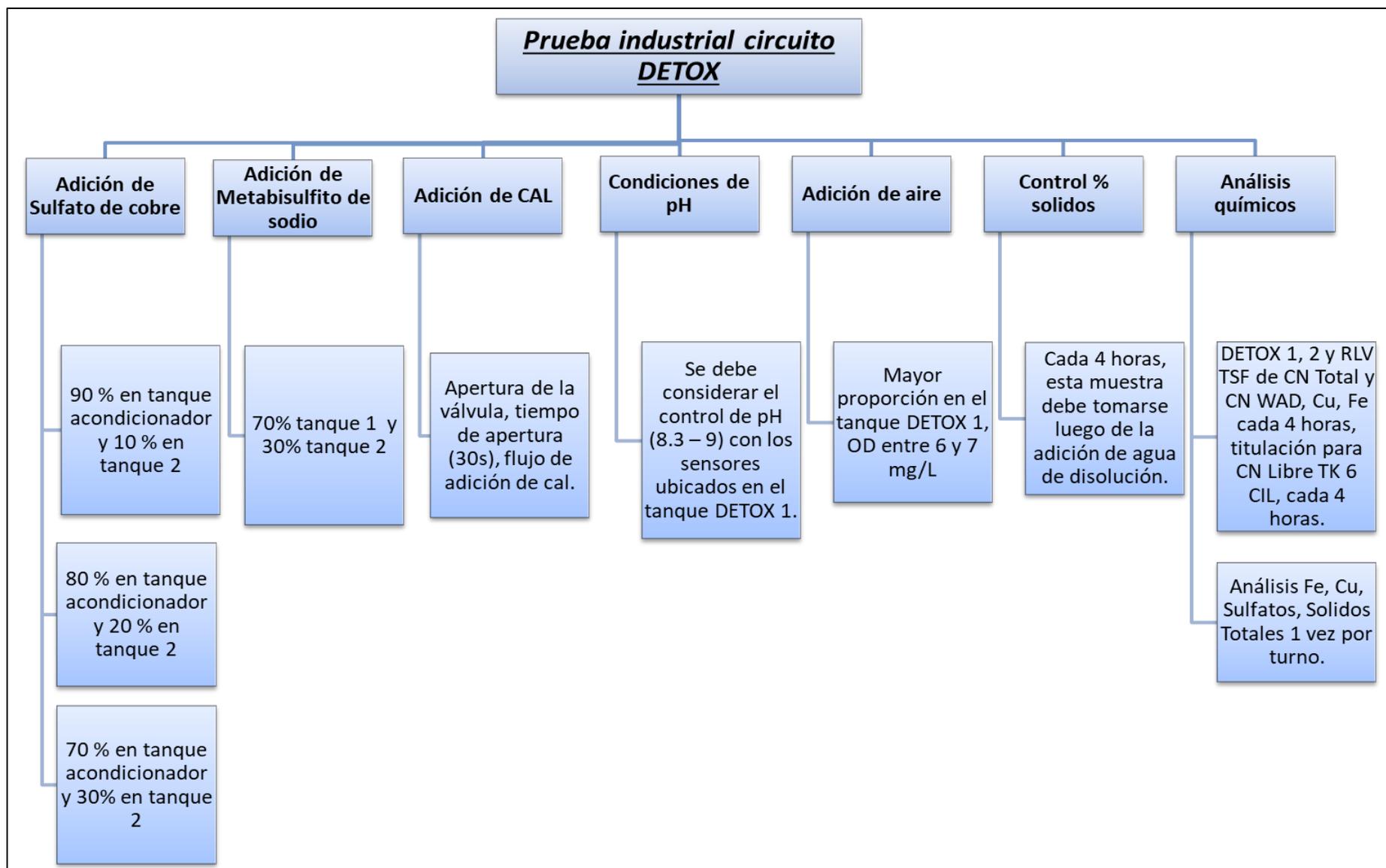
**Tabla 2.1. Plan de dosificación de reactivos prueba DETOX.**

TURNO (DIA / NOCHE)	DOSIFICACION $\text{CuSO}_4$		DOSIFICACION SMSB	
	TNK ACONDICIONADOR	TNK DETOX 2	TNK DETOX 1	TNK DETOX 2
15/16/17 D	90%	10%	70%	30%
15/16/17 N	Operación normal			
20/21 D	80%	20%	70%	30%
20/21 N	Operación normal			
22/23 D	70%	30%	70%	30%
22/23 N	Operación normal			

- Adición de Sulfato de cobre con gasto de 0.42 Kg/t, para una disminución de gasto del 37% respecto al objetivo de gasto planteado por la planta de beneficio:
  - i. 90 % en tanque acondicionador (TNK A) con 200 t/h la dosificación será 1.28 m<sup>3</sup>/h (21.3 l/min) y para 220 t/h 1.41 m<sup>3</sup>/h (23.5 l/min) y 10 % en tanque DETOX 2 (TNK D2) con 200 t/h la dosificación será 0.14 m<sup>3</sup>/h (2.3 l/min) y para 220 t/h 0.16 m<sup>3</sup>/h (2.7 l/min).
  - ii. 80 % en tanque acondicionador (TNK A) con 200 t/h la dosificación será 1.14 m<sup>3</sup>/h (18.98 l/min) y para 220 t/h 1.25 m<sup>3</sup>/h (20.88 l/min) y 20 % en tanque DETOX 2 (TNK D2) con 200 t/h la dosificación será 0.28 m<sup>3</sup>/h (4.75 l/min) y para 220 t/h 0.31 m<sup>3</sup>/h (5.22 l/min).
  - iii. 70 % en tanque acondicionador (TNK A) con 200 t/h la dosificación será 1.00 m<sup>3</sup>/h (16.61 l/min) y para 220 t/h 1.10 m<sup>3</sup>/h (18.27 l/min) y 30 % en tanque DETOX 2 (TNK D2) con 200 t/h la dosificación será 0.43 m<sup>3</sup>/h (7.12 l/min) y para 220 t/h 0.47 m<sup>3</sup>/h (7.83 l/min).

- Adición de Metabisulfito de sodio con gasto de 0.80 Kg/t, para una disminución de gasto del 25% respecto al objetivo de gasto planteado por la planta de beneficio:
  - i. 70% en tanque DETOX 1 (TNK D1) con 200 t/h la dosificación será 2.87 m<sup>3</sup>/h (47.86 l/min) y para 220 t/h 3.16 m<sup>3</sup>/h (52.65 l/min) y 30 % en tanque DETOX 2 (TNK D2) con 200 t/h la dosificación será 1.23 m<sup>3</sup>/h (20.51 l/min) y para 220 t/h 1.35 m<sup>3</sup>/h (22.56 l/min).
- Monitorear la adición de lechada de cal al sistema, apertura de la válvula, tiempo de apertura (30 segundos), flujo de adición.
- Se debe considerar el control de pH (8.3 – 9) con los sensores ubicados en el tanque DETOX 1.
- Adición de aire al sistema con mayor proporción en el tanque DETOX 1 (TNK D1), oxígeno disuelto (DO) entre 6 y 7 mg/L
- Control cada 4 horas del porcentaje de sólidos presentes en el DETOX 1, esta muestra debe tomarse luego de la adición de agua de dilución.
- Análisis químicos DETOX 1 y RLV TSF de CN Total y CN WAD, Cu, Fe cada 4 horas.
- Medición de CN libre del tanque CIL 6 mediante titulación, cada 4 horas.
- Análisis Fe, Cu, Sulfatos y Sólidos Totales, 1 vez por turno.

En la figura 2.3. se muestra un esquema de las pruebas industriales en el circuito DETOX.



**Figura 2.3. Descripción prueba industrial**

### 2.3 Replica de prueba industrial

Con los resultados obtenidos en la primera prueba industrial, se procedió a replicar la dosificación con mejor resultado con la misma metodología ON/OFF descrita a continuación:

- Modo ON: ejecución de pruebas durante el turno día, manipulando variables detalladas en la tabla 2.2 y figura 2.4.
- Modo OFF: normalización de reactivos, retomando dosificación estándar (100% de sulfato de cobre a tanque acondicionador détox y 100% de metabisulfito de sodio a tanque détox 1) durante el turno noche.

En esta réplica se planteó reducir el gasto con respecto a la prueba mantenida previamente, es decir, el gasto de sulfato de cobre se reduce de 0.42 Kg/t a 0.35 Kg/t (reducción de 17%), y gasto de metabisulfito de sodio se reduce de 0.80 a 0.70 (reducción del 13%):

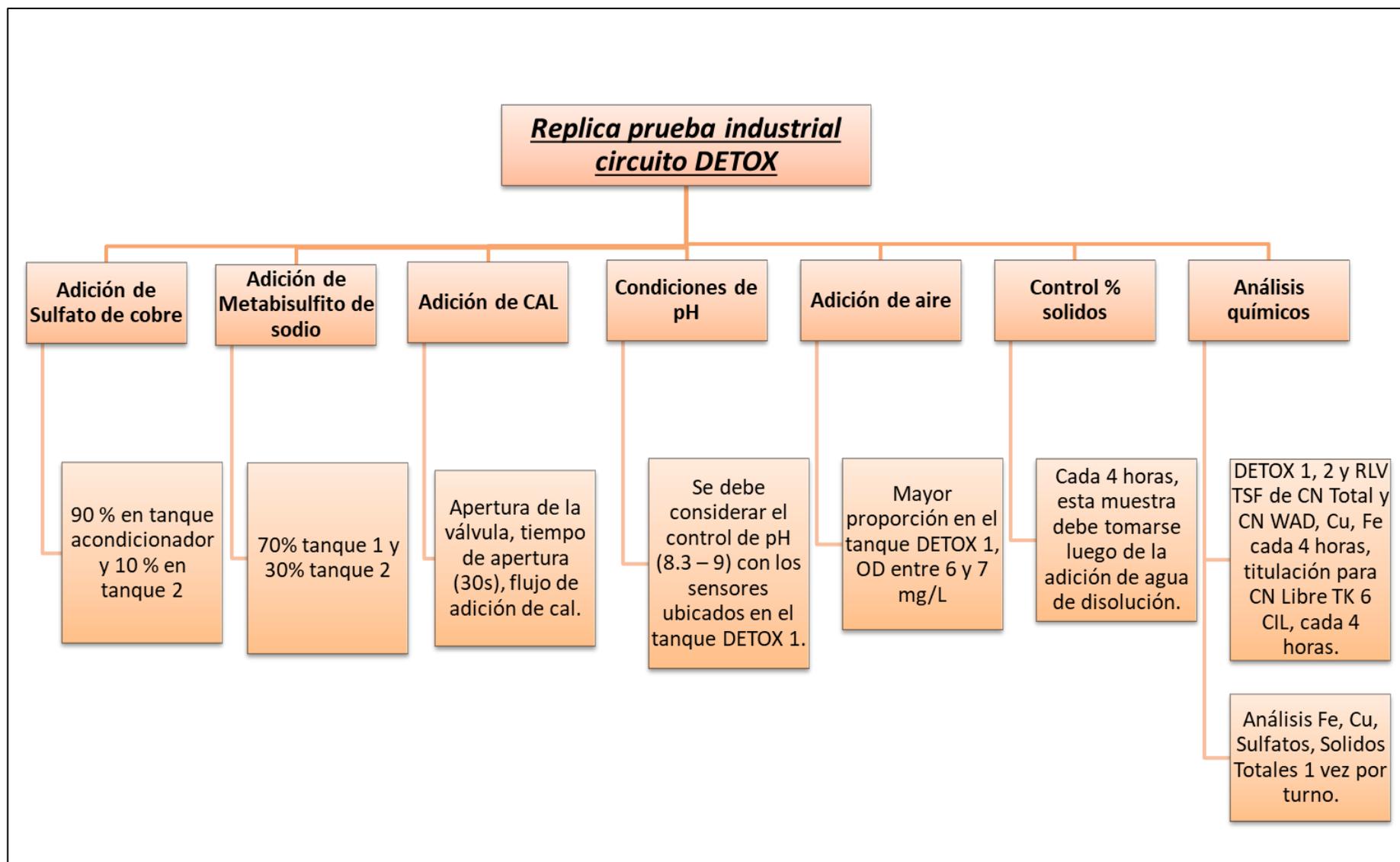
- Adición de Sulfato de cobre con gasto de 0.35 Kg/t, para una disminución de gasto del 48% respecto al objetivo de gasto planteado por la planta de beneficio (0.67 Kg/t):
  - i. 90 % en tanque acondicionador (TNK A) con 200 t/h la dosificación será 1.07 m<sup>3</sup>/h (17.8 l/min) y para 220 t/h 1.17 m<sup>3</sup>/h (19.58 l/min) y 10 % en tanque DETOX 2 (TNK D2) con 200 t/h la dosificación será 0.12 m<sup>3</sup>/h (1.98 l/min) y para 220 t/h 0.13 m<sup>3</sup>/h (2.18 l/min).
- Adición de Metabisulfito de sodio con gasto de 0.70 Kg/t, para una disminución de gasto del 34% respecto al objetivo de gasto planteado por la planta de beneficio (1.06 Kg/t):
  - i. 70% en tanque DETOX 1 (TNK D1) con 200 t/h la dosificación será 2.51 m<sup>3</sup>/h (41.88 l/min) y para 220 t/h 2.76 m<sup>3</sup>/h (46.07 l/min) y 30 % en tanque DETOX 2 (TNK D2) con 200 t/h la dosificación será 1.08 m<sup>3</sup>/h (17.95 l/min) y para 220 t/h 1.18 m<sup>3</sup>/h (19.74 l/min).
- Monitorear la adición de lechada de cal al sistema, apertura de la válvula, tiempo de apertura (30 segundos), flujo de adición.
- Se debe considerar el control de pH (8.3 – 9) con los sensores ubicados en el tanque DETOX 1.
- Adición de aire al sistema con mayor proporción en el tanque DETOX 1 (TNK D1), DO entre 6 y 7 mg/L.
- Control cada 4 horas del porcentaje de sólidos presentes en el DETOX 1, esta muestra debe tomarse luego de la adición de agua de dilución.
- Análisis químicos DETOX 1, DETOX 2 y RLV TSF para cianuro WAD cada 4 horas, titulación para CN Libre Tanque CIL 6, cada 4 horas.

- Análisis Sulfatos y Sólidos Totales, 1 vez por turno.

**Tabla 2.2. Plan de dosificación de reactivos prueba DETOX, Replica.**

TURNO  (DIA / NOCHE)	DOSIFICACION CuSO4		DOSIFICACION SMSB	
	TNK ACONDICIONADOR	TNK DETOX 2	TNK DETOX 1	TNK DETOX 2
10/11/12/13/14/15/16 D	90%	10%	70%	30%
10/11/12/13/14/15/16 N	Operación normal			

En la figura 2.4. se muestra un esquema de la réplica de la prueba industrial ejecutada en el circuito DETOX y que presentó mejor resultado.



**Figura 2.4. Descripción réplica prueba industrial**

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los principales resultados y análisis obtenidos de la ejecución de pruebas industriales en el circuito de destrucción de cianuro (DETOX).

### 3.1 Resultados prueba DETOX

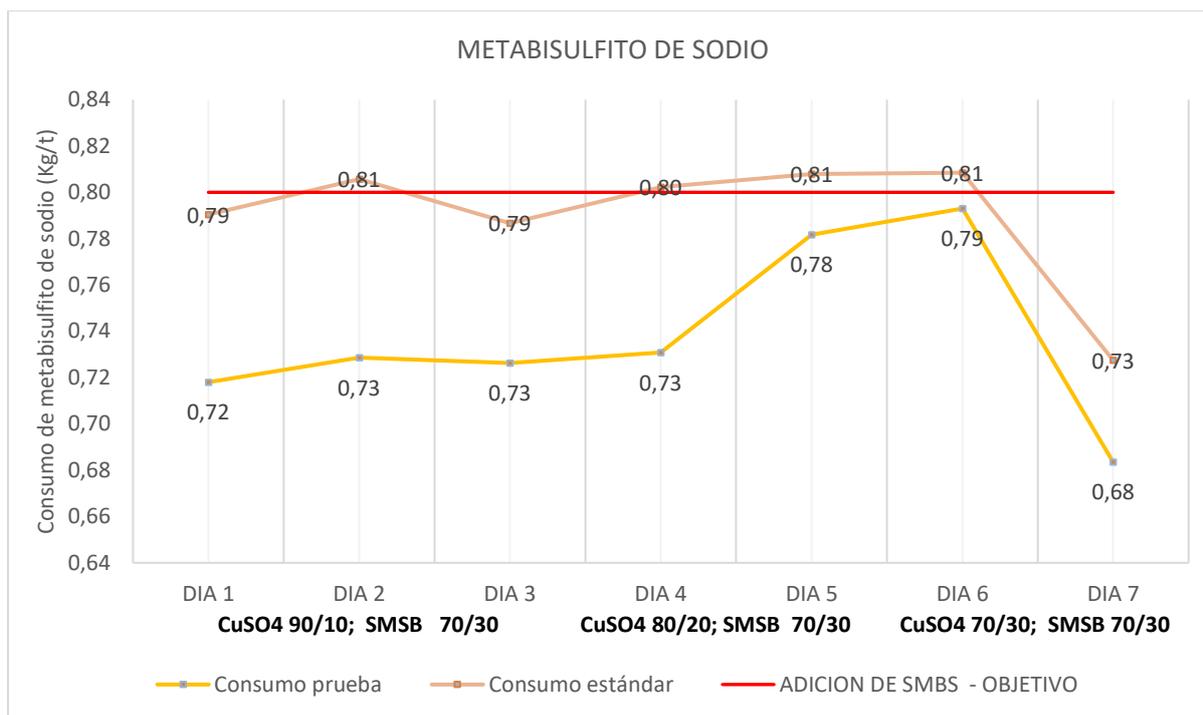
La prueba se realizó durante 7 días, la dosificación del 70 % de metabisulfito de sodio al tanque DETOX 1 y el 30% al tanque DETOX 2, el sulfato de cobre se distribuyó desde el 90%, 80% y 70% en el tanque acondicionador y en tanque DETOX 2 desde 10%, 20% y 30%, obteniendo los resultados descritos a continuación.

#### 3.1.1 Resultados de consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre

##### (a) Resultados de consumo de metabisulfito de sodio

Respecto al consumo del metabisulfito de sodio que se muestra en la figura 3.1, durante la prueba inicial se observa menor gasto de kilogramos sobre tonelada (Kg/t) en la prueba Industrial (ON) respecto a la operación normal (OFF) es decir, durante los días en el que se mantuvo una dosificación de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.



**Figura 3.1. Consumo de metabisulfito de sodio prueba ON/OFF**

El gasto diario disminuye notablemente respecto al gasto durante la operación normal (modo OFF), en el día 1 se observa, por ejemplo, que el gasto durante la prueba industrial es de 0.72 Kg/t y durante el turno noche donde se normaliza reactivos en modo OFF es de 0.79 Kg/t, por tanto, se ha conseguido reducir el gasto en 0.07 Kg/t, lo que representa el 8.86%.

Esto no ocurre durante los días 5, 6 y 7, durante estos días se mantiene la prueba ON con dosificación del 70% de metabisulfito de sodio en el tanque acondicionador y 30% en el tanque DETOX 2, así pues, en el día 6 se observa que el gasto durante la prueba es de 0.79 Kg/t y en operación normal turno de noche el gasto fue de 0.81 Kg/t, la reducción del gasto fue de 0.02 Kg/t, lo que representa el 2.47%, lamentablemente este valor no es significativo y por tanto, no beneficiaría a la reducción de químicos, objetivo de este estudio.

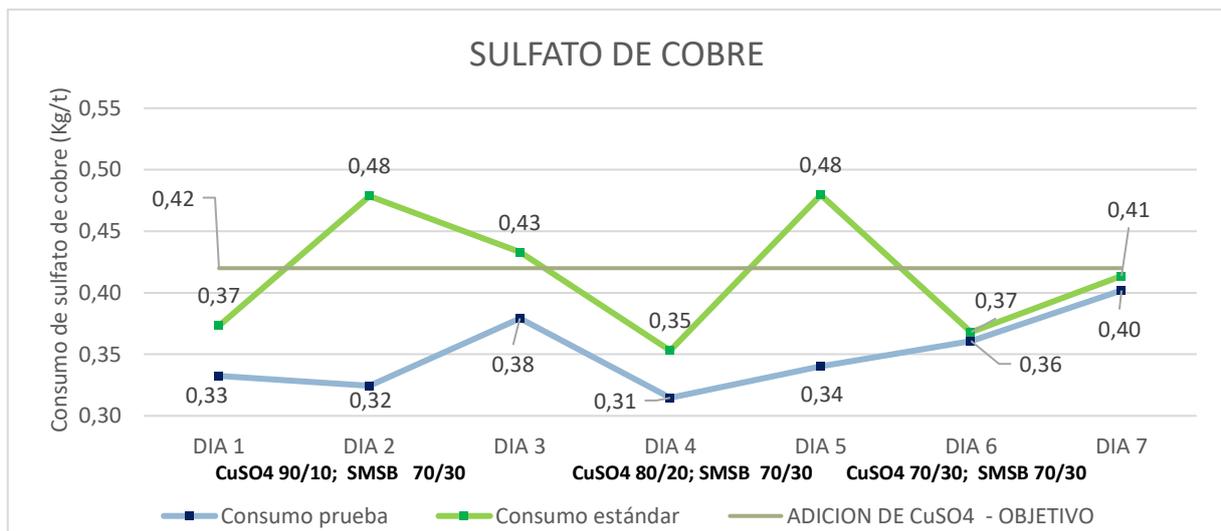
Con estos resultados se puede concluir que durante los días 1, 2, 3 y 4 la diferencia en el consumo de metabisulfito de sodio se reduce entre un 8 al 10%, esta comparación se realiza entre la prueba ON misma que se lleva a cabo durante el turno día y la operación normal en el turno noche (prueba OFF), esto nos indica que la

dosificación de estos días beneficia en mayor proporción al objetivo de reducir el consumo del reactivo.

### (b) Resultados de consumo de sulfato de cobre

Respecto al consumo de sulfato de cobre (figura 3.2), se observa una situación muy similar a la del metabisulfito de sodio, ya que se genera mayor diferencia de consumos en los días 1, 2 y 3, donde la dosificación se mantuvo en:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.



**Figura 3.2. Consumo de sulfato de cobre prueba ON/OFF**

La comparación de consumo se realiza entre la prueba en modo ON, misma que se realiza durante el turno de día y la prueba modo OFF ejecutada en el turno de noche, por ejemplo, en el día 2 se observa que durante la prueba ON se consume 0.32 Kg/t y durante la prueba OFF se consumen 0.48 Kg/t, la diferencia de consumo es de 0.16 Kg/t, lo que representa el 33.33% de reducción en el consumo.

Así mismo en los días 6 y 7 se muestra un consumo casi igual, en estos días la dosificación se mantuvo en:

- Sulfato de cobre con el 70% en el tanque acondicionador y 30% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

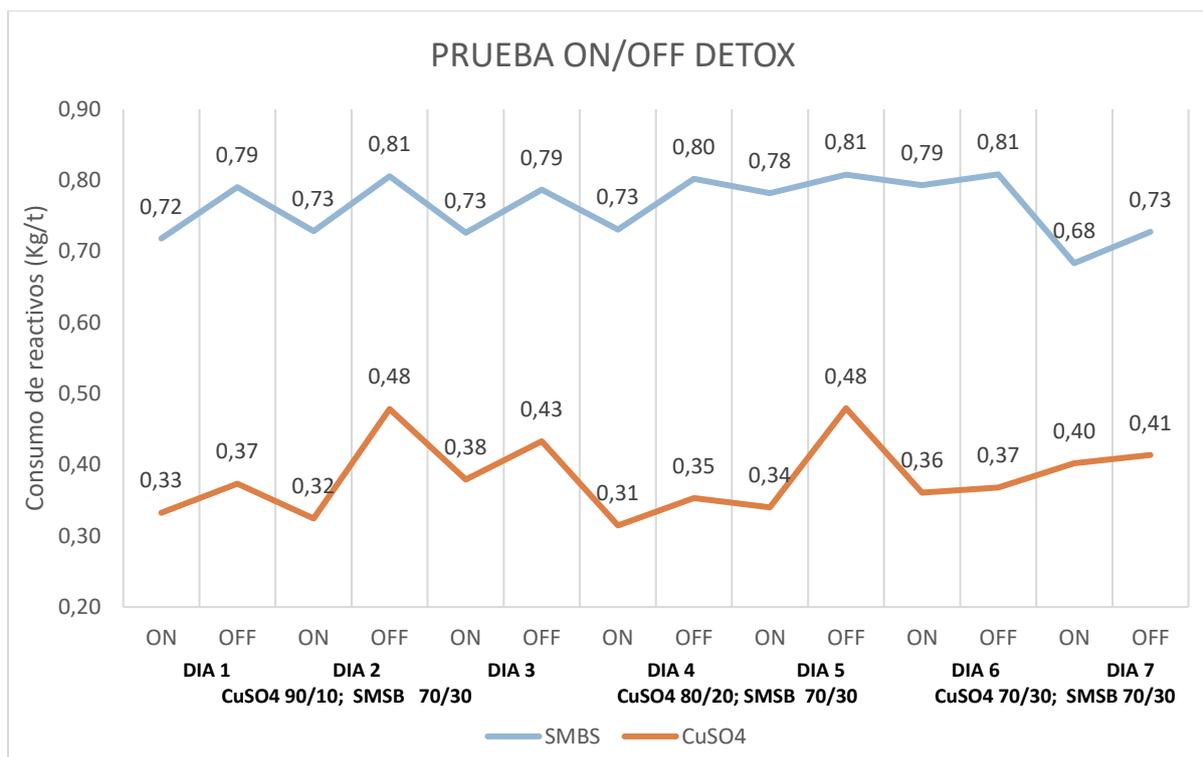
De la misma manera, la comparación se realizó entre la prueba ON donde en el día 6 se consume 0.36 Kg/t y la prueba OFF con consumo de 0.37 Kg/t, la diferencia de consumo es de 0.01 Kg/t lo que representa el 2.70%, valor que no es significativo.

Con estos resultados se puede concluir que durante los días 1, 2 y 3 la diferencia en el consumo de sulfato de cobre se reduce entre un 10 y 37%, esta comparación se realiza entre la prueba ON turno día y operación normal OFF en turno de noche. Esto indica que la dosificación de estos días beneficia en mayor proporción al objetivo de reducir el consumo del reactivo.

Cabe recalcar que la dosificación del metabisulfito de sodio está relacionada con la dosificación del sulfato de cobre, ya que en la reacción este último actúa como catalizador y acondicionador para la correcta destrucción del cianuro.

### **3.1.2 Resultados de consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre durante las pruebas ON/OFF**

A continuación, en la figura 3.3., se muestra una gráfica donde se observa con mayor detalle los resultados de cada etapa y la comparación del consumo con la prueba ON, misma que se realiza durante el turno día y la prueba OFF, que se lleva a cabo en el turno noche.



**Figura 3.3. Comparación de consumo durante prueba ON y operación normal (OFF)**

Se observa que durante los días 1, 2 y 3 donde se mantiene la dosificación de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Los resultados se muestran más favorecedores para la reducción del consumo tanto para el sulfato de cobre como para el metabisulfito de sodio, siendo dependiente el uno del otro, es decir que, si uno reduce, el otro reactivo también lo hace.

### 3.1.3 Resultados de la destrucción de cianuro WAD respecto al consumo de reactivos

En los resultados que se muestran en la figura 3.4., se observa en las columnas color naranja la concentración de cianuro WAD en CIL 6, es decir, al ingreso del circuito DETOX, se recuerda que el proceso de destrucción de cianuro se encuentra a la salida del circuito CIL, entonces la concentración de cianuro que se tenga a la salida del tanque CIL 6 es la concentración que deberá destruir el proceso DETOX.

En las columnas verdes se presentan los valores de cianuro WAD presentes en el tanque DETOX 1, las columnas color marrón muestran los valores de cianuro WAD presentes en el tanque DETOX 2 y por ultimo las columnas rojas se muestran los valores de cianuro WAD presentes en la salida de los relaves (TSF).

De igual manera, en las líneas se muestran los consumos de reactivos durante las pruebas modo ON y modo OFF, estas líneas son las mismas que se mostró anteriormente en la figura 3.3.

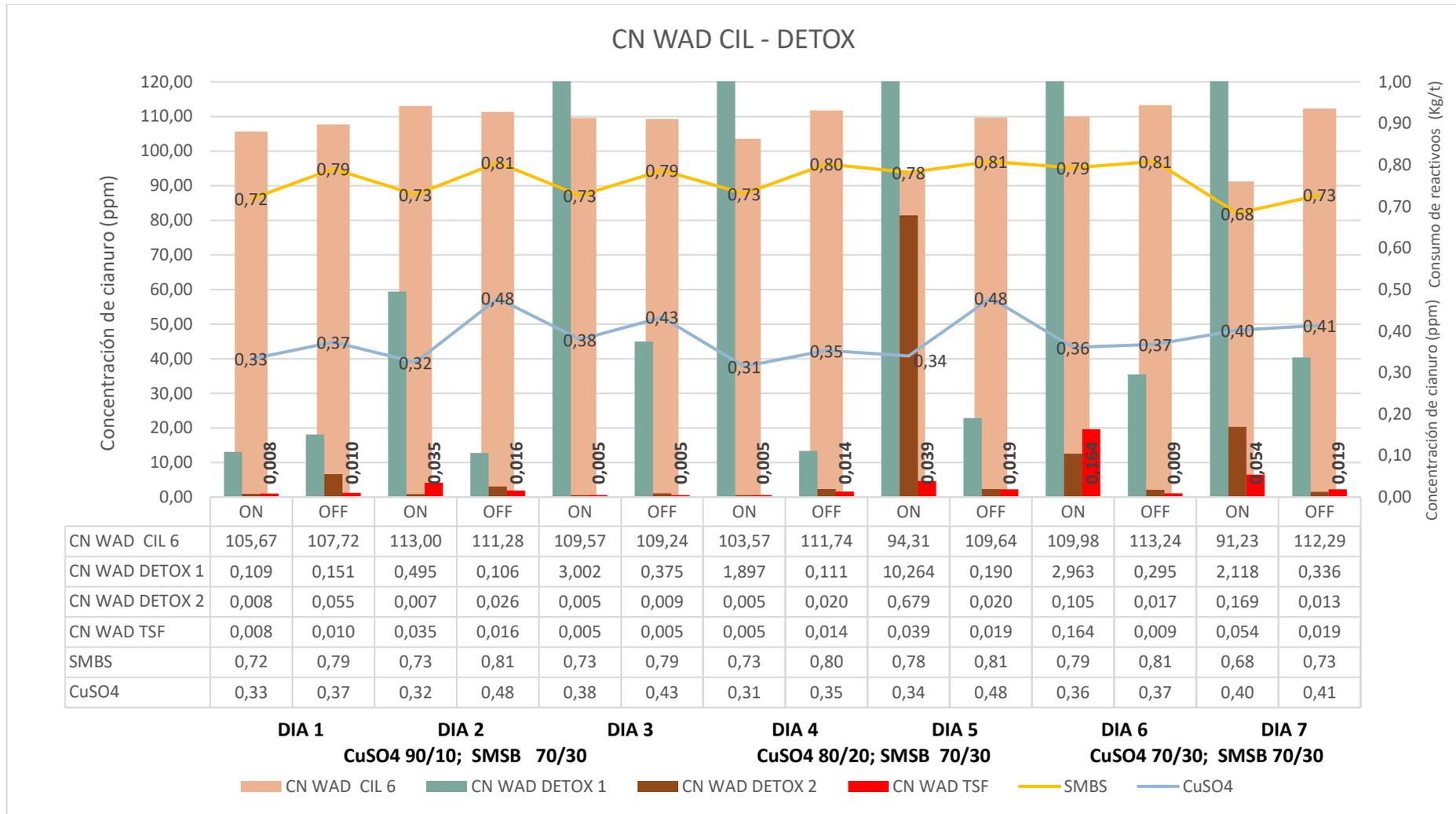
En la figura 3.4., se puede observar que el consumo de reactivos en general es menor durante la prueba (ON), y mucho menor durante los días 1, 2 y 3 de dicha prueba. Así por ejemplo se observa en el día 3 durante la prueba modo ON con la dosificación de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

La alimentación procedente del CIL 6 ingresa al circuito DETOX con 109.6 ppm de cianuro, en el tanque DETOX 1 se llega a 3.002 ppm de cianuro WAD, en tanque DETOX 2 se completa la reacción y llega a 0.005 ppm de cianuro, y por último en la salida a los relaves (TSF) se envían con  $< 0.005$  ppm de cianuro WAD. Estos resultados se logran con consumos de 0.73 Kg/t de metabisulfito de sodio y 0.38 Kg/t de sulfato de cobre.

Mientras que, en el día 3 durante la prueba OFF, es decir, la operación normal, la alimentación que ingresa el circuito DETOX con la misma cantidad de cianuro 109.24 ppm, en el tanque DETOX 1 llegan 0.375 ppm de cianuro WAD, en tanque DETOX 2 se completa la reacción y llega a 0.009 ppm de cianuro y por último en la salida a los relaves (TSF) se envían con 0.005 ppm de cianuro WAD. Estos resultados consumieron un total de 0.79 Kg/t de metabisulfito de sodio y 0.43 Kg/t de sulfato de cobre.

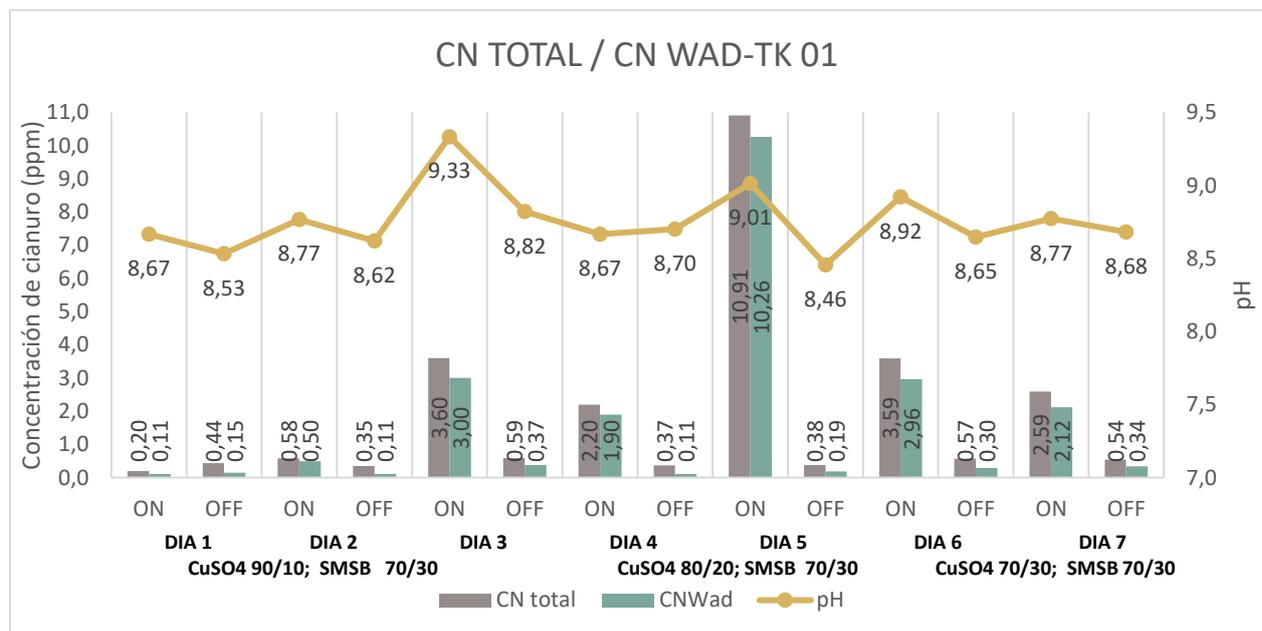
Con estos resultados se puede observar que se cumple el objetivo de disminuir el consumo de los reactivos, destruyendo correctamente el cianuro y cumpliendo con los estándares de la normativa vigente.



**Figura 3.4. Destrucción de cianuro WAD respecto del consumo de reactivos**

### 3.1.4 Resultados de la destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 1.

En la figura 3.5., se muestra el efecto del pH con respecto a la destrucción del cianuro en el tanque DETOX 1, en general durante la prueba en modo ON y modo OFF se observa que mientras que los valores de pH se mantienen en entre 8.4 y 8.7, la destrucción de cianuro no se ve afectada, pero esto si ocurre cuando los valores de pH se elevan a valores mayores a 9, por tanto, se debe controlar de mejor manera el pH en el tanque DETOX 1 evitando que la reacción se interrumpa en esta primera etapa del proceso.



**Figura 3.5. Destrucción de cianuro total y WAD con relación al pH del proceso**

En el día 3 durante la prueba en modo ON se observa la elevación del pH a 9.33 lo que afecta la correcta destrucción del cianuro, siendo el cianuro WAD de 3 ppm. En este día se mantuvo la dosificación de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el taque DETOX 2.

Cosa que no ocurre en el día 5 por ejemplo, donde se eleva el pH a 9.01 y el cianuro WAD es de 10.26 ppm, la dosificación en este día se mantuvo en:

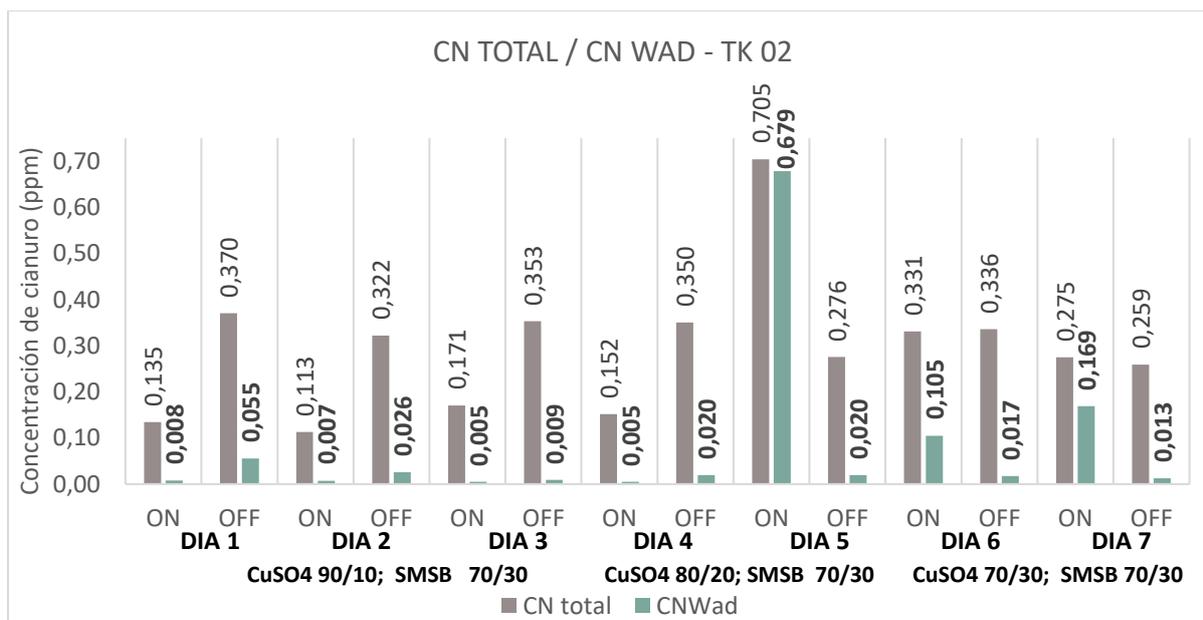
- Sulfato de cobre con el 80% en el tanque acondicionador y 20% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Por lo que se podría decir que la dosificación que resiste cambios bruscos de pH es la dosificación que se mantuvo durante los días 1, 2 y 3, es decir, la dosis correspondiente:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

### **3.1.5 Resultados de la destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 2.**

En la figura 3.6., se muestran las curvas correspondientes a la concentración de cianuro total y WAD en el tanque DETOX 2, donde, en general se observa que la destrucción del cianuro total y cianuro WAD se completa durante la prueba en modo ON y en modo OFF.



**Figura 3.6. Destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 2**

Se continua con el análisis del día 3, conociendo que ocurrió una elevación en el pH a 9.33 en el tanque DETOX 1, se observa que durante la prueba en modo ON en el tanque DETOX 2 se logra la destrucción del cianuro hasta 0.005 ppm. Durante el día 3 en la prueba modo ON se mantiene la dosificación de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Sin embargo, en el día 5 donde el pH en el tanque DETOX 1 se elevó a 9.01 el cianuro WAD no se destruye completamente y llega a valores de 0.579 ppm, valores altos para la operación de la planta de beneficio. La dosificación en este día se mantuvo en:

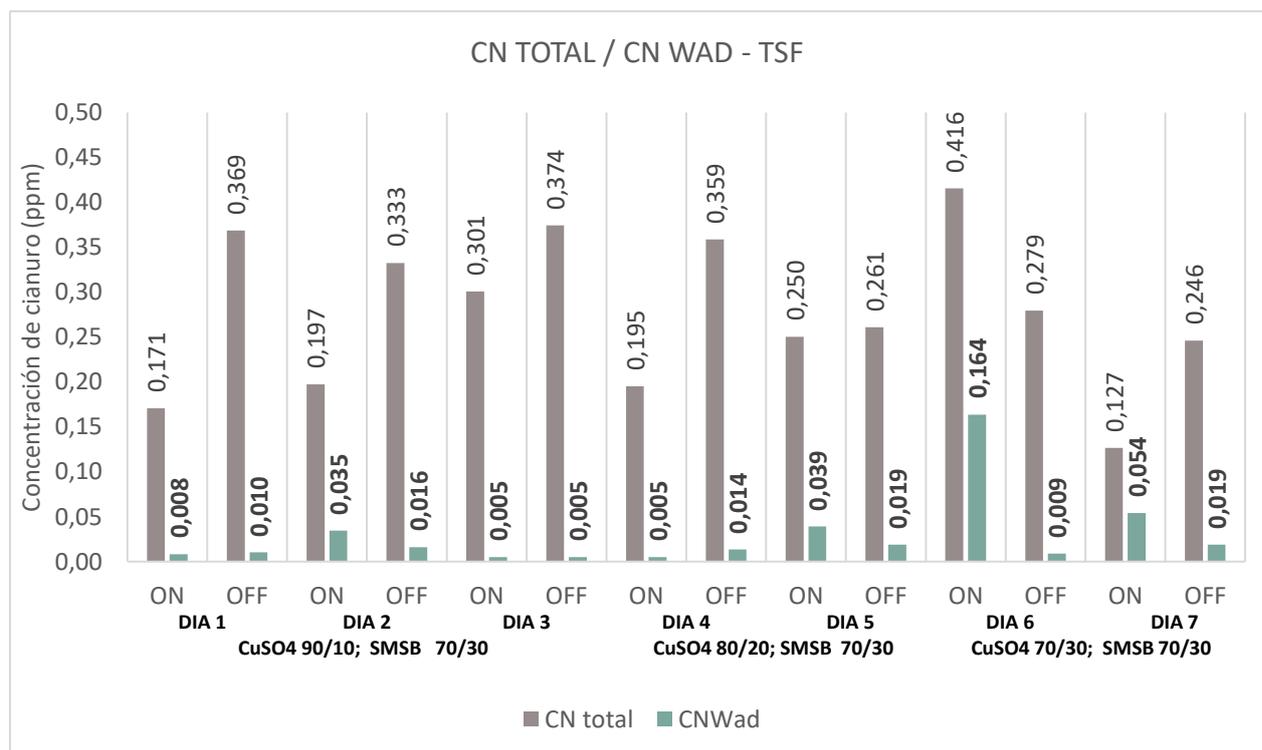
- Sulfato de cobre con el 80% en el tanque acondicionador y 20% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Por lo que se podría afirmar que la dosificación que resiste cambios bruscos de pH es la dosificación que se mantuvo durante los días 1, 2 y 3, es decir con la dosis de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

### 3.1.6 Resultados de destrucción de cianuro total y WAD en relaves (TSF).

Los valores de cianuro total y WAD se presentan en la figura 3.7., donde en general se observa que los valores de cianuro que se llevarán al tratamiento de relaves (TSF) se encuentran por debajo de la norma y cumple con los parámetros ambientales establecidos.



**Figura 3.7. Cianuro total y WAD presente en la descarga de relaves TSF**

Los efectos del pH que se observaron en el día 3 con la siguiente dosis de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

No tuvieron mayor impacto en el envío a TSF, ya que los valores se mantienen por debajo de los límites permisibles, cumpliendo la normativa nacional e internacional

Sin embargo, los efectos del pH durante el día 5 con dosis de:

- Sulfato de cobre con el 80% en el tanque acondicionador y 20% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Se observa en el día 6, que el flujo enviado al tratamiento de relaves tiene una concentración de 0.164 ppm de cianuro WAD y 0.416 ppm de cianuro total, valores que están por debajo de los límites permisibles, que era de 1.0 ppm para cianuro total, 0.1 ppm para cianuro libre y 0.5 ppm para cianuro WAD.

### **3.1.7 Resultado de generación de sulfatos y sólidos totales en DETOX**

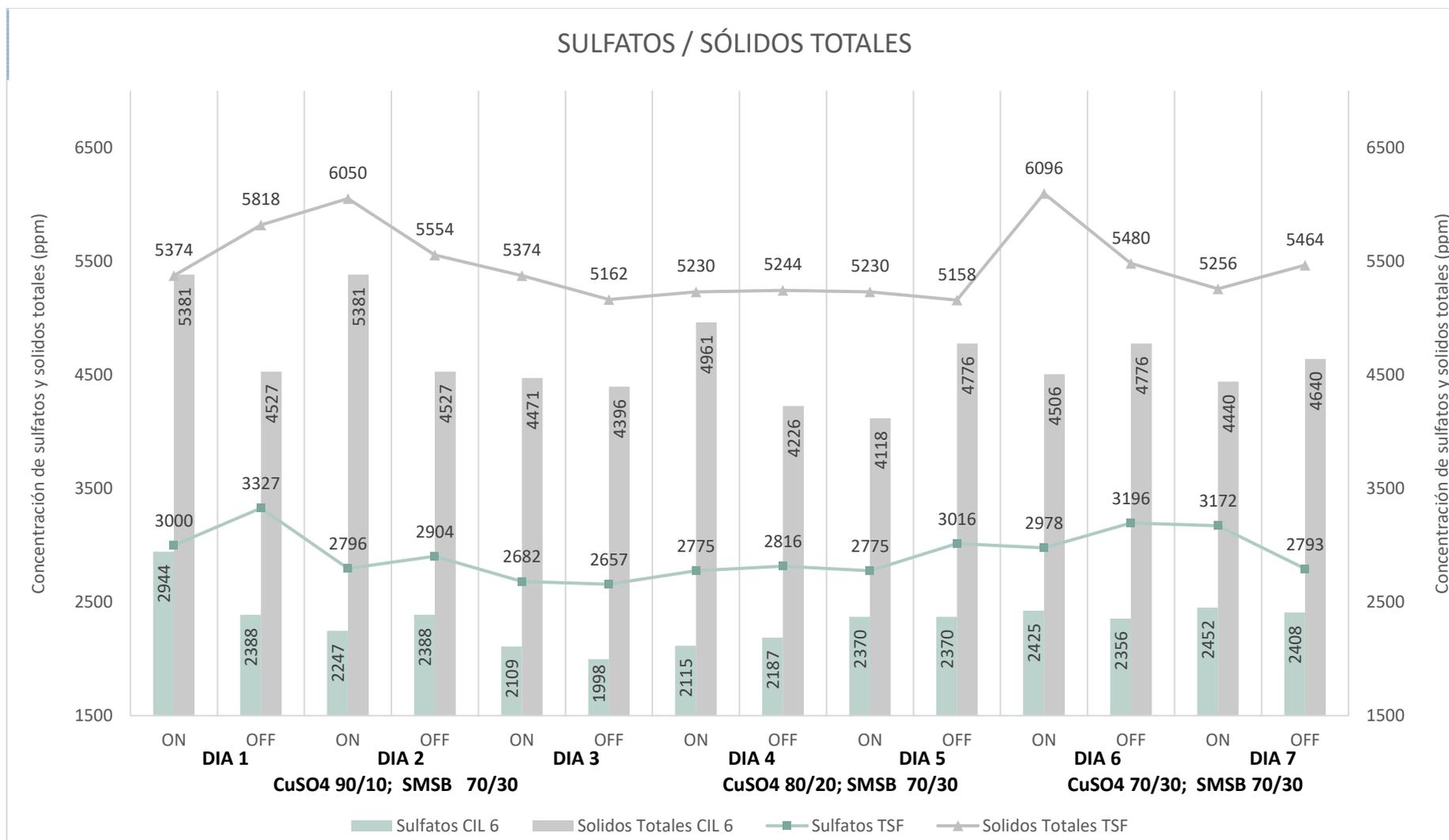
Se observa en la figura 3.8. la tendencia en la generación de sulfatos y sólidos totales, antes y después de la adición del metabisulfito de sodio y sulfato de cobre, misma que en general es baja durante toda la prueba industrial (modo ON), especialmente los días 1, 2 y 3 con la dosificación de reactivos distribuido de la siguiente manera:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Estos resultados muestran que el uso de los reactivos, además de aminorar el gasto, aporta a una menor cantidad de sulfatos y sólidos totales al efluente que es movilizado hacia el tratamiento de relaves (TSF).

Para terminar con esta primera experiencia de pruebas industriales con esta metodología, se puede concluir que, en general se logra la destrucción del cianuro libre, total y WAD con la disminución de reactivos que se plantea, aun así, la dosificación que resiste cambios bruscos de pH y aporta significativamente con la reducción del consumo de reactivos es la dosificación que se usó en los días 1, 2 y 3 de la prueba en modo ON, es decir:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2



**Figura 3.8. Sulfatos y sólidos totales antes y después de la adición de reactivos**

### 3.2 Resultados réplica pruebas DETOX

Se plantea la réplica de las pruebas DETOX con la mejor dosificación que se obtuvo durante la primera prueba en modo ON/OFF, es decir la dosis de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

#### 3.2.1 Resultados del consumo del metabisulfito de sodio y sulfato de cobre

##### (a) Resultados del consumo del metabisulfito de sodio

En la figura 3.9. se muestra la gráfica del consumo de metabisulfito de sodio, el objetivo de gasto para este reactivo fue de 0.70 Kg/t, valor que durante la prueba se reduce incluso hasta 0.52 Kg/t, aun así, más adelante se evaluará si esto ayuda o afecta en la destrucción del cianuro.

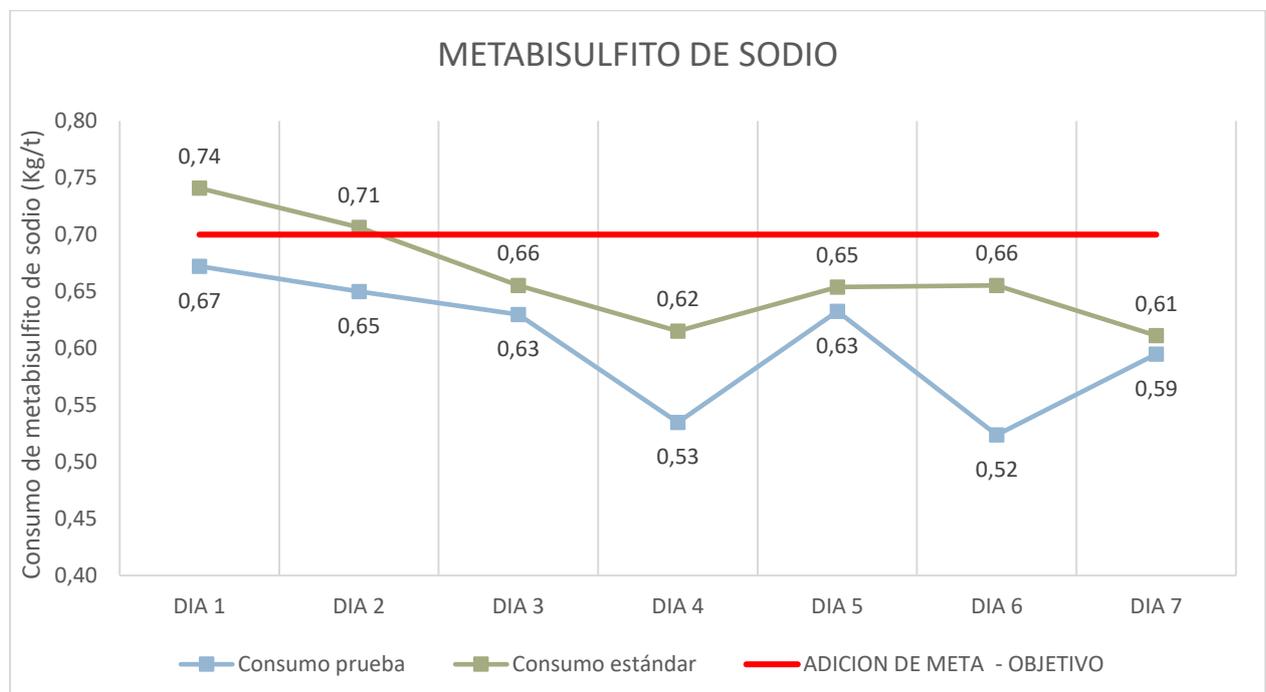


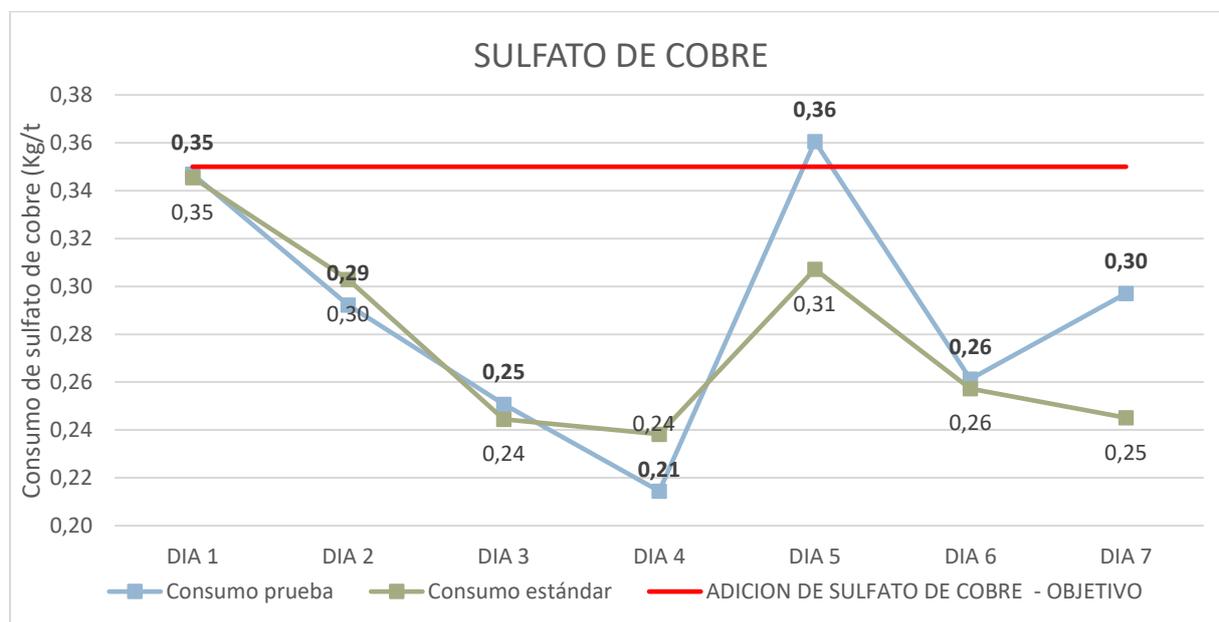
Figura 3.9. Consumo de metabisulfito de sodio prueba ON/OFF - Replica

Si realizamos la misma comparación entre la prueba modo ON y modo OFF, del día 1 por ejemplo, se observa que durante la prueba se gastan 0.67 Kg/t y sin la prueba se gastan 0.74 Kg/t, la diferencia de consumo es de 0.07 Kg/t que representa el 9.5% de reducción de consumo.

Si sumamos el total de reducción en el consumo de la primera prueba con esta réplica, llegamos a un rango total del 25 al 34%, esto favorece el objetivo de la reducción del consumo de este reactivo.

### (b) Resultados de consumo de sulfato de cobre

En las curvas mostradas en la figura 3.10., se observa el consumo de sulfato de cobre durante la réplica, tomando en cuenta el nuevo objetivo de gasto que es de 0.35 Kg/t, en general la prueba tanto modo ON como modo OFF cumplen con el objetivo de reducción de este reactivo incluso llega hasta 0.21 Kg/t, de igual manera más adelante se observará si esto aportó o no a la destrucción del cianuro.



**Figura 3.10. Consumo de sulfato de cobre prueba ON/OFF - Replica**

Si analizamos el día 1 de esta prueba, la diferencia en el consumo durante la prueba modo ON y modo OFF es 0 Kg/t, ya que el consumo es el mismo, entonces si se

realiza el mismo ejercicio del metabisulfito de sodio y sumamos el total de reducción en el consumo de la primera prueba con esta réplica, llegamos a un rango total del 37 al 48%, esto favorece el objetivo de la reducción del consumo de este reactivo.

Aun así, se puede analizar que las variables, registros de consumos tanto durante la prueba modo ON y modo OFF se pueden deber a problemas operativos de las bombas neumáticas (taponamiento de filtros), de igual manera esto puede resultar en una destrucción más lenta del cianuro, efecto que lo podemos observar en las curvas de cianuro en la figura 3.12.

### 3.2.2 Resultados de consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre durante las pruebas ON/OFF

A continuación, en la figura 3.11., se muestra una gráfica comparativa donde se observa con mayor detalle los resultados de cada etapa y la comparación del consumo con la prueba ON, misma que se realiza durante el turno día y la prueba OFF, que se lleva a cabo en el turno noche.

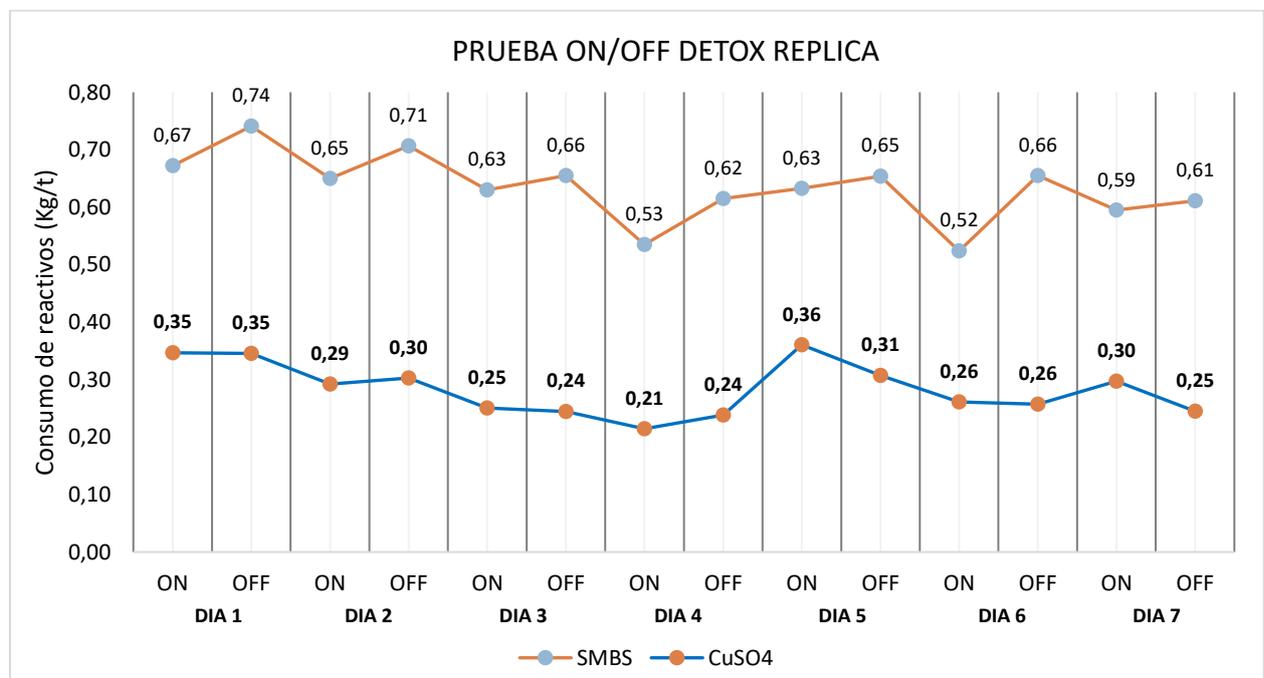


Figura 3.11. Comparación de consumo prueba (ON) y prueba (OFF)

La variación en el consumo tanto del metabisulfito de sodio como del sulfato de cobre se ve reflejada levemente, aun así, durante la prueba modo ON, en la mayoría de los casos se observa disminución del consumo con respecto a la prueba modo OFF, recordar que estas pruebas se realizan a una sola dosificación de reactivos, misma que es de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2

### **3.2.3 Resultados de la destrucción de cianuro WAD respecto del consumo de reactivos**

En la figura 3.12., al igual que en la figura 3.4., se observa en las columnas color naranja la concentración de cianuro WAD en CIL 6, es decir, al ingreso del circuito DETOX, recordar que el proceso de destrucción de cianuro se encuentra a la salida del circuito CIL, entonces la concentración de cianuro que se tenga a la salida del tanque CIL 6 es la concentración que deberá destruir el proceso DETOX.

En las columnas verdes se presentan los valores de cianuro WAD presentes en el tanque DETOX 1, las columnas cafés muestran los valores de cianuro WAD presentes en el tanque DETOX 2 y por ultimo las columnas rojas se muestran los valores de cianuro WAD presentes en la salida de los relaves (TSF).

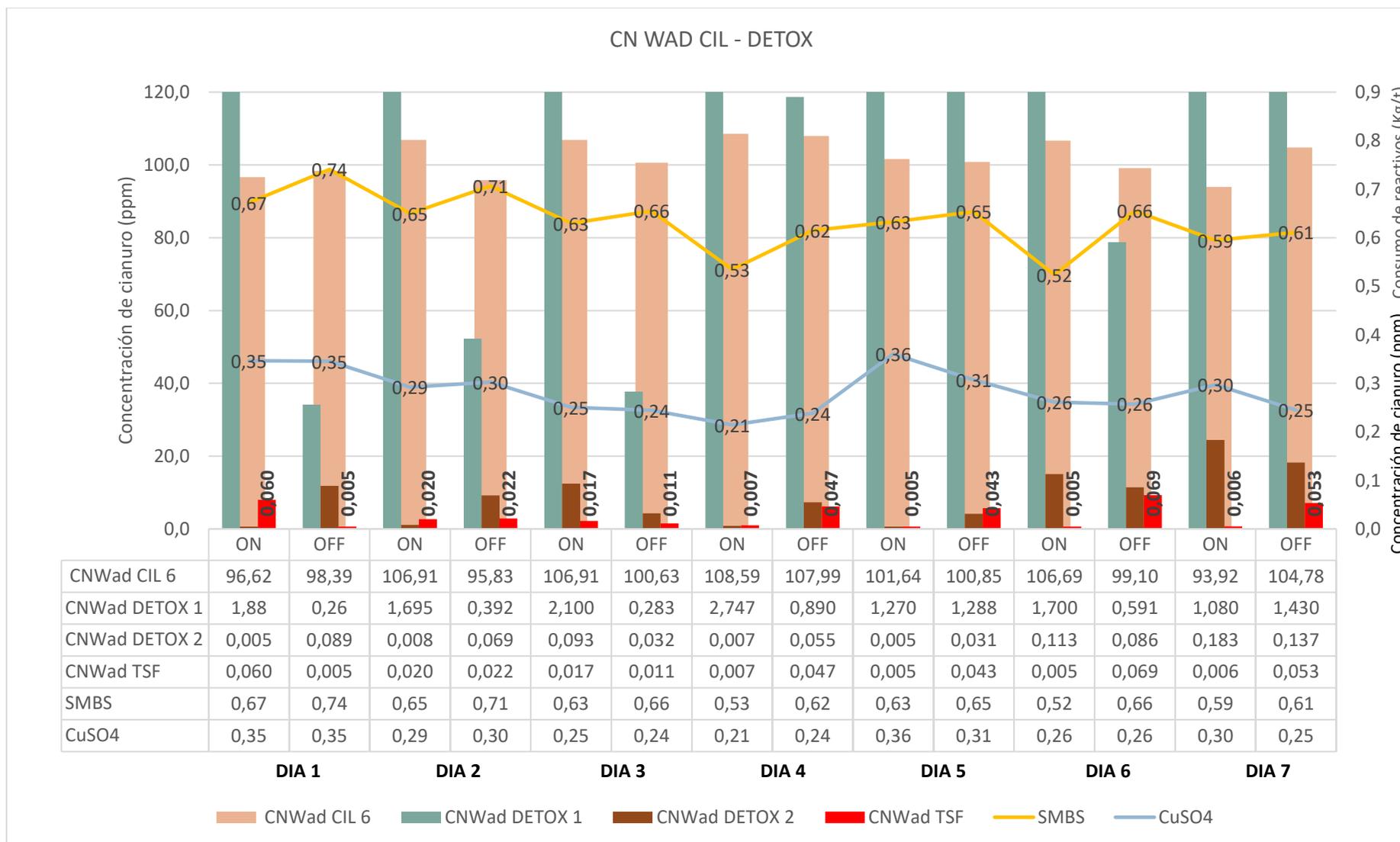
De igual manera en las líneas se muestran los consumos de reactivos durante las pruebas modo ON y modo OFF, estas líneas son las mismas que se mostró anteriormente en la figura 3.11.

En la gráfica 3.12., se puede observar que el consumo de reactivos en general continúa siendo menor durante la prueba en modo ON que en modo OFF, si analizamos el día 7 de la prueba, nos encontramos con que durante la prueba ON, ingresa el circuito DETOX 93.92 ppm de cianuro, en el tanque DETOX 1 llegan 1.08 ppm de cianuro WAD, en tanque DETOX 2 se completa la reacción y llega a 0.183 ppm de cianuro y por último en la salida a los relaves (TSF) se envían con 0.006 ppm

de cianuro WAD, estos resultados se logran con consumos de 0.59 Kg/t de metabisulfito de sodio y 0.30 Kg/t de sulfato de cobre.

Mientras que durante el mismo día 3 durante la prueba OFF, es decir, la operación normal, ingresa el circuito DETOX 104.78 ppm de cianuro, en el tanque DETOX 1 llegan 1.43 ppm de cianuro WAD, en tanque DETOX 2 se completa la reacción y llega a 0.137 ppm de cianuro y por último en la salida a los relaves (TSF) se envían con 0.053 ppm de cianuro WAD, estos resultados consumieron un total de 0.61 Kg/t de metabisulfito de sodio y 0.25 Kg/t de sulfato de cobre.

Analizando la gráfica globalmente, se observa la destrucción del cianuro WAD con respecto al consumo de metabisulfito de sodio y sulfato de cobre, igualmente el efecto de la destrucción del cianuro cuando la dosificación de sulfato de cobre es muy baja, en el día 4 se observa que el consumo de sulfato de cobre es de 0.21 y 0.24 Kg/t, y el cianuro WAD al final de la destrucción, es decir en el envío al tratamiento de relaves (TSF) se eleva a 0.047 ppm, el mismo caso ocurre con los días 5, 6 y 7 durante la prueba modo OFF (operación normal), en estos días la dosificación de sulfato de cobre es menor a la prueba modo ON, por tanto representa menor gasto, pero así mismo un valor de cianuro WAD al final de proceso muy cercano al límite permitido.



**Figura 3.12. Destrucción de cianuro WAD respecto del consumo de reactivos**

### 3.2.4 Resultados de la destrucción de cianuro WAD en DETOX 1.

En la figura 3.5., se muestra el efecto del pH con respecto a la destrucción del cianuro WAD en el tanque DETOX 1, en general durante la prueba en modo ON y modo OFF se observa que mientras que los valores de pH se mantienen en entre 8.4 y 8.7, la destrucción de cianuro no se ve afectada, pero esto si ocurre cuando los valores de pH se elevan a valores mayores a 9, por tanto, se debe controlar de mejor manera el pH en el tanque DETOX 1 para evitar el que la reacción no se complete en esta primera etapa del proceso.

Esta ralentización de la reacción de destrucción del cianuro la podemos observar durante los días 3 y 4, donde el pH se eleva a 9.21 y 9.20 respectivamente, y en efecto se observa un pico elevado de cianuro WAD, sin embargo, más adelante se podría afirmar lo que se observó durante la primera prueba industrial durante los días 1, 2 y 3 donde la dosificación seguía siendo:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Con esta dosificación se había observado que resiste bastante bien a los cambios bruscos de pH en el tanque DETOX 1, y la reacción se podría completar efectivamente en el tanque DETOX 2.

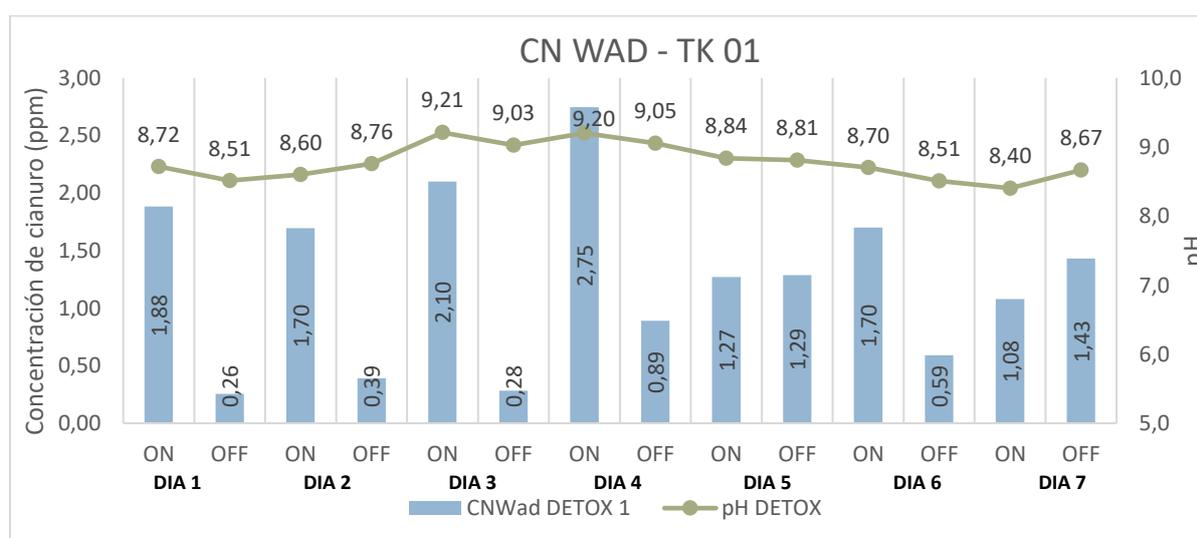
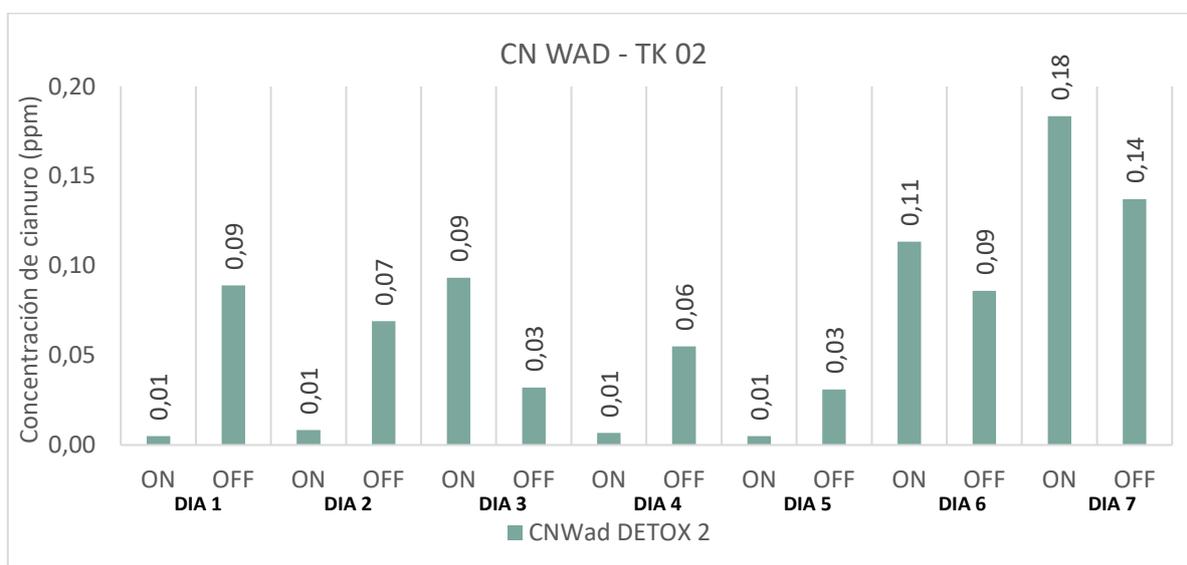


Figura 3.13. Destrucción de cianuro WAD en DETOX 1

### 3.2.5 Resultados de la destrucción de cianuro total y WAD en DETOX 2.

De la misma manera en el tanque 2 se muestra que la reacción se completa durante la prueba en modo ON, en el día 3 se observa una elevación en el cianuro, esto se debe al efecto del pH que se observó anteriormente, así mismo en los días 6 y 7 la reacción no se está completando en esta etapa, esto se debe a que la dosificación de sulfato de cobre es muy baja, como se lo había explicado anteriormente.

En la figura 3.14., se muestran las curvas correspondientes la concentración de cianuro WAD en el tanque DETOX 2, donde, en general se observa que la destrucción del cianuro total y cianuro WAD se completa durante la prueba en modo ON y en modo OFF.



**Figura 3.14. Destrucción de cianuro WAD en DETOX 2**

Si continuamos con el análisis de los días 3 y 4, conociendo que ocurrió una elevación en el pH a 9.21 y 9.20 respectivamente en el tanque DETOX 1 y que la dosificación de estos días se mantuvo en:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Se observa que durante la prueba en modo ON en el tanque DETOX 2 se logra la destrucción del cianuro hasta 0.09 ppm y 0.01 ppm respectivamente.

Con estos resultados se puede afirmar que la dosificación con la que se trabaja durante esta réplica es resistente a cambios bruscos de pH y además aporta a la disminución del gasto del metabisulfito de sodio y sulfato de cobre usados en el proceso de destrucción de cianuro de la planta de beneficio estudiada.

### 3.2.6 Resultados de destrucción de cianuro total y WAD en relaves (TSF).

Se evalúa la destrucción de cianuro en la descarga al TSF, donde se observa que la reacción se completa y los valores de cianuro total y WAD se encuentran por debajo de los límites permisibles, aun así, en los días 4, 5, 6 y 7 se observan valores muy cercanos a los límites permisibles, esto se debe a la poca dosificación de sulfato de cobre en el proceso, como se lo había explicado anteriormente.

Los valores de cianuro total y WAD que se llevarán al tratamiento de relaves (TSF), se presentan en la figura 3.15., donde en general se observa que estos se encuentran por debajo de la norma y cumple con los parámetros ambientales establecidos.

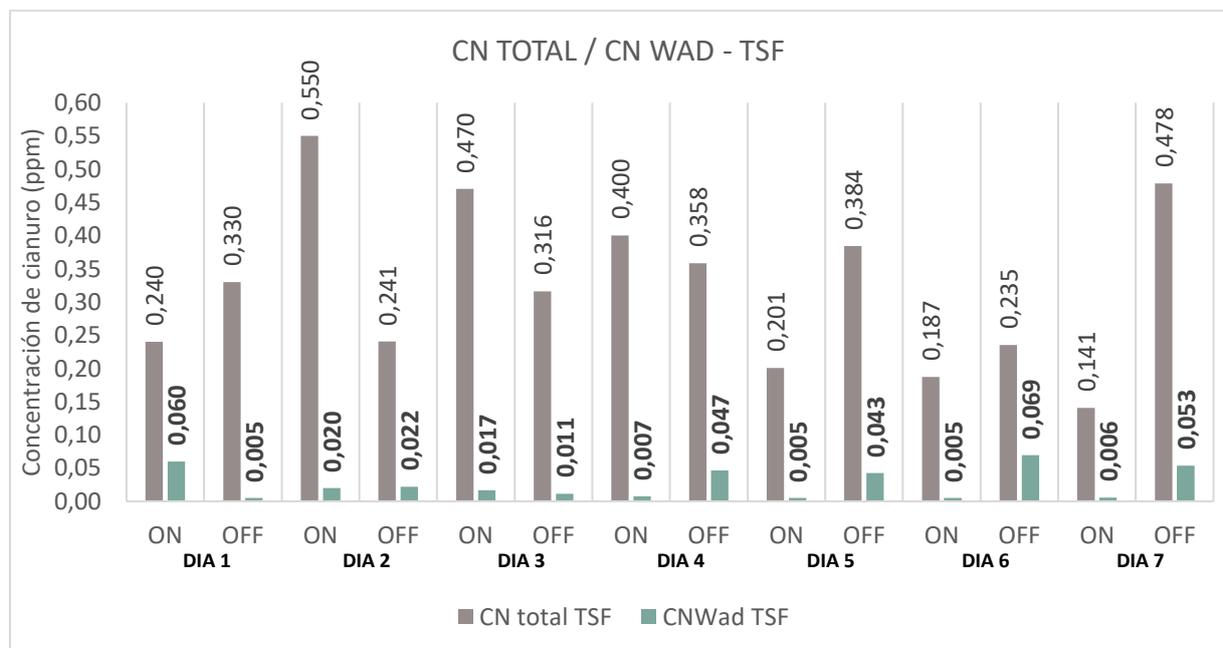


Figura 3.15. Cianuro total y WAD presente en la descarga de relaves TSF

Los efectos del pH que se observaron en los días 3 y 4 no impactaron negativamente en la reacción para la destrucción de cianuro, esto se refleja en los valores de la descarga a TSF.

Se observan en el día 3, por ejemplo, se ha enviado al tratamiento de relaves una concentración de 0.017 ppm de cianuro WAD y 0.47 ppm de cianuro total, valores por debajo de los límites permisibles, que era de 1ppm para cianuro total, 0.1 ppm para cianuro libre y 0.5 ppm para cianuro WAD.

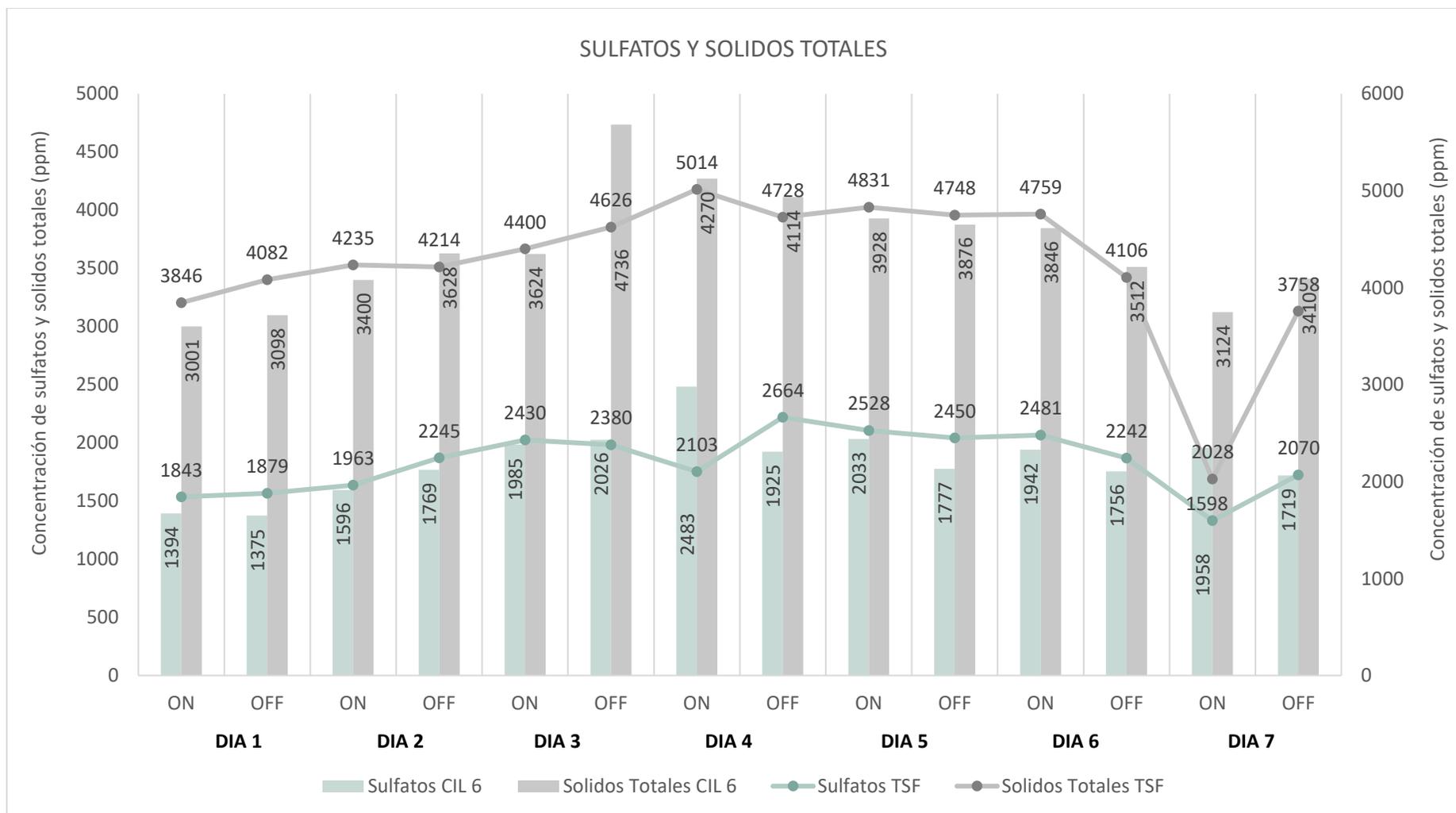
### **3.2.7 Resultado de generación de sulfatos y sólidos totales en DETOX**

En cuanto a los niveles de sulfatos y sólidos totales, la figura 3.16 muestra que se genera menor cantidad de sulfatos y sólidos totales durante la prueba (ON) que en el método estándar (OFF).

Se observa en la figura 3.16., la tendencia en la generación de sulfatos y sólidos totales, antes y después de la adición del metabisulfito de sodio y sulfato de cobre, misma que en general, es menor durante la prueba en modo ON manteniendo la dosificación de reactivos en:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Esto afirma lo expuesto durante la primera prueba, que el cambio en la dosificación de los reactivos aporta grandes ventajas ambientales, ya que además de disminuir el gasto del metabisulfito de sodio y el sulfato de cobre, y enviar muy bajos contenidos de cianuro hacia el tratamiento de relaves (TSF), la cantidad de sulfatos y sólidos totales generados en el proceso son muy alentadores y afirman el compromiso ambiental de la planta de beneficio.



**Figura 3.16. Sulfatos y sólidos totales antes y después de la adición de reactivos**

Para finalizar durante la réplica de pruebas industriales con esta metodología, se puede concluir que, efectivamente se logra la destrucción del cianuro libre, WAD y total con la disminución de reactivos que se plantea, de igual forma se pudo confirmar que la dosificación de:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2,
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Resiste cambios bruscos de pH y aporta significativamente en la reducción del consumo de reactivos.

# CAPITULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Durante este estudio, se reconocieron que las variables actuales que afectan a las condiciones de operación del proceso de destrucción de cianuro DETOX en la planta de beneficio son: el pH, la adición de los reactivos metabisulfito de sodio y sulfato de cobre, el no aprovechamiento de la reacción en el tiempo de residencia y el tonelaje que ingresa a la planta. Para ello, se plantea el plan de pruebas industriales en modo ON/OFF, donde se establecen 7 días de pruebas cambiando el modo de dosificación de reactivos en el proceso DETOX, siendo de esta manera:

- Adición de Sulfato de cobre con gasto de 0.42 Kg/t
  - 90 % en tanque acondicionador y 10 % en tanque DETOX 2.
  - 80 % en tanque acondicionador y 20 % en tanque DETOX 2.
  - 70 % en tanque acondicionador y 30 % en tanque DETOX 2
- Adición de Metabisulfito de sodio con gasto de 0.80 Kg/t: 70% en tanque DETOX 1 y 30 % en tanque DETOX 2.

Además, se realizó una réplica con el mejor resultado de la primera prueba, siendo esta:

- Adición de Sulfato de cobre con gasto de 0.35 Kg/t: 90 % en tanque acondicionador y 10 % en tanque DETOX 2.
- Adición de Metabisulfito de sodio con gasto de 0.70 Kg/t: 70% en tanque DETOX 1 y 30 % en tanque DETOX 2.

Se plantean pruebas industriales durante 7 días, la dosificación del 70 % de metabisulfito de sodio al tanque DETOX 1 y el 30% al tanque DETOX 2, el sulfato de cobre se distribuyó desde el 90%, 80% y 70% en el tanque acondicionador y en tanque DETOX 2 desde 10%, 20% y 30%. En primera instancia se comprobó una reducción del 8 al 25% del consumo de metabisulfito de sodio y del 10 al 37% en el consumo de sulfato de cobre, objetivo que se logró durante la primera prueba con la siguiente dosificación:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2,

- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2

Se realizó una réplica con esta dosificación durante 7 días y los resultados afirmaron que la destrucción de cianuro se ve favorecida con esta dosificación, además es resistente a elevaciones de pH y aporta menor cantidad de sulfatos y sólidos totales al tratamiento de relaves TSF. Adicionalmente durante la réplica se logró obtener la disminución del consumo de reactivos. Es así como, en total se logra una reducción entre el 25 y el 34% en el metabisulfito de sodio y del 37 al 48% en el sulfato de cobre. Con este análisis se puede concluir que la optimización de reactivos logra unos resultados significativos. La dosificación óptima que aporta una correcta destrucción del cianuro es:

- Sulfato de cobre con el 90% en el tanque acondicionador y 10% en el tanque DETOX 2.
- Metabisulfito de sodio con el 70% en el tanque DETOX 1 y el 30% en el tanque DETOX 2.

Esta manera de dosificar el metabisulfito de sodio y sulfato de cobre en el proceso de destrucción de cianuro mantiene la calidad de la destrucción y disminuye de manera sustancial el gasto de los reactivos usados en el proceso, representando una mejora muy importante tanto ambiental como económicamente en la planta de beneficio.

## **4.2 Recomendaciones**

Tras el estudio experimental realizado en la instalación se han llegado a unas conclusiones, anteriormente descritas que permiten conocer y optimizar el proceso de destrucción del cianuro, y de las cuales se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Controlar de mejor forma el pH en el circuito de lixiviación con carbón (CIL), verificando el correcto funcionamiento de los pH-metros estacionarios, el tiempo de respuesta entre la dosificación de cal y el rango de pH, la concentración de la lechada de cal, el estado de válvulas tanto manuales y

automáticas, evitando de esta forma generar variaciones que puedan desestabilizar al circuito DETOX.

- Evitar realizar cambios bruscos de forma independiente en la dosificación de reactivos (metabisulfito de sodio, sulfato de cobre) debido a que desestabiliza el sistema interrumpiendo la reacción química, provocando picos de cianuro WAD y generando al final un mayor consumo hasta normalizar el sistema.
- Repotenciar la línea de agua de dilución del tanque DETOX 1, de igual forma instalar flujómetro y válvula automática, de esta forma se tendrá un mejor control del porcentaje de sólidos que ingresa al sistema.
- Instalar línea de agua de dilución al tanque DETOX 2, con flujómetro y válvula automática, aminorando más el porcentaje sólidos, favoreciendo la reacción química.
- En el área de CIL, en el equipo de análisis químico en línea Cynoprobe, reubicar la sonda canal B instalado en el CIL 6 al tanque acondicionador DETOX, obteniendo así una mejor lectura, disminuyendo las perturbaciones producidas por flujos adicionales y que no están contempladas en el cálculo de la dosificación de reactivos.
- Automatizar las bombas dosificadoras de sulfato de cobre corrigiendo la inestabilidad en la dosificación del reactivo al circuito.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez , E. B. (2019). *Escenarios futuros de la mega minería metálica en el Ecuador. El caso del proyecto Mirador*. Quito: Bachelor's thesis, PUCE-Quito.
- Ana C Gaviria, L. A. (2006). *Análisis de alternativas para la degradacion del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros nacionales, Municipio de Marmarto, Caldas*. Medellin - Colombia.
- Banco Central del Ecuador. (2018). Reporte de minería. *BCE*.
- Castillon, F. (2015). *Dosificación de cloro y peróxido de hidrogeno en el tratamiento de aguas cianuradas en minera Laytarume S.A.*
- Constitución de la República del Ecuador, 2. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Quito- Ecuador.
- Coorporacion Financiera Internacional (IFC). (2007). *Guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad*.
- ECYT-AR. (2012). Lixiviación con cianuro. *ECYT-AR*.
- Fernández Pérez, B. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianurio de aguas residuales de mina*. España: Universidad de Oviedo.
- Gómez, L. (2012). *Degradación de cianuros mediante oxidación. Proyecto Máster en química y desarrollo sostenible. Universidad de Oviedo*. Oviedo- España.
- Guerrero, J. (2005). Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. *El Ingeniero de minas*, 10(35), 22-25.
- Gutierrez, C. (2021). *Implementacion del método de destruccion de cianuro con oxidacion avanzada en el tratamiento de efluentes de la planta mienra Irlsa- Unidad Corihuarmi*. Huancayo- Perú.
- International Cyanide Management Institute. (2021). *El Código Internacional para el Manejo del Cianuro*. Washington: International Cyanide Management Institute.

- Logsdon, M., Hagelstein, K., & Mudder, T. (2001). *The Management of Cyanide in Gold Extraction*. Ottawa: The International Council on Metals and the Environment.
- Mamani, E. (2014). *Implementación de procesos de destrucción de cianuro de los efluentes de la minería artesanal en la Rinconada-Puno*. Arequipa - Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2013). *Acuerdo Ministerial 003*. Quito, Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial 099, Instructivo para el registro de sustancias químicas peligrosas*.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial 099; Instructivo para el registro de sustancias químicas peligrosas*. Quito, Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial No.097A- Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua*. Quito- Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2020). *Linea Base Nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador*. MATEE.
- ONUDI, O. d. (2020). Linea de base nacional para la minería artesanal y en pequeña escala de oro en el Ecuador, conforme la concencion de minamata sobre mercurio.
- Ordoñez, D. (2012). El comercio exterior del ecuador: análisis del intercambio de bienes desde la colonia hasta la actualidad. *Eumed*. Obtenido de <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2012/>
- Oviedo, R., Moina, E., Naranjo, J., & Barcos, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2(4), 437-441. doi:10.21931/RB/2017.02.04.5
- Perez, B. F. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cinauro de aguas residuales de mina*.
- Pizzorni, B. (2021). Uso responsable de cianuro en la pequeña minería de oro. *Iniciativa Suiza Oro Responsable 2021*.
- Rodriguez, S. (2016). *Estudio del consumo mensual de cianuro de sodio en la planta de beneficio Orenas S.A*. Machala: UTMACH.

Viveros, J. H. (2019). *Desarrollo del proceso de degradación de cianuro procedente de la lixiviación de plata a partir de oxidación con ozono - cloruro de sodio*. Mexico.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: Datos de alimentación a DETOX (descarga CIL 6)

Datos descarga CIL 6, pruebas ON/OFF del 15 al 23 de septiembre de 2023, esta tabla muestra el tonelaje tratado, porcentaje de sólidos, cianuro libre, cianuro WAD, pH, sulfatos y sólidos totales de la descarga del CIL 6, esta tabla muestra las características de la alimentación al circuito DETOX, esto nos ayuda a entender de mejor manera la destrucción del cianuro en el sistema.

ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)								
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga					
		ton/h	% Sólidos (dilución)	CN Libre CIL 6 ppm	CN Wad CIL 6 ppm	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6 ppm	Sólidos Totales CIL 6 ppm
15/09/2023	8:00:00 AM	220	30	110.7	110.7			
	11:00:00 AM	220	31	105.4	105.4			
	2:00:00 PM	220	33	109.6	109.6			
	5:00:00 PM	200	34	102.0	102.0			
	8:00:00 PM	220	35	100.3	100.3			
	11:00:00 PM	220	35.6	108.6	108.6			
	2:00:00 AM	200	36	110.4	110.4			
	4:00:00 AM	200	35.6	108.6	108.6			
	PRUEBA ON - 15/9/23	213.33	32.67	105.67	105.67	10.10	2944	5381
	PRUEBA OFF - 15/9/23	212.00	34.44	107.72	107.72	10.28	2388	4527

ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)								
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga					
		ton/h	% Sólidos (dilución)	CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6
				ppm	ppm		ppm	ppm
16/09/2023	8:00:00 AM	200	34.88	109.6	109.6			
	11:00:00 AM	200	33.91	113.8	113.8			
	2:00:00 PM	200	36.33	117.3	117.3			
	5:00:00 PM	200	36.78	107.9	107.9			
	8:00:00 PM	200	37.26	111.7	111.7			
	11:00:00 PM	170	37.5	112.7	112.7			
	2:00:00 AM	160	37.45	112.2	112.2			
	4:00:00 AM	170	36.07	110.2	110.2			
	PRUEBA ON - 16/9/23	200.00	35.67	113.00	113.00	10.73	2247	5381
	PRUEBA OFF - 16/9/23	180.00	36.63	111.28	111.28	10.28	2388	4527
17/09/2023	8:00:00 AM	180	37	116.5	116.5			
	11:00:00 AM	190	36.47	119.3	119.3			
	2:00:00 PM	205	35.4	104.3	104.3			
	5:00:00 PM	220	35.3	105.1	105.1			
	8:00:00 PM	190	35.37	105.1	105.1			
	11:00:00 PM	180	35.58	109.4	109.4			
	2:00:00 AM	200	34.97	106.6	106.6			
	4:00:00 AM	190	33.31	108.6	108.6			
	PRUEBA ON - 17/9/23	205.00	35.72	109.57	109.57	10.28	2109	4471
	PRUEBA OFF - 17/9/23	188.00	35.25	109.24	109.24	10.03	1998	4396

ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)								
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga					
		ton/h	% Sólidos (dilución)	CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6
				ppm	ppm		ppm	ppm
18/09/2023	8:00:00 AM	160	35.16	109.6	109.6			
	11:00:00 AM	200	33.69	108.4	108.4			
	2:00:00 PM	200	32.86	104.3	104.3			
	5:00:00 PM	220	34.5	98	98			
	8:00:00 PM	220	34.04	107.9	107.9			
	11:00:00 PM	220	34.44	112.5	112.5			
	2:00:00 AM	210	34.73	116	116			
	4:00:00 AM	220	34.33	112.7	112.7			
	PRUEBA ON - 18/9/23	206.67	33.68	103.57	103.57	10.03	2115	4961
	PRUEBA OFF - 18/9/23	206.00	34.54	111.74	111.74	10.30	2187	4226
21/09/2023	8:00:00 AM	200	35.68	96.00	96.00			
	11:00:00 AM	200	36.10	74.02	74.02			
	2:00:00 PM	200	35.70	106.30	106.30			
	5:00:00 PM	180	34.13	102.60	102.60			
	8:00:00 PM	180	33.73	110.20	110.20			
	11:00:00 PM	160	33.35	111.00	111.00			
	2:00:00 AM	180	33.44	112.70	112.70			
	4:00:00 AM	200	36.40	118.30	118.30			
	PRUEBA ON - 21/9/23	193.33	35.31	94.31	94.31	10.10	2370	4118
	PRUEBA OFF - 21/9/23	184.00	34.52	109.64	109.64	10.10	2370	4776

ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)								
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga					
		ton/h	% Sólidos (dilución)	CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6
				ppm	ppm		ppm	ppm
22/09/2023	8:00:00 AM	190	34	106.31	106.31			
	11:00:00 AM	200	33	108.1	108.1			
	2:00:00 PM	200	34	111.63	111.63			
	5:00:00 PM	210	33.5	110.21	110.21			
	8:00:00 PM	220	32.81	113.2	113.2			
	11:00:00 PM	220	33.38	115.7	115.7			
	2:00:00 AM	220	33.5	115.3	115.3			
	4:00:00 AM	220	33.9	115.7	115.7			
	PRUEBA ON - 22/9/23	203.33	33.50	109.98	109.98	9.97	2425	4506
	PRUEBA OFF - 22/9/23	214.00	33.52	113.24	113.24	9.39	2356	4776
23/09/2023	8:00:00 AM	200	36	112.54	112.54			
	11:00:00 AM	200	36	104.21	104.21			
	2:00:00 PM	200	37	83.26	83.26			
	5:00:00 PM	210	37	86.21	86.21			
	8:00:00 PM	210	38	110	110			
	11:00:00 PM	210	38.74	111.22	111.22			
	2:00:00 AM	210	39.4	113.7	113.7			
	4:00:00 AM	210	39.7	114	114			
	PRUEBA ON - 23/9/23	203.33	36.67	91.23	91.23	9.89	2452	4440
	PRUEBA OFF - 23/9/23	208.00	38.37	112.29	112.29	10.10	2408	4640

## APÉNDICE B: Datos del proceso DETOX (tanque 1 y tanque 2)

Datos del proceso DETOX (tanque 1 y tanque 2), pruebas ON/OFF del 15 al 23 de septiembre de 2023, esta tabla muestra el porcentaje de sólidos, cianuro total, cianuro WAD, pH del tanque 1 y tanque 2 DETOX, esta tabla da a conocer los datos de la destrucción del cianuro en las 2 etapas del proceso, permite diferenciar entre la velocidad con que se destruye el cianuro, durante la prueba y sin ella, se puede ver que no existe mayor diferencia entre la prueba en ON y OFF en el tanque 2, estos es importante, ya que muestra que con menor dosis de reactivos se puede lograr la misma destrucción que con una dosificación normal.

CONDICIONES DEL TNK D1						CONDICIONES DEL TNK D2		
FECHA	HORA	% Sólidos	pH DETOX	CN total DETOX 1	CN Wad DETOX 1	% Sólidos	CN total DETOX 2	CN Wad DETOX 2
				ppm	ppm		ppm	ppm
15/09/2023	8:00:00 AM	31	8.46	0.139	0.038	31	0.126	0.022
	11:00:00 AM	31	8.6	0.111	0.022	31	0.130	0.010
	2:00:00 PM	33.51	8.7	0.351	0.276	33.51	0.119	0.008
	5:00:00 PM	34.6	8.7	0.138	0.029	34.6	0.155	0.005
	8:00:00 PM	35	8.8	0.712	0.363	35	0.249	0.019
	11:00:00 PM	35.6	8.7	0.363	0.081	35.6	0.624	0.182
	2:00:00 AM	36.5	8.4	0.439	0.006	36.5	0.407	0.016
	4:00:00 AM	35.47	8.3	0.535	0.265	35.47	0.446	0.038
	PRUEBA ON - 15/9/23	33.04	8.67	0.200	0.109	33.0	0.135	0.008

CONDICIONES DEL TNK D1						CONDICIONES DEL TNK D2			
FECHA	HORA	% Sólidos	pH DETOX	CN total DETOX 1	CN Wad DETOX 1	% Sólidos	CN total DETOX 2	CN Wad DETOX 2	
				ppm	ppm		ppm	ppm	
	PRUEBA OFF - 15/9/23	34.71	8.53	0.438	0.151	34.7	0.370	0.055	
16/09/2023	8:00:00 AM	35.44	8.4	0.160	0.060	35.44	0.127	0.005	
	11:00:00 AM	35	8.6	0.295	0.207	35	0.129	0.012	
	2:00:00 PM	35	8.8	0.860	0.783	35	0.102	0.005	
	5:00:00 PM	36	8.9			36	0.108	0.005	
	8:00:00 PM	37	8.6	0.319	0.144	37	0.176	0.019	
	11:00:00 PM	37	8.8	0.272	0.058	37	0.318	0.030	
	2:00:00 AM	36.7	8.7	0.678	0.264	36.7	0.532	0.070	
	4:00:00 AM	35.37	8.6	0.339	0.005	35.37	0.457	0.005	
	PRUEBA ON - 16/9/23	35.33	8.77	0.578	0.495	35.3	0.113	0.007	
	PRUEBA OFF - 16/9/23	36.30	8.62	0.354	0.106	36.3	0.322	0.026	
17/09/2023	8:00:00 AM	37	8.7	0.139	0.005	37	0.133	0.005	
	11:00:00 AM	36.47	9	3.390	2.830	36.47	0.129	0.005	
	2:00:00 PM	36	9.9	3.171	2.704	36	0.186	0.005	
	5:00:00 PM	35	9.1	4.236	3.472	35	0.197	0.005	
	8:00:00 PM	36.54	8.9	1.946	1.745	36.54	0.557	0.012	
	11:00:00 PM	35.6	8.8	0.399	0.044	35.6	0.502	0.005	
	2:00:00 AM	37.43	8.9	0.235	0.012	37.43	0.322	0.008	

CONDICIONES DEL TNK D1						CONDICIONES DEL TNK D2		
FECHA	HORA	% Sólidos	pH DETOX	CN total DETOX 1	CN Wad DETOX 1	% Sólidos	CN total DETOX 2	CN Wad DETOX 2
				ppm	ppm		ppm	ppm
	4:00:00 AM	37.4	8.8	0.239	0.067	37.4	0.252	0.015
	PRUEBA ON - 17/9/23	35.82	9.33	3.599	3.002	35.8	0.171	0.005
	PRUEBA OFF - 17/9/23	36.79	8.82	0.592	0.375	36.8	0.353	0.009
18/09/2023	8:00:00 AM	35	8.7	0.199	0.107	35	0.110	0.014
	11:00:00 AM	33.66	8.4	2.170	1.850	33.66	0.120	0.005
	2:00:00 PM	33.12	8.7	2.510	2.300	33.12	0.147	0.005
	5:00:00 PM	34.7	8.9	1.921	1.541	34.7	0.188	0.005
	8:00:00 PM	34.12	8.7	0.325	0.006	34.12	0.472	0.005
	11:00:00 PM	34	8.7	0.839	0.363	34	0.595	0.056
	2:00:00 AM	34.75	8.7	0.235	0.012	34.75	0.322	0.008
	4:00:00 AM	33.62	8.7	0.239	0.067	33.62	0.252	0.015
	PRUEBA ON - 18/9/23	33.83	8.67	2.200	1.897	33.8	0.152	0.005
	PRUEBA OFF - 18/9/23	34.30	8.70	0.367	0.111	34.3	0.350	0.020
21/09/2023	8:00:00 AM	35.1	8.69	0.242	0.012	35.1	0.361	0.026
	11:00:00 AM	31.4	8.74	2.388	1.867	31.4	0.488	0.201
	2:00:00 PM	30.32	9.16	18.495	17.901	30.32	1.891	0.987
	5:00:00 PM	32.42	9.14	11.847	11.025	32.42	0.921	0.848
	8:00:00 PM	32.3	8.35	0.854	0.694	32.3	0.310	0.014

CONDICIONES DEL TNK D1						CONDICIONES DEL TNK D2		
FECHA	HORA	% Sólidos	pH DETOX	CN total DETOX 1	CN Wad DETOX 1	% Sólidos	CN total DETOX 2	CN Wad DETOX 2
				ppm	ppm		ppm	ppm
	11:00:00 PM	30.21	8.38	0.126	0.017	30.21	0.121	0.009
	2:00:00 AM	30.11	8.39	0.446	0.201	30.11	0.283	0.026
	4:00:00 AM	31.23	8.47	0.234	0.028	31.23	0.303	0.023
	PRUEBA ON - 21/9/23	31.38	9.01	10.910	10.264	31.4	0.705	0.679
	PRUEBA OFF - 21/9/23	31.79	8.46	0.380	0.190	31.8	0.276	0.020
22/09/2023	8:00:00 AM	33.57	8.601	0.113	0.015	33.57	0.194	0.021
	11:00:00 AM	34.13	8.787	2.014	1.076	34.13	0.486	0.299
	2:00:00 PM	31.48	9.023	4.162	3.575	31.48	0.111	0.010
	5:00:00 PM	32.14	8.952	4.605	4.239	32.14	0.396	0.005
	8:00:00 PM	30.8	8.69	0.505	0.005	30.8	0.517	0.005
	11:00:00 PM	29.7	8.66	0.275	0.005	29.7	0.367	0.007
	2:00:00 AM	29.5	8.67	0.274	0.005	29.5	0.384	0.014
	4:00:00 AM	29.09	8.61	1.696	1.447	29.09	0.218	0.040
	PRUEBA ON - 22/9/23	32.58	8.92	3.594	2.963	32.6	0.331	0.105
	PRUEBA OFF - 22/9/23	30.53	8.65	0.573	0.295	30.5	0.336	0.017
23/09/2023	8:00:00 AM	36.58	8.537	0.112	0.027	36.58	0.103	0.028
	11:00:00 AM	36.94	8.746	2.914	2.500	36.94	0.539	0.401
	2:00:00 PM	37.07	8.82	3.259	2.703	37.07	0.107	0.029

CONDICIONES DEL TNK D1						CONDICIONES DEL TNK D2		
FECHA	HORA	% Sólidos	pH DETOX	CN total DETOX 1	CN Wad DETOX 1	% Sólidos	CN total DETOX 2	CN Wad DETOX 2
				ppm	ppm		ppm	ppm
	5:00:00 PM	37.5	8.752	1.606	1.150	37.5	0.178	0.078
	8:00:00 PM	37.85	8.71	1.641	1.357	37.85	0.199	0.005
	11:00:00 PM	38.91	8.738	0.272	0.007	38.91	0.244	0.006
	2:00:00 AM	39.37	8.696	0.240	0.005	39.37	0.389	0.013
	4:00:00 AM	39.67	8.723	0.456	0.284	39.67	0.359	0.011
	PRUEBA ON - 23/9/23	37.17	8.77	2.593	2.118	37.2	0.275	0.169
	PRUEBA OFF - 23/9/23	38.48	8.68	0.544	0.336	38.5	0.259	0.013

## APÉNDICE C: Datos descarga a relaves (TSF)

Datos descarga TSF, pruebas ON/OFF del 15 al 23 de septiembre de 2023, esta tabla muestra el pH, los sulfatos, sólidos totales, cianuro total, cianuro WAD, en esta tabla se puede observar la diferencia entre el cianuro al final del proceso con la prueba y sin ella, se observa que la destrucción resulta igual de eficiente en ambos casos, además se observa el consumo de reactivo durante la prueba y la diferencia que existe durante esta, se puede concluir que hay una reducción en el consumo de los reactivos durante este estudio.

RESULTADOS DE LA DESCARGA-TSF							CONSUMO DE REACTIVOS ON/OFF	
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	SMBS	CuSO4
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	Kg/ton	Kg/ton
15/09/2023	8:00:00 AM	8.79			0.192	0.022	0.84	0.40
	11:00:00 AM	8.7			0.185	0.010	0.78	0.32
	2:00:00 PM	8.88			0.102	0.010	0.77	0.32
	5:00:00 PM	8.8			0.225	0.005	0.61	0.35
	8:00:00 PM	8.9			0.290	0.005	0.69	0.35
	11:00:00 PM	8.9			0.472	0.005	0.75	0.35
	2:00:00 AM	8.7			0.454	0.007	0.78	0.38
	4:00:00 AM	8.6			0.435	0.012	0.89	0.38
	PRUEBA ON - 15/9/23	8.46	3000	5374	0.171	0.008	0.72	0.33
	PRUEBA OFF - 15/9/23	8.53	3327	5818	0.369	0.010	0.79	0.37

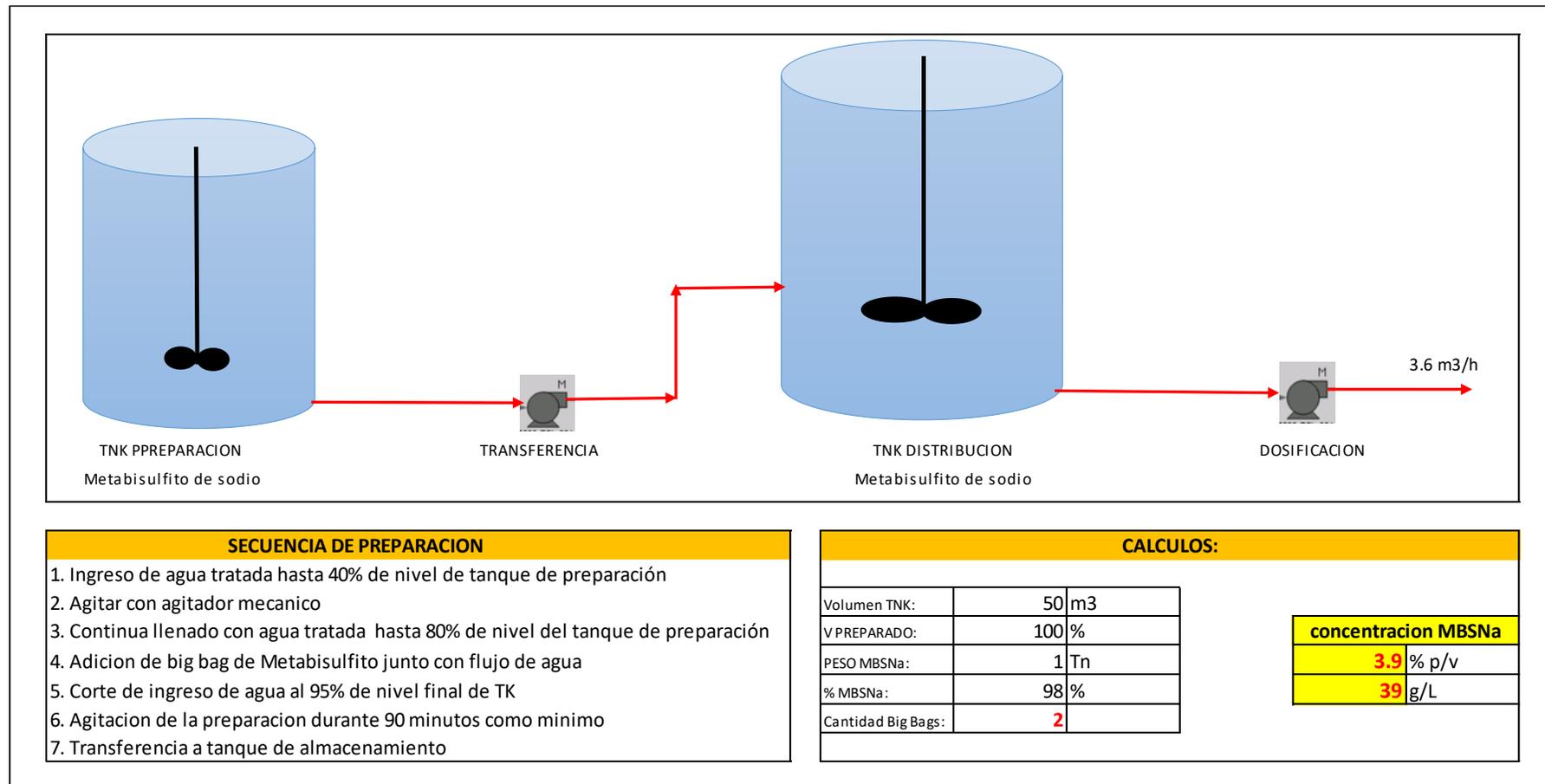
RESULTADOS DE LA DESCARGA-TSF							CONSUMO DE REACTIVOS ON/OFF	
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	SMBS	CuSO4
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	Kg/ton	Kg/ton
16/09/2023	8:00:00 AM	8.8			0.362	0.029	0.82	0.35
	11:00:00 AM	8.5			0.273	0.094	0.70	0.32
	2:00:00 PM	8.6			0.207	0.005	0.80	0.32
	5:00:00 PM	8.7			0.112	0.005	0.68	0.32
	8:00:00 PM	8.88			0.135	0.005	0.86	0.47
	11:00:00 PM	8.9			0.276	0.020	0.84	0.57
	2:00:00 AM	9			0.511	0.021	0.75	0.44
	4:00:00 AM	8.9			0.379	0.005	0.77	0.56
	PRUEBA ON - 16/9/23	9.22	2796	6050	0.197	0.035	0.73	0.32
	PRUEBA OFF - 16/9/23	8.60	2904	5554	0.333	0.016	0.81	0.48
17/09/2023	8:00:00 AM	8.8			0.329	0.005	0.76	0.53
	11:00:00 AM	8.6			0.206	0.005	0.82	0.41
	2:00:00 PM	8.8			0.162	0.005	0.70	0.40
	5:00:00 PM	8.9			0.534	0.005	0.66	0.32
	8:00:00 PM	9			0.479	0.005	0.80	0.34
	11:00:00 PM	8.9			0.477	0.005	0.80	0.44
	2:00:00 AM	9			0.315	0.005	0.77	0.41
	4:00:00 AM	7.5			0.272	0.005	0.79	0.43
	PRUEBA ON - 17/9/23	8.28	2682	5374	0.301	0.005	0.73	0.38
	PRUEBA OFF - 17/9/23	8.59	2657	5162	0.374	0.005	0.79	0.43

RESULTADOS DE LA DESCARGA-TSF							CONSUMO DE REACTIVOS ON/OFF	
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	SMBS	CuSO4
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	Kg/ton	Kg/ton
18/09/2023	8:00:00 AM	8.8			0.237	0.017	0.75	0.52
	11:00:00 AM	8.3			0.119	0.005	0.62	0.32
	2:00:00 PM	8.5			0.130	0.005	0.84	0.32
	5:00:00 PM	8.8			0.337	0.005	0.74	0.30
	8:00:00 PM	8.9			0.396	0.005	0.74	0.30
	11:00:00 PM	8.8			0.573	0.036	0.83	0.30
	2:00:00 AM	8.9			0.315	0.005	0.85	0.34
	4:00:00 AM	8.8			0.272	0.005	0.83	0.32
	PRUEBA ON - 18/9/23	8.39	2775	5230	0.195	0.005	0.73	0.31
	PRUEBA OFF - 18/9/23	8.48	2816	5244	0.359	0.014	0.80	0.35
21/09/2023	8:00:00 AM	8.6			0.271	0.015	0.83	0.32
	11:00:00 AM	8.5			0.25	0.01	0.78	0.33
	2:00:00 PM	8.4			0.31	0.11	0.79	0.34
	5:00:00 PM	8.24			0.19	0.01	0.77	0.35
	8:00:00 PM	8.51			0.39	0.01	0.72	0.53
	11:00:00 PM	8.49			0.11	0.01	0.98	0.57
	2:00:00 AM	8.46			0.27	0.02	0.75	0.51
	4:00:00 AM	8.53			0.28	0.03	0.77	0.46
	PRUEBA ON - 21/9/23	8.38	2775	5230	0.250	0.039	0.78	0.34
	PRUEBA OFF - 21/9/23	7.80	3016	5158	0.261	0.019	0.81	0.48

RESULTADOS DE LA DESCARGA-TSF							CONSUMO DE REACTIVOS ON/OFF	
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	SMBS	CuSO4
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	Kg/ton	Kg/ton
22/09/2023	8:00:00 AM	8.553			0.193	0.02	0.84	0.36
	11:00:00 AM	8.462			0.17	0.02	0.80	0.37
	2:00:00 PM	8.722			0.28	0.01	0.80	0.36
	5:00:00 PM	8.577			0.80	0.46	0.78	0.36
	8:00:00 PM	8.82			0.44	0.01	0.83	0.36
	11:00:00 PM	8.77			0.32	0.01	0.80	0.34
	2:00:00 AM	8.81			0.24	0.01	0.81	0.40
	4:00:00 AM	8.81			0.20	0.01	0.76	0.39
	PRUEBA ON - 22/9/23	8.01	2978	6096	0.416	0.164	0.79	0.36
	PRUEBA OFF - 22/9/23	8.26	3196	5480	0.279	0.009	0.81	0.37
23/09/2023	8:00:00 AM	8.613			0.10	0.03	0.69	0.36
	11:00:00 AM	8.309			0.15	0.08	0.72	0.34
	2:00:00 PM	8.337			0.13	0.05	0.72	0.44
	5:00:00 PM	8.347			0.09	0.03	0.60	0.43
	8:00:00 PM	8.700			0.17	0.01	0.71	0.46
	11:00:00 PM	8.804			0.27	0.01	0.74	0.43
	2:00:00 AM	8.799			0.36	0.01	0.74	0.44
	4:00:00 AM	8.119			0.32	0.04	0.76	0.38
	PRUEBA ON - 23/9/23	7.97	3172	5256	0.127	0.054	0.68	0.40
	PRUEBA OFF - 23/9/23	8.31	2793	5464	0.246	0.019	0.73	0.41

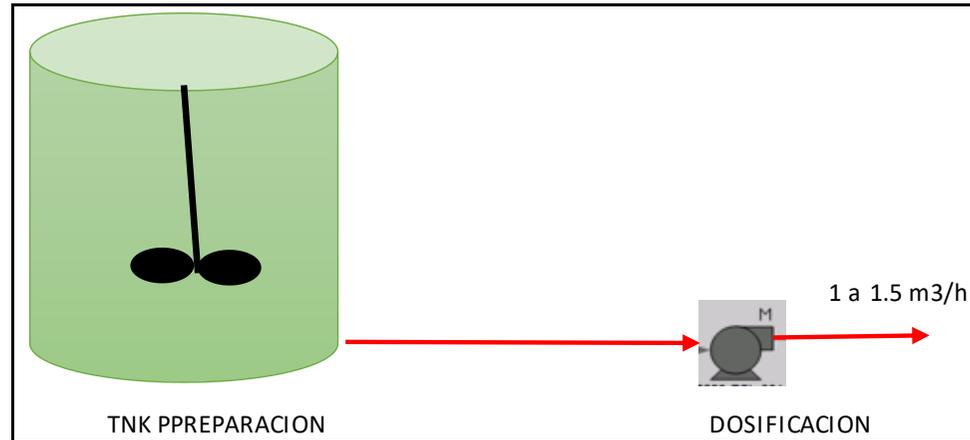
## APÉNDICE D: Preparación de metabisulfito de sodio

Preparación metabisulfito de sodio, en modo automático, se prepara en un tanque de 50 m<sup>3</sup> y luego es transferido a un tanque para almacenamiento y dosificación al circuito DETOX.



## APÉNDICE E: Preparación de sulfato de cobre

Preparación sulfato de cobre, en modo manual, se prepara en un tanque de 10 m<sup>3</sup> y luego se dosifica al circuito DETOX.



### SECUENCIA DE PREPARACION

1. Nivel de tanque de preparacion al 50 %
2. Agregar 12 sacos de 25 kg de sulfato de cobre
3. Agitar y dosificar de forma continua

### CALCULOS:

Volumen TK:	10	m <sup>3</sup>
Volumen PREPARADO:	100	%
PESO CuSO <sub>4</sub> :	0.025	Tn
% CuSO <sub>4</sub> :	98.5	%
Cantidad Sacos	<b>24</b>	

Concentracion CuSO <sub>4</sub>	
<b>5.9</b>	% p/v
<b>59</b>	g/L

## APÉNDICE F: Datos de alimentación a DETOX (descarga CIL 6) - Replica

Datos descarga CIL 6, pruebas ON/OFF del 10 al 16 de octubre de 2023, esta tabla muestra el tonelaje tratado, porcentaje de sólidos, cianuro libre, cianuro WAD, pH, sulfatos y sólidos totales de la descarga del CIL 6, esta tabla muestra las características de la alimentación al circuito DETOX, esto nos ayuda a entender de mejor manera la destrucción del cianuro en el sistema.

		ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)							
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga						
			CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6	Cu	Fe
		ton/h	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm
10/10/2023	8:00:00 AM	182	88.33	88.33					
	11:00:00 AM	182	99.45	99.45					
	2:00:00 PM	182	91.40	91.4					
	5:00:00 PM	182	99.00	99					
	8:00:00 PM	190	99.25	99.25					
	11:00:00 PM	190	100.08	100.08					
	2:00:00 AM	200	105.30	105.3					
	4:00:00 AM	205	99.00	99					
	PRUEBA ON	182.00	96.62	96.62	10.08	1394.00	3001.00	32.10	1.10
	PRUEBA OFF	193.40	98.39	98.39	10.47	1375.00	3098.00	36.50	1.40

			ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)						
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga						
			CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6	Cu	Fe
		ton/h	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm
11/10/2023	8:00:00 AM	210	100.79	100.79					
	11:00:00 AM	210	110.92	110.92					
	2:00:00 PM	210	99.80	99.8					
	5:00:00 PM	210	110.00	110					
	8:00:00 PM	210	81.26	81.26					
	11:00:00 PM	210	91.11	91.11					
	2:00:00 AM	210	115.00	115					
	4:00:00 AM	210	91.00	91					
	PRUEBA ON	210.00	106.91	106.91	10.16	1596.00	3400.00	32.70	1.81
	PRUEBA OFF	210.00	95.83	95.83	10.43	1769.00	3628.00	36.90	1.72
12/10/2023	8:00:00 AM	210	100.79	100.79					
	11:00:00 AM	200	110.92	110.92					
	2:00:00 PM	200	99.80	99.8					
	5:00:00 PM	200	110.00	110					
	8:00:00 PM	210	81.26	81.26					
	11:00:00 PM	210	91.11	91.11					

			ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)						
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga						
			CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6	Cu	Fe
		ton/h	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm
	2:00:00 AM	210	115.00	115					
	4:00:00 AM	210	115.00	115					
	PRUEBA ON	200.00	106.91	106.91	10.04	1985.00	3624.00	44.90	0.81
	PRUEBA OFF	210.00	100.63	100.63	10.06	2026.00	4736.00	26.00	1.88
13/10/2023	8:00:00 AM	210	110.85	110.85					
	11:00:00 AM	210	110.65	110.65					
	2:00:00 PM	210	105.13	105.13					
	5:00:00 PM	210	110.00	110					
	8:00:00 PM	210	106.94	106.94					
	11:00:00 PM	210	107.60	107.6					
	2:00:00 AM	210	106.94	106.94					
	4:00:00 AM	210	107.60	107.6					
	PRUEBA ON	210.00	108.59	108.59	10.19	2483.00	4270.00	28.60	0.77
	PRUEBA OFF	210.00	107.99	107.99	10.49	1925.00	4114.00	23.90	1.58
14/10/2023	8:00:00 AM	200	107.94	107.94					
	11:00:00 AM	180	104.44	104.44					

		ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)							
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga						
			CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6	Cu	Fe
		ton/h	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm
	2:00:00 PM	180	96.04	96.04					
	5:00:00 PM	180	104.44	104.44					
	8:00:00 PM	180	96.97	96.97					
	11:00:00 PM	180	98.90	98.9					
	2:00:00 AM	200	103.48	103.48					
	4:00:00 AM	200	96.97	96.97					
	PRUEBA ON	180.00	101.64	101.64	10.30	2033.00	3928.00	26.20	1.37
	PRUEBA OFF	192.00	100.85	100.85	10.31	1777.00	3876.00	26.60	2.12
15/10/2023	8:00:00 AM	210	105.32	105.32					
	11:00:00 AM	210	102.48	102.48					
	2:00:00 PM	210	108.80	108.8					
	5:00:00 PM	210	108.80	108.8					
	8:00:00 PM	210	107.99	107.99					
	11:00:00 PM	210	97.91	97.91					
	2:00:00 AM	150	92.15	92.15					
	4:00:00 AM	180	92.15	92.15					

			ALIMENTACION A DETOX (DESCARGA CIL 6)						
FECHA	HORA	Tonelaje	CIL 6 Descarga						
			CN Libre CIL 6	CN Wad CIL 6	pH CIL 6	Sulfatos CIL 6	Sólidos Totales CIL 6	Cu	Fe
		ton/h	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm
	PRUEBA ON	210.00	106.69	106.69	9.97	1942.00	3846.00	33.30	0.10
	PRUEBA OFF	192.00	99.10	99.10	10.41	1756.00	3512.00	30.90	1.82
16/10/2023	8:00:00 AM	200	97.39	97.39					
	11:00:00 AM	200	98.92	98.92					
	2:00:00 PM	200	91.27	91.27					
	5:00:00 PM	200	91.57	91.57					
	8:00:00 PM	210	99.50	99.5					
	11:00:00 PM	210	98.34	98.34					
	2:00:00 AM	215	116.36	116.36					
	4:00:00 AM	215	112.33	112.33					
	PRUEBA ON	200.00	93.92	93.92	10.02	1958.00	3124.00	31.80	2.06
	PRUEBA OFF	210.00	104.78	104.78	10.41	1719.00	3410.00	24.70	2.10

## APÉNDICE G: Datos del proceso DETOX (tanque 1 y tanque 2) - Replica

Datos del proceso DETOX (tanque 1 y tanque 2), pruebas ON/OFF del 10 al 16 de octubre de 2023, esta tabla muestra el porcentaje de sólidos, cianuro total, cianuro WAD, pH del tanque 1 y tanque 2 DETOX, esta tabla da a conocer los datos de la destrucción del cianuro en las 2 etapas del proceso, permite diferenciar entre la velocidad con que se destruye el cianuro, durante la prueba y sin ella, se puede ver que no existe mayor diferencia entre la prueba en ON y OFF en el tanque 2, estos es importante, ya que muestra que con menor dosis de reactivos se puede lograr la misma destrucción que con una dosificación normal.

		CONDICIONES DEL TNK D1		CONDICIONES DEL TNK D2
FECHA	HORA	pH DETOX	CN Wad DETOX 1	CN Wad DETOX 2
			ppm	ppm
10/10/2023	8:00:00 AM	8.4	0.160	0.005
	11:00:00 AM	8.72	3.830	0.005
	2:00:00 PM	8.69	1.020	0.005
	5:00:00 PM	8.74	0.8	0.005
	8:00:00 PM	8.83	0.580	0.210
	11:00:00 PM	8.46	0.21	0.050
	2:00:00 AM	8.44	0.06	0.100
	4:00:00 AM	8.43	0.27	0.080
	PRUEBA ON	8.72	1.88	0.005
	PRUEBA OFF	8.51	0.26	0.089

		CONDICIONES DEL TNK D1		CONDICIONES DEL TNK D2
FECHA	HORA	pH DETOX	CN Wad DETOX 1	CN Wad DETOX 2
			ppm	ppm
11/10/2023	8:00:00 AM	8.28	0.080	0.005
	11:00:00 AM	8.47	1.100	0.005
	2:00:00 PM	8.6	2.290	0.010
	5:00:00 PM	8.73	2.67	0.010
	8:00:00 PM	8.79	0.110	0.040
	11:00:00 PM	8.87	0.62	0.100
	2:00:00 AM	8.9	0.68	0.080
	4:00:00 AM	8.96	0.47	0.120
	PRUEBA ON	8.60	1.695	0.008
	PRUEBA OFF	8.76	0.392	0.069
12/10/2023	8:00:00 AM	8.89	0.190	0.005
	11:00:00 AM	9.05	0.500	0.010
	2:00:00 PM	9.27	2.820	0.120
	5:00:00 PM	9.31	2.980	0.150
	8:00:00 PM	9.27	0.240	0.040
	11:00:00 PM	9.06	0.35	0.040
	2:00:00 AM	8.94	0.63	0.070
	4:00:00 AM	8.97	0.005	0.005

		CONDICIONES DEL TNK D1		CONDICIONES DEL TNK D2
FECHA	HORA	pH DETOX	CN Wad DETOX 1	CN Wad DETOX 2
			ppm	ppm
	PRUEBA ON	9.21	2.100	0.093
	PRUEBA OFF	9.03	0.283	0.032
13/10/2023	8:00:00 AM	9.07	0.550	0.005
	11:00:00 AM	9.19	2.260	0.005
	2:00:00 PM	9.27	3.500	0.010
	5:00:00 PM	9.14	2.480	0.005
	8:00:00 PM	9.08	0.450	0.020
	11:00:00 PM	9.05	0.81	0.050
	2:00:00 AM	9.03	1.66	0.120
	4:00:00 AM	9.03	0.98	0.080
	PRUEBA ON	9.20	2.747	0.007
	PRUEBA OFF	9.05	0.890	0.055
14/10/2023	8:00:00 AM	9.01	0.550	0.005
	11:00:00 AM	8.97	1.660	0.005
	2:00:00 PM	8.78	1.430	0.005
	5:00:00 PM	8.76	0.720	0.005
	8:00:00 PM	8.8	0.080	0.005
	11:00:00 PM	8.89	2.3	0.060

		CONDICIONES DEL TNK D1		CONDICIONES DEL TNK D2
FECHA	HORA	pH DETOX	CN Wad DETOX 1	CN Wad DETOX 2
			ppm	ppm
	2:00:00 AM	8.9	1.64	0.080
	4:00:00 AM	8.44	1.87	0.005
	PRUEBA ON	8.84	1.270	0.005
	PRUEBA OFF	8.81	1.288	0.031
15/10/2023	8:00:00 AM	8.35	0.005	0.150
	11:00:00 AM	8.71	1.860	0.130
	2:00:00 PM	8.68	1.220	0.140
	5:00:00 PM	8.72	2.020	0.070
	8:00:00 PM	8.57	0.110	0.005
	11:00:00 PM	8.51	1.81	0.230
	2:00:00 AM	8.61	0.42	0.040
	4:00:00 AM	8.51	0.61	0.005
	PRUEBA ON	8.70	1.700	0.113
	PRUEBA OFF	8.51	0.591	0.086
16/10/2023	8:00:00 AM	8.58	0.890	0.190
	11:00:00 AM	8.43	1.140	0.190
	2:00:00 PM	8.27	1.180	0.150
	5:00:00 PM	8.51	0.920	0.210

		CONDICIONES DEL TNK D1		CONDICIONES DEL TNK D2
FECHA	HORA	pH DETOX	CN Wad DETOX 1	CN Wad DETOX 2
			ppm	ppm
	8:00:00 PM	8.67	1.010	0.210
	11:00:00 PM	8.8	2.99	0.230
	2:00:00 AM	8.68	1.7	0.005
	4:00:00 AM	8.6	0.56	0.050
	PRUEBA ON	8.40	1.080	0.183
	PRUEBA OFF	8.67	1.430	0.137

## APÉNDICE H: Datos de descarga a relaves (TSF) - replica

Datos descarga TSF, pruebas ON/OFF del 10 al 16 de octubre de 2023, esta tabla muestra el pH, los sulfatos, sólidos totales, cianuro total, cianuro WAD, es esta tabla se puede observar la diferencia entre el cianuro al final del proceso con la prueba y sin ella, se observa que la destrucción resulta igual de eficiente en ambos casos, además se observa el consumo de reactivo durante la prueba y la diferencia que existe durante esta, se puede concluir que hay una reducción en el consumo de los reactivos durante este estudio.

RESULTADOS DE LA DESCARGA -TSF									
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	Au	Cu	Fe
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
10/10/2023	8:00:00 AM								
	11:00:00 AM								
	2:00:00 PM								
	5:00:00 PM								
	8:00:00 PM								
	11:00:00 PM								
	2:00:00 AM								
	4:00:00 AM								
	PRUEBA ON	8.080	1843.000	3846.000	0.240	0.060	0.980	32.100	1.100
	PRUEBA OFF	8.320	1879.000	4082.000	0.330	0.005	0.970	0.080	0.320

RESULTADOS DE LA DESCARGA -TSF									
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	Au	Cu	Fe
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
11/10/2023	8:00:00 AM								
	11:00:00 AM								
	2:00:00 PM						0.025	0.147	0.159
	5:00:00 PM						0.026	0.062	0.214
	8:00:00 PM				0.358	0.005	0.02	0.133	0.011
	11:00:00 PM				0.24	0.024	0.02	0.133	0.088
	2:00:00 AM				0.183	0.023	0.02	0.13	0.053
	4:00:00 AM				0.182	0.035	0.02	0.175	0.048
	PRUEBA ON	8.390	1963.000	4235.000	0.550	0.020	0.026	0.100	0.130
	PRUEBA OFF	8.470	2245.000	4214.000	0.241	0.022	0.020	0.143	0.050
12/10/2023	8:00:00 AM				0.238	0.014	0.02	0.115	0.208
	11:00:00 AM				0.451	0.04	0.02	0.119	0.156
	2:00:00 PM				0.453	0.005	0.02	0.074	0.239
	5:00:00 PM				0.507	0.005	0.022	0.085	0.688
	8:00:00 PM				0.316	0.005	0.02	0.079	0.399
	11:00:00 PM				0.255	0.005	0.02	0.086	0.291
	2:00:00 AM				0.279	0.005	0.02	0.074	0.38
	4:00:00 AM				0.492	0.028	0.02	0.105	0.637

RESULTADOS DE LA DESCARGA -TSF									
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	Au	Cu	Fe
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	PRUEBA ON	8.960	2430.000	4400.000	0.470	0.017	0.021	0.093	0.361
	PRUEBA OFF	8.590	2380.000	4626.000	0.316	0.011	0.020	0.092	0.383
13/10/2023	8:00:00 AM				0.133	0.015	0.021	0.067	0.312
	11:00:00 AM				0.212	0.005	0.023	0.048	0.437
	2:00:00 PM				0.451	0.012	0.023	0.056	0.681
	5:00:00 PM				0.538	0.005	0.033	0.045	0.696
	8:00:00 PM				0.469	0.005	0.025	0.078	0.493
	11:00:00 PM				0.41	0.015	0.02	0.123	0.417
	2:00:00 AM				0.352	0.12	0.02	0.214	0.253
	4:00:00 AM				0.428	0.078	0.02	0.192	0.452
	PRUEBA ON	8.890	2103.000	5014.000	0.400	0.007	0.026	0.050	0.605
	PRUEBA OFF	8.830	2664.000	4728.000	0.358	0.047	0.021	0.135	0.385
14/10/2023	8:00:00 AM				0.393	0.008	0.02	0.109	0.58
	11:00:00 AM				0.316	0.005	0.02	0.057	0.412
	2:00:00 PM				0.141	0.005	0.02	0.054	0.265
	5:00:00 PM				0.145	0.005	0.02	0.051	0.286
	8:00:00 PM				0.201	0.005	0.02	0.059	0.287
	11:00:00 PM				0.387	0.034	0.02	0.109	0.48

RESULTADOS DE LA DESCARGA -TSF									
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	Au	Cu	Fe
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	2:00:00 AM				0.567	0.16	0.02	0.213	0.542
	4:00:00 AM				0.374	0.006	0.02	0.063	0.572
	PRUEBA ON	8.950	2528.000	4831.000	0.201	0.005	0.020	0.054	0.321
	PRUEBA OFF	8.360	2450.000	4748.000	0.384	0.043	0.020	0.111	0.492
15/10/2023	8:00:00 AM				0.131	0.005	0.02	0.068	0.203
	11:00:00 AM				0.183	0.005	0.02	0.093	0.234
	2:00:00 PM				0.245	0.005	0.02	0.093	0.219
	5:00:00 PM				0.133	0.005	0.02	0.079	0.3
	8:00:00 PM				0.187	0.005	0.02	0.109	0.226
	11:00:00 PM				0.305	0.139	0.02	0.297	0.27
	2:00:00 AM				0.287	0.097	0.02	0.263	0.29
	4:00:00 AM				0.266	0.101	0.02	0.275	0.306
	PRUEBA ON	8.500	2481.000	4759.000	0.187	0.005	0.020	0.088	0.251
	PRUEBA OFF	0.030	2242.000	4106.000	0.235	0.069	0.020	0.202	0.259
16/10/2023	8:00:00 AM				0.109	0.096	0.027	0.302	0.381
	11:00:00 AM				0.127	0.007	0.03	0.133	0.32
	2:00:00 PM				0.152	0.005	0.034	0.157	0.225
	5:00:00 PM				0.143	0.005	0.02	0.076	0.099

RESULTADOS DE LA DESCARGA -TSF									
FECHA	HORA	pH	Sulfatos TSF	Sólidos Totales TSF	CN total TSF	CN Wad TSF	Au	Cu	Fe
		ppm	mV	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	8:00:00 PM				0.126	0.127	0.02	0.21	0.139
	11:00:00 PM				0.432	0.005	0.02	0.062	0.19
	2:00:00 AM				0.929	0.016	0.02	0.08	0.588
	4:00:00 AM				0.796	0.023	0.02	0.11	0.566
	PRUEBA ON	8.040	1598.000	2028.000	0.141	0.006	0.028	0.122	0.215
	PRUEBA OFF	8.320	2070.000	3758.000	0.478	0.053	0.021	0.153	0.373