

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**Optimización del consumo de reactivos para la reducción de
costos en la Planta de Tratamiento de Efluentes de la
Empresa Minera La Arena S.A.**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor: Bach. Dante Erick COCA ESTRELLA

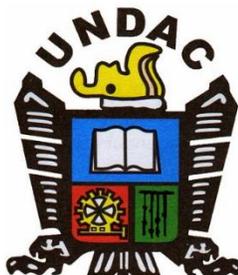
Asesor: Mg. Jonás Ananías RAMOS MARTÍNEZ

Cerro de Pasco – Perú – 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**Optimización del consumo de reactivos para la reducción de
costos en la Planta de Tratamiento de Efluentes de la
Empresa Minera La Arena S.A.**

Sustentada y aprobada ante los miembros de jurado:

Dr. Antonio Florencio BLAS ARAUCO

PRESIDENTE

CIP N°20664

Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA

MIEMBRO

CIP N°26280

Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ

MIEMBRO

CIP N°104747

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre Gloria Estrella y a mi padre incondicional Miguel Blanco, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora.

D. Erick Coca Estrella

RECONOCIMIENTO

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi PADRE Miguel Blanco y mi MADRE Gloria Estrella.

También deseo expresar mi agradecimiento al Ing. Manuel Ortega Rubin por la oportunidad de ejecutar este proyecto, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegué a la empresa HLC Ingeniería y Construcción S.A.C. Asimismo, agradezco a mis compañeros del área de Metalurgia por su apoyo personal y humano, especialmente al Ing. Tonino Ramirez Maynetto, con quien he compartido proyectos e ilusiones durante varios años. Un trabajo de investigación es siempre fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos que corresponden a otras personas

Finalmente, un agradecimiento especial a cada uno de los maestros que me dieron clase; por sus enseñanzas, su dedicación y su tiempo, en especial a los Catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, quienes además de enseñarme lo que sé de esta carrera hicieron que mi paso por la universidad fuera agradable.

D. Erick Coca Estrella

RESUMEN

El área de Metalurgia HLC INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C. en su misión de encontrar las mejores condiciones de operación, ha incentivado la realización de pruebas a nivel de laboratorio y posteriormente escalar la prueba a nivel industrial de tal forma que puedan evaluar la dosificación óptima de reactivos que permitan un ahorro en el consumo de los mismos.

Al realizar las pruebas de destrucción del cianuro mediante el método de diseño experimental en Jar Test se logró una detoxificación de la solución cianurada, asimismo llevándolo a escala industrial se optimizó el consumo de reactivos calculando los ratios y variaciones de dosificación de los distintos reactivos a fin de reducir costos en la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. logrando así parámetros por debajo de los LMP tanto el contenido de cianuro total y el contenido de metales exigidos por el Decreto Supremo N°010-2010-MINAM para la descarga de aguas al medio ambiente.

Así mismo nos permitió describir el proceso de tratamiento de fluentes y establecer los parámetros y lineamientos adecuados de cómo operar de manera eficiente y así NO tener problemas en cuanto a la detoxificación de la solución cianurada y precipitación de los metales de alto contenido.

Palabras clave: LMP; Detoxificación.

ABSTRACT

The area of Metallurgy HLC INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C. in its mission to find the best operating conditions, has encouraged the performance of laboratory-level tests and then scale the test at an industrial level so that they can evaluate the optimal dosage of reagents that allow savings in consumption thereof .

When carrying out the cyanide destruction tests by means of the experimental design method in Jart Test, a detoxification of the cyanide solution was achieved, also taking it on an industrial scale, the consumption of reagents was optimized, calculating the ratios and dosage variations of the different reagents in order to reduce costs in the Effluent Treatment Plant of the Mine Company La Arena SA thus achieving parameters below the LMP both the content of total cyanide and the content of metals required by Supreme Decree No. 010-2010-MINAM for the discharge of water into the environment.

It also allowed us to describe the fluents treatment process and establish the parameters and guidelines for how to operate efficiently and thus have NO problems regarding the detoxification of the cyanide solution and precipitation of high content metals.

Palabras clave: LMP; Detoxification.

INTRODUCCIÓN

En la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. se tiene problemas en la dosificación de reactivos para la detoxificación de la solución cianurada y precipitación de los metales que están por encima de los Límites Máximos Permisibles (LMP); es por ello que se optó realizar pruebas metalúrgicas tanto a nivel laboratorio como a escala industrial, viendo la posibilidad de sugerir cambios en la planta, sobre todo en la dosificación de reactivos a los tanques de degradación; ya que se tiene un alto consumo de reactivos como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), sulfhidrato sódico (NaSH), cloruro férrico ($FeCl_3$) y floculante aniónico, que afecta el costo fijado a Planta ADR.

A medida que se incremente la superficie de las pilas de lixiviación, se captará más agua de lluvias en la zona de la plataforma y eventualmente, habrá un exceso de solución en el circuito de la Planta ADR. Este exceso será tratado para destruir el cianuro y eliminar otros contaminantes, antes de su descarga a la poza de clarificación y luego al medio ambiente.

La Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE), ha sido diseñada para reducir las concentraciones de cianuro y de metales pesados para cumplir con los criterios de descarga de efluentes (por debajo de los LMP). El tratamiento de efluentes está dividido en cuatro etapas: Etapa de Oxidación, Catalización, Precipitación del Metales y Etapa de Clarificación.

La Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. está conformada por dos circuitos en paralelo de $125 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacidad máxima cada uno,

siendo cada circuito de 05 tanques, formado cada circuito por uno de acondicionamiento y por cuatro tanques de degradación, con una capacidad de 8.2 m³ y 67,9 m³ respectivamente. Cada sistema tiene su respectivo sistema de agitación y dosificación de reactivos. El diseño de la planta se basa en el proceso peróxido de hidrógeno más sulfato de cobre pentahidratado como catalizador. Asimismo, se usan los reactivos sulfhidrato sódico y cloruro férrico para precipitar elementos tales como arsénico (As), cobre (Cu), fierro (Fe), mercurio (Hg) y zinc (Zn), al final se adiciona un floculante tipo aniónico para la clarificación y ayudar a disminuir el tiempo de sedimentación.

El principal objetivo de estas pruebas metalúrgicas es optimizar el consumo de reactivos a fin de evaluar la dosificación adecuada en la Planta de Tratamiento de Fluentes (PTE) para reducir los costos operacionales y minimizar los volúmenes de efluentes; sobre todo no generar compuestos o derivados metaestables del cianuro y generar en el proceso final efluentes líquidos con contenido de cianuro y de metales por debajo de los LMP.

ÍNDICE

CARÁTULA	Pág.
DEDICATORIA	iii
RECONOCIMIENTO	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xix

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1.1. Diseño de Detoxificación a Nivel Laboratorio.....	9
1.1.2. Diseño de Precipitación a Nivel Laboratorio.....	12
1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.3.1. Problema Principal.....	18
1.3.2. Problemas Específicos.....	19
1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	22

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES DE ESTUDIO	23
2.1.1.	Antecedentes Científicos.	23
2.2.	BASES TEÓRICAS – DESCRIPCIÓN DE LA ARENA S.A.....	26
2.2.1.	Módulo I: Pad de Lixiviación.	26
2.2.2.	Módulo II: Planta de Procesos – Planta ADR.....	28
2.2.3.	Módulo III: Investigaciones Metalúrgicas.....	32
2.3.	BASES CIENTÍFICAS	36
2.3.1.	El Cianuro y sus Métodos de Degradación.....	36
2.3.2.	Límites Máximos Permisibles (LMP).	43
2.4.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	44
2.5.	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	51
2.5.1.	Hipótesis general.....	51
2.5.2.	Hipótesis específica.	51
2.6.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES	51
2.6.1.	Variables Independientes.....	51
2.6.2.	Variables Dependientes.	52

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	53
3.2.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	53
3.2.1.	Diseño Factorial – Etapa de Oxidación.	53
3.2.2.	Diseño Factorial – Etapa de Precipitación.....	54
3.2.3.	Diseño Factorial – Etapa de Coagulación y Clarificación.....	55
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	56
3.3.1.	Población.	56
3.3.2.	Muestra.	57
3.3.3.	Caracterización de la Muestra Solución Barren N°1	60
3.4.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	61
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	63

3.5.1.	Técnicas de Recolección de Datos.....	63
3.5.2.	Instrumentos.....	63
3.6.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	64
3.6.1.	Procesamiento.....	65
3.6.2.	Análisis de datos.....	65
3.6.3.	Materiales y reactivos.....	65
3.6.4.	Preparación de muestras.....	66
3.6.5.	Procedimiento de muestreo y mediciones	66
3.7.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO, SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	67
3.7.1.	Pruebas Metalúrgicas Exploratorias.....	69
3.7.2.	Caracterización de la Muestra Solución Barren N°2.....	95
3.7.3.	Pruebas Metalúrgicas Batch.....	96
3.7.4.	Caracterización de la Muestra Solución Barren N°3.....	112
3.7.5.	Pruebas Metalúrgicas en Continuo.....	114
3.7.6.	Porcentaje de Sólidos – Continuo N°03.....	129
3.7.7.	Velocidad de Sedimentación – Continuo N°03.....	129
CAPITULO IV		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO – NIVEL INDUSTRIAL.....	131
4.1.1.	Pilotaje a Nivel Industrial.....	135
4.1.2.	Caracterización de Solución Tratada – Nivel Industrial.....	139
4.1.3.	Presentación de Resultados a Nivel Industrial.....	142
4.2.	PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETRACIÓN DE RESULTADOS	144
4.3.	PRUEBA DE HIPÓTESIS	145
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	147
CONCLUSIONES		150
RECOMENDACIONES		151
BILIOGRAFÍA		152
ANEXOS.....		154
(Panel Fotográfico – Observación)		154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1: Codificación de equipos PTE La Arena S.A.	5
Tabla N° 1.2: Pruebas de botellas a nivel laboratorio ejecutados por Quimtia S.A.	6
Tabla N° 1.3: Ratios de consumo de reactivos a nivel laboratorio – Quimtia S.A.	7
Tabla N° 1.4: Resumen del consumo de reactivos a nivel piloto (criterio de diseño).....	8
Tabla N° 1.5: Resultados de análisis químico de SGS del Perú S.A.C.....	8
Tabla N° 1.6: Variables del diseño de detoxificación – Determinación del problema.....	10
Tabla N° 1.7: Factores y niveles del diseño de detoxificación – Determinación del problema. .	10
Tabla N° 1.8: Resultados obtenidos de la prueba de detoxificación de cianuro – Problema.	10
Tabla N° 1.9: Variables del diseño de precipitación – Determinación del problema.....	12
Tabla N° 1.10: Factores y niveles del diseño de precipitación – Determinación del problema. .	13
Tabla N° 1.11: Concentraciones de Cu Vs Tiempo de residencia – Determinación del problema.	13
Tabla N° 1.12: Concentraciones de Fe Vs Tiempo de residencia – Determinación del problema.	14
Tabla N° 1.13: Ratios de reactivos encontrados a nivel laboratorio – Problema.	15
Tabla N° 1.14: Registro histórico de tratamiento de efluentes de la La Arena S.A. (2015-2016).	16
Tabla N° 1.15: Resumen de costos de la operación de la PTE de La Arena S.A. (2015-2016). .	17
Tabla N° 2.1: Límites Máximos Permisibles según D.S.N°10-2010.....	43
Tabla N° 3.1: Matriz de diseño experimental – Etapa de oxidación.....	54
Tabla N° 3.2: Matriz de diseño experimental – Etapa de precipitación.....	55
Tabla N° 3.3: Matriz de diseño experimental – Etapa de coagulación y clarificación.....	56
Tabla N° 3.4: Análisis químico de cabeza – Solución Barren N°1.....	60
Tabla N° 3.5: Análisis químico de cabeza ICP metales totales – Solución Barren N°1.	61
Tabla N° 3.6: Análisis químico de cabeza ICP metales disueltos – Solución Barren N°1.....	61
Tabla N° 3.7: Personal para el muestreo In situ.	63
Tabla N° 3.8: Equipo de Protección Personal (EPP’s).	64
Tabla N° 3.9: Herramientas y materiales para el muestreo.....	64
Tabla N° 3.10: Estabilización de pH – Exploratoria.	69

Tabla N° 3.11: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Exploratoria.	70
Tabla N° 3.12: Análisis químico de productos H ₂ O ₂ – Exploratoria.	71
Tabla N° 3.13: Tabla de diseño experimental – Exploratoria.	71
Tabla N° 3.14: Neutralización de pH – Exploratoria.	75
Tabla N° 3.15: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH - Exploratoria.	75
Tabla N° 3.16: Análisis químico de productos de precipitación con NaSH – Exploratoria.	76
Tabla N° 3.17: Tabla de diseño experimental – Exploratoria.	77
Tabla N° 3.18: Estabilización de pH – Exploratoria Contínua.	80
Tabla N° 3.19: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Exploratoria Contínua.	81
Tabla N° 3.20: Neutralización de pH – Exploratoria Contínua.	81
Tabla N° 3.21: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Exploratoria Contínua.	82
Tabla N° 3.22: Etapa de coagulación – Exploratoria Contínua.	83
Tabla N° 3.23: Etapa de clarificación – Exploratoria Contínua.	83
Tabla N° 3.24: Análisis químico de productos – Exploratoria Contínua.	84
Tabla N° 3.25: Tabla de diseño experimental – Exploratoria Contínua.	85
Tabla N° 3.26: Floculantes evaluados – Características básicas.	91
Tabla N° 3.27: Etapa de precipitación validado con NaSH.	91
Tabla N° 3.28: Etapa de clarificación – Evaluación de floculantes.	92
Tabla N° 3.29: Análisis químico de cabeza – Solución Barren N°2.	95
Tabla N° 3.30: Análisis químico de cabeza ICP metales totales – Solución Barren N°2.	95
Tabla N° 3.31: Análisis químico de cabeza ICP metales disueltos – Solución Barren N°2.	96
Tabla N° 3.32: Estabilización de pH – Batch N°01.	97
Tabla N° 3.33: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Batch N°01.	98
Tabla N° 3.34: Análisis químico de productos – Bath N°01.	98
Tabla N° 3.35: Estabilización de pH – Batch N°02.	100
Tabla N° 3.36: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Batch N°02.	100
Tabla N° 3.37: Neutralización de pH con lechada de cal – Batch N°02.	101
Tabla N° 3.38: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Batch N°02.	102
Tabla N° 3.39: Análisis químico de productos – Batch N°02.	102
Tabla N° 3.40: Estabilización de pH – Batch N°03.	103
Tabla N° 3.41: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Batch N°03.	104
Tabla N° 3.42: Neutralización de pH con NaOH – Batch N°03.	105

Tabla N° 3.43: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Batch N°03.	105
Tabla N° 3.44: Análisis químico de productos – Batch N°03.	106
Tabla N° 3.45: Acondicionamiento de pH – Batch N°04.	107
Tabla N° 3.46: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Batch N°04.	108
Tabla N° 3.47: Neutralización de pH – Batch N°04.	108
Tabla N° 3.48: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Batch N°04.	109
Tabla N° 3.49: Análisis químico de productos – Batch N°04.	109
Tabla N° 3.50: Análisis químico de cabeza – Solución Barren N°3.	112
Tabla N° 3.51: Análisis químico de cabeza ICP metales totales – Solución Barren N°3.	113
Tabla N° 3.52: Acondicionamiento de pH – Continuo N°01.	114
Tabla N° 3.53: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Continuo N°01.	115
Tabla N° 3.54: Neutralización de pH – Continuo N°01.	115
Tabla N° 3.55: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Continuo N°01.	116
Tabla N° 3.56: Etapa de coagulación – Continuo N°01.	116
Tabla N° 3.57: Etapa de clarificación – Continuo N°01.	117
Tabla N° 3.58: Análisis químico de productos – Continuo N°01.	117
Tabla N° 3.59: Acondicionamiento de pH – Continuo N°02.	118
Tabla N° 3.60: Neutralización de pH – Continuo N°02.	119
Tabla N° 3.61: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Continuo N°02.	119
Tabla N° 3.62: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Continuo N°02.	120
Tabla N° 3.63: Etapa de coagulación – Continuo N°02.	120
Tabla N° 3.64: Etapa de clarificación – Continuo N°02.	121
Tabla N° 3.65: Análisis químico de productos – Continuo N°02.	121
Tabla N° 3.66: Acondicionamiento de pH – Continuo N°03.	122
Tabla N° 3.67: Etapa de oxidación con H ₂ O ₂ – Continuo N°03.	123
Tabla N° 3.68: Neutralización de pH – Continuo N°03.	124
Tabla N° 3.69: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Continuo N°03.	124
Tabla N° 3.70: Etapa de coagulación – Continuo N°03.	125
Tabla N° 3.71: Etapa de clarificación – Continuo N°03.	125
Tabla N° 3.72: Análisis químico de productos – Continuo N°03.	126
Tabla N° 3.73: % de sólidos - Continuo N°03.	129
Tabla N° 3.74: Velocidad de sedimentación – Continuo N°03.	129

Tabla N° 3.75: Consumo de reactivos de la mejor prueba HLC-T032.....	130
Tabla N° 4.1: Resumen del consumo de reactivos – Pilotaje a nivel industrial.....	135
Tabla N° 4.2: Ratios de consumo de reactivos – Pilotaje a nivel industrial.....	135
Tabla N° 4.3: Condiciones y especificaciones de los reactivos utilizados a nivel industrial. ...	137
Tabla N° 4.4: Condiciones operativas de PTE – Pilotaje a nivel industrial.....	137
Tabla N° 4.5: Tiempo de residencia según PTE a un flujo 120 m ³ /hr.....	138
Tabla N° 4.6: Análisis químico de solución tratada a nivel industrial.....	140
Tabla N° 4.7: Análisis químico ICP metales totales de solución tratada.....	140
Tabla N° 4.8: Análisis químico ICP metales disueltos – solución tratada.....	140
Tabla N° 4.9: Análisis de toxicidad de solución tratada – La Arena S.A.....	141
Tabla N° 4.10: % de remoción del amoníaco y sulfatos.....	141
Tabla N° 4.11: % de Remoción de los principales metales de alto contenido en ppm.....	142
Tabla N° 4.12: Costos de reactivos y energía eléctrica en la PTE.....	143
Tabla N° 4.13: Costos de reactivos según criterio de diseño.....	144
Tabla N° 4.14: Costos de reactivos según problema no optimizado.....	144
Tabla N° 4.15: Costos de reactivos según investigación aplicada.....	145

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica N° 3.1: Efectos Estandarizados % Rem. CN Total – Exploratoria.	72
Gráfica N° 3.2: Diagrama de Pareto % Rem. CN Total – Exploratoria.	72
Gráfica N° 3.3: Gráfica de Efectos Principales % Rem. CN Total – Exploratoria.	73
Gráfica N° 3.4: Grafica de Interacción % Rem. CN Total – Exploratoria.	73
Gráfica N° 3.5: Efectos Estandarizados % Rem. Hg – Exploratoria.	77
Gráfica N° 3.6: Diagrama de Pareto % Rem. Hg – Exploratoria.	78
Gráfica N° 3.7: Efectos Principales % Rem. Hg – Exploratoria.	78
Gráfica N° 3.8: Gráfica de Interacción % Rem. Hg – Exploratoria.	79
Gráfica N° 3.9: Efectos estandarizados sobre el %Rem. CNT – Exploratoria Contínua.	85
Gráfica N° 3.10: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. CNT – Exploratoria Contínua.	86
Gráfica N° 3.11: Diagrama de Efectos estandarizados sobre el %Rem. As – Exploratoria Contínua.	86
Gráfica N° 3.12: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. As – Exploratoria Contínua.	87
Gráfica N° 3.13: Diagrama de Efectos estandarizados sobre el %Rem. Cu – Exploratoria Contínua.	87
Gráfica N° 3.14: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. Cu – Exploratoria Contínua.	88
Gráfica N° 3.15: Diagrama de Efectos estandarizados sobre el %Rem. Hg – Exploratoria Contínua.	88
Gráfica N° 3.16: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. Hg – Exploratoria Contínua.	89
Gráfica N° 3.17: Contenido en ppm – Exploratoria Contínua.	90
Gráfica N° 3.18: % de remoción – Exploratoria Contínua.	90
Gráfica N° 3.19: Comportamiento del CN (total) – Batch N°04.	110
Gráfica N° 3.20: Comportamiento del arsénico – Batch N°04.	111
Gráfica N° 3.21: Comportamiento del cobre – Batch N°04.	111
Gráfica N° 3.22: Comportamiento del mercurio – Batch N°04.	112
Gráfica N° 3.23: Comportamiento del CN (total) – Continuo N°03.	127
Gráfica N° 3.24: Comportamiento del arsénico – Continuo N°03.	127
Gráfica N° 3.25: Comportamiento del cobre – Continuo N°03.	128
Gráfica N° 3.26: Comportamiento del mercurio – Continuo N°03.	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: PTE de la Empresa Minera La Arena S.A.	2
Figura N° 1.2: Efectos principales de las variables H ₂ O ₂ , CuSO ₄ y tiempo de residencia sobre el CN libre (ppm).....	11
Figura N° 1.3: Efectos combinados de las variables H ₂ O ₂ , CuSO ₄ y tiempo de residencia sobre la concentración de CN libre (ppm).	12
Figura N° 1.4: Efectos principales del FeCl ₃ y NaSH en la remoción del Cu.	14
Figura N° 1.5: Efectos principales del FeCl ₃ y NaSH en la remoción del Fe.	15
Figura N° 1.6: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico.....	21
Figura N° 2.1: Pad de lixiviación – La Arena S.A.	26
Figura N° 2.2: Poza de Grandes Eventos – La Arena S.A.....	26
Figura N° 2.3: PLS (Poza de Solución Pregnant) – La Arena S.A.	27
Figura N° 2.4: Columnas de adsorción – La Arena S.A.	29
Figura N° 2.5: Etapas de adsorción – La Arena S.A.	29
Figura N° 2.6: Etapas de lavado y regeneración térmica – La Arena S.A.	30
Figura N° 2.7: Hornos de fundición basculante – La Arena S.A.	31
Figura N° 2.8: Horno de retorta – La Arena S.A.....	31
Figura N° 2.9: Etapas de fundición – La Arena S.A.....	32
Figura N° 2.10: Vista de columnas de lixiviación en el laboratorio metalúrgico.	33
Figura N° 2.11: Análisis granulométrico para prueba en columnas.	33
Figura N° 2.12: Descarga de mineral de las columnas de lixiviación.....	34
Figura N° 2.13: Equipos usados en la preparación mecánica.	35
Figura N° 2.14: Agitadores de botellas.	35
Figura N° 2.15: Concentración Vs Tiempo de eliminación de CN ⁻	42
Figura N° 3.1: Puntos de muestreo – Efluente solución barren.	59
Figura N° 3.2: Preparación y homogenización de muestras de solución barren.	59
Figura N° 3.3: Plan de pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio (HLC).	68
Figura N° 3.4: Selección del floculante de menor turbidez.	93
Figura N° 3.5: Medición de turbidez a 5 min. – Etapa de clarificación.	93
Figura N° 3.6: Medición de turbidez a 10 min. – Etapa de clarificación.	94
Figura N° 3.7: Preparación de floculantes al 0,1%.....	94

Figura N° 4.1: Solución tratada – Poza Clarificadora de capacidad 10000 m ³	139
Figura N° 4.2: Solución clarificada – Poza Clarificadora de capacidad 10000 m ³	139
Figura N° 4.3: Distribución Probabilística.....	146
Figura N° 4.4: Alternativa de dosificación óptima aplicada.....	149

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N° 1: Recepción de muestras de solución y hojas MSDS.	155
Fotografía N° 2: Homogenización y formación de un compuesto representativo.	155
Fotografía N° 3: Toma de alícuotas para análisis químico.	155
Fotografía N° 4: Análisis de cianuro libre In Situ – Solución Cabeza.	156
Fotografía N° 5: Medición de pH y turbidez (NTU's).....	156
Fotografía N° 6: Acondicionamiento de equipos y área de trabajo.	156
Fotografía N° 7: Preparación de lechada de cal al 10%.....	157
Fotografía N° 8: Preparación de NaOH, NaSH y CuSO ₄ .5H ₂ O al 10 %.	157
Fotografía N° 9: Reactivo ácido sulfúrico diluido al 10% y peróxido de hidrógeno al 50%. ...	157
Fotografía N° 10: Control de parámetros en destrucción del cianuro.	158
Fotografía N° 11: Control de parámetros en la etapa de precipitación.	158
Fotografía N° 12: Control de parámetros en etapa de coagulación y clarificación.	158
Fotografía N° 13: Medición de cianuro libre por titulación – In Situ.	159
Fotografía N° 14: Dosificación de reactivos e inyección de aire.	159
Fotografía N° 15: Evaluación de floculantes y medición de turbidez.....	159
Fotografía N° 16: Toma de alícuota clarificada para análisis químico.	160
Fotografía N° 17: Filtración de muestras tratadas.	160
Fotografía N° 18: Preparación de muestras para envío a análisis químico.	161
Fotografía N° 19: Acondicionamiento para las pruebas en continuo.....	161
Fotografía N° 20: Desarrollo de las pruebas en continuo y obtención del precipitado final.	161
Fotografía N° 21: Carné de Identificación de La Arena S.A.	162
Fotografía N° 22: Trabajos en laboratorio metalúrgico.	162
Fotografía N° 23: Pilotaje a Nivel Industrial en la PTE.	162
Fotografía N° 24: Sustentación del Pilotaje a Nivel Industrial en La Arena S.A.....	163
Fotografía N° 25: Incentivo parte del Superintendente Ing. R. Velásquez.	163

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Como consecuencia de las precipitaciones pluviales, se captan en el pad y pozas volúmenes adicionales de agua de lluvia que van incrementando el inventario de solución en el proceso, acumulándose en las pozas diseñadas (Poza de Solución Rica – PLS y Poza de Grandes Eventos – PGE). A fin de evitar rebalse de soluciones de estas pozas, para los primeros años de operación (2010-2011) se construyó una Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE) de capacidad de 125 m³/h y para los últimos años (2014-2015) de operación se amplió una capacidad de 250 m³/h.

Descripción de la Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE)

En la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. se usa el método de detoxificación con peróxido de hidrógeno más sulfato de cobre pentahidratado como catalizador, para precipitar los metales en suspensión se usa sulfhidrato sódico más cloruro férrico y finalmente para clarificar se usa el floculante

aniónico; esta planta fue diseñada por la Empresa HLC INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C. (HLC) bajo el siguiente detalle:

Figura N° 1.1: PTE de la Empresa Minera La Arena S.A.



Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2014, La Arena S.A.

El diseño contempla dos circuitos en paralelo de $125 \text{ m}^3/\text{h}$ cada uno, los cuales se podrán regular al flujo requerido en operación, formado cada circuito por cuatro tanques de degradación (180-TK-002 @ 005 y 180-TK-007 @ 010) y uno de acondicionamiento (180-TK-001 y 180-TK-006), con una capacidad de $67,9 \text{ m}^3$ y $8,2 \text{ m}^3$ respectivamente. Cada sistema tendrá su respectivo sistema de agitación y dosificación de reactivos según diagrama de flujo (Figura N°1.1)

La solución barren a tratar se toma a la salida de las mallas estacionarias DSM, ubicados a la descarga de los circuitos de adsorción de la Planta ADR que son bombeados por gravedad a la Planta de Tratamiento de Efluentes. El tiempo total de reacción de oxidación de los complejos de cianuro y la reacción con los metales pesados es de aproximadamente 128 minutos, para luego ser precipitados en la poza de clarificación con ayuda del floculante aniónico. De esta manera se podrá controlar la cantidad de cianuro total, cianuro wad y cianuro libre que contendrá la solución barren a fin de obtener una solución tratada con valores por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP).

En la Planta de Tratamiento de Efluentes cabe precisar que se cuenta con un tanque para el almacenamiento de peróxido de hidrógeno – H_2O_2 al 50% el cual tiene una capacidad operativa de $20,9 \text{ m}^3$, y un tanque de $6,0 \text{ m}^3$ de capacidad operativa para la preparación de sulfato de cobre pentahidratado – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al 2,5%.

Para la preparación y dosificación de los reactivos químicos, se usan:

- Un tanque de $6,9 \text{ m}^3$ de volumen de operación para la preparación del sulfhidrato sódico – NaSH al 10%.
- Un tanque de $3,6 \text{ m}^3$ de volumen de operación para la preparación de hidróxido de sodio – NaOH al 30%.
- Un tanque de $3,2 \text{ m}^3$ de volumen de operación para la preparación de floculante aniónico al 0,1%.
- Un tanque IBC de $1,0 \text{ m}^3$ de volumen de operación para el almacenamiento de cloruro férrico – FeCl_3 al 42%.

Estos reactivos se alimentan con bombas dosificadoras al ingreso de la solución barren a cada tanque provenientes de los DSM ubicados a la salida de los circuitos de adsorción, pasando la solución cianurada al primer tanque del tratamiento de efluentes 180-TK-001/006 para mezclarse con sulfato de cobre pentahidratado – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al 2,5%, que sirve para catalizar la degradación de complejos cianurados con un tiempo de acondicionamiento de 3 minutos.

A su rebose del tanque anterior, se dosifica el peróxido de hidrógeno – H_2O_2 al 50%, para reaccionar con los complejos de cianuro por un espacio de 30 minutos en el segundo tanque 180-TK-002/007.

Al rebose del tanque anterior, se adiciona nuevamente sulfato de cobre pentahidratado – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, para acelerar la reacción de detoxificación y continuar la reacción con los complejos de cianuro por un tiempo adicional de 30 minutos en el tanque 180-TK-003/008.

Al rebose del tanque anterior, se continua con la dosificación de cloruro férrico – FeCl_3 al 42% con el objetivo de precipitar el arsénico As y continuar las reacciones con los complejos de cianuro por un tiempo adicional de 30 minutos en el tanque 180-TK-004/009.

Finalmente, del rebose del tanque anterior, se continúa dosificando sulfhidrato sódico al 10% con el objetivo de precipitar mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu) y zinc (Zn) en el quinto tanque, por un espacio de 30 minutos adicionales.

La solución tratada pasa luego a la poza de sedimentación, previa a la cual se le dosifica el floculante aniónico, con un tiempo de clarificación de 12 horas. La solución clarificada es bombeada hacia las columnas conteniendo carbón activado con un flujo de $200 \text{ m}^3/\text{h}$, luego de acuerdo a los controles químicos podrá ser vertido al medio ambiente. Existirá la opción de retornar a la Planta de Tratamiento de Efluentes o ser direccionado a la Poza de Grandes Eventos (PGE) dependientemente de la calidad de tratamiento.

El material sedimentado en la poza de clarificación, es trasladado por intermedio de una bomba de lodos hacia la pila de lixiviación del mineral que ya fue procesado.

Las partes y equipos que comprenden la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. se describen en la siguiente tabla:

Tabla N° 1.1: Codificación de equipos PTE La Arena S.A.

Descripción	Código
Tanque N°1 (circuito 01)	180-TK-001
Tanque N°2 (circuito 01)	180-TK-002
Tanque N°3 (circuito 01)	180-TK-003
Tanque N°4 (circuito 01)	180-TK-004
Tanque N°5 (circuito 01)	180-TK-005
Tanque N°6 (circuito 02)	180-TK-006
Tanque N°7 (circuito 02)	180-TK-007
Tanque N°8 (circuito 02)	180-TK-008
Tanque N°9 (circuito 02)	180-TK-009
Tanque N°10 (circuito 02)	180-TK-010
Tanque IBC de FeCl ₃	130-TK-006
Tanque de Almacenamiento de H ₂ O ₂	130-TK-005
Tanque de Preparación de CuSO ₄ .5H ₂ O	130-TK-007
Tanque de Preparación de Floculante	130-TK-008
Tanque de Preparación de NaSH	130-TK-009
Tanque de Preparación de NaOH	130-TK-010
Bomba Dosificadora de H ₂ O ₂	130-PU-011A/B
Bomba Dosificadora de FeCl ₃	130-PU-012A/B
Bomba Dosificadora de CuSO ₄ .5H ₂ O	130-PU-013A/B/C/D
Bomba Dosificadora de Floculante	130-PU-014A/B
Bomba Dosificadora de NaSH	130-PU-015A/B
Bomba Dosificadora de NaOH	130-PU-016A/B
Bomba de Transferencia de H ₂ O ₂	130-PU-010
Agitador de Tanque N°1	180-AG-001
Agitador de Tanque N°2	180-AG-002
Agitador de Tanque N°3	180-AG-003
Agitador de Tanque N°4	180-AG-004
Agitador de Tanque N°5	180-AG-005
Agitador de Tanque N°6	180-AG-006
Agitador de Tanque N°7	180-AG-007
Agitador de Tanque N°8	180-AG-008
Agitador de Tanque N°9	180-AG-009
Agitador de Tanque N°10	180-AG-010
Agitador de Tanque de Preparación de CuSO ₄ .5H ₂ O	130-AG-004
Agitador de Tanque de Preparación de Floculante	130-AG-005
Agitador de Tanque de Preparación de NaSH	130-AG-006
Agitador de Tanque de Preparación de NaOH	130-AG-007
Mezclador estático	180-ME-001/002
Bomba de recirculación y descarga	180-PU-001A/B
Bomba de transferencia de lodos	180-PU-002
Columna con carbón activado N° 1	180-TK-011
Columna con carbón activado N° 2	180-TK-012
Malla estacionaria DSM	180-SC-001

Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2014, La Arena S.A.

El 28 de febrero del 2015 la empresa Quimtia S.A. realizó pruebas a nivel laboratorio simulando el proceso descrito para la destrucción del cianuro, dando resultados por encima de los Límites Máximos Permisibles y aumentando los valores de cianuro wad lo cual se debe a que el cobre (Cu) es un cianicida, y reacciona con el cianuro. A continuación, se detalla las pruebas realizadas:

Tabla N° 1.2: Pruebas de botellas a nivel laboratorio ejecutados por Quimtia S.A.

Bottle Roll Test N°1:				Consumo de Reactivos		
Tiempo de agitación (min)	Volumen solución barren (L)	CN⁻_L (ppm)	pH	H₂O₂ (gr) al 50%	FeCl₃ (gr) al 40%	NaSH (gr) al 10%
0	5,00	26,4	10,5	2,0	0,5	0,4
20	4,99	3,4	9,6			
40	4,98	1,0	9,5			
60	4,97	<0,5	9,3			
90	4,96	<0,5	9,2			
120	4,95	<0,5	9,0			
Bottle Roll Test N°2:				Consumo de Reactivos		
20	4,99	1,6	9,4	4,0	0,5	0,4
40	4,98	<0,5	9,3			
60	4,97	<0,5	9,2			
90	4,96	<0,5	9,1			
120	4,95	<0,5	9,0			
Bottle Roll Test N°3:				Consumo de Reactivos		
20	4,99	1,0	9,5	6,0	0,5	0,4
40	4,98	<0,5	9,3			
60	4,97	<0,5	9,2			
90	4,96	<0,5	9,1			
120	4,95	<0,5	8,8			
Bottle Roll Test N°4:				Consumo de Reactivos		
20	4,99	<0,5	9,4	8,0	0,5	0,4
40	4,98	<0,5	9,2			
60	4,97	<0,5	9,1			
90	4,96	<0,5	8,9			
120	4,95	<0,5	8,7			
Bottle Roll Test N°5:				Consumo de Reactivos		
20	4,99	<0,5	9,4	10,0	0,5	0,4
40	4,98	<0,5	9,2			
60	4,97	<0,5	9,0			
90	4,96	<0,5	8,8			
120	4,95	<0,5	8,5			

Fuente: Pruebas Quimtia, 2015, La Arena S.A.

Los ratios de las dosificaciones de los reactivos a nivel laboratorio ejecutadas por Quimtia S.A. se especifican a continuación:

Tabla N° 1.3: Ratios de consumo de reactivos a nivel laboratorio – Quimtia S.A.

Ratios de consumo de reactivos (mg/L)			
H₂O₂	FeCl₃	NaSH	Floculante
2.000,0	100,0	80,0	2,0

Fuente: Pruebas Quimtia, 2015, La Arena S.A.

Cabe resaltar que a partir del Bottle Roll Test N°5 debido a la destrucción completa del cianuro a nivel laboratorio, Quimtia S.A. los plasma a nivel industrial en la Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE).

El día 7 de marzo del 2015 se arrancó la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. con un caudal de 50 m³/hr sólo un circuito, teniendo en cuenta el manual de operación y las condiciones de dosificación de los reactivos en función de las pruebas metalúrgicas ejecutadas en su momento. El flujo total inicio fue de 1020 m³. Se trabajó por un lapso de 5.5 horas, lográndose acumular un flujo total de 1300 m³.

Se trató un volumen total de 280 m³ de solución cianurada barren conteniendo 25 ppm de cianuro libre. Cabe resaltar que el análisis del cianuro libre de la solución tratada se realizó por el método cualitativo (titulación con nitrato de plata - AgNO₃).

El consumo de energía fue de 17 Kw/m³ y los ratios de consumo de reactivos fueron lo siguiente:

Tabla N° 1.4: Resumen del consumo de reactivos a nivel piloto (criterio de diseño).

Volumen tratado (m ³)	Ratios de consumo de reactivos				Energía (Kwh)	
	H ₂ O ₂ (Kg/m ³)	FeCl ₃ (Kg/m ³)	NaSH (Kg/m ³)	Floculante (kg/m ³)	Acum.	Kw/m ³
280	2,000	0,080	0,100	0,002	4.873	17

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

Quimtia S.A. realizó una toma de muestra representativa de tratamiento que fueron enviadas a la empresa SGS del Perú S.A.C. para su análisis químico. Los resultados de tratamiento fueron:

Tabla N° 1.5: Resultados de análisis químico de SGS del Perú S.A.C.

SGS del Peru S.A.C.						
Division Laboratorio						
Departamento Medio Ambiente						
Orden:	MA1200739					
Cliente:	QUIMTIA S.A					
Numero de Muestras:	1					
Lugar y Fecha de Rec	13-mar-14					
Fecha de Reporte:	19-Mar-14					
Elemento	Unid.	Muestra LA		Elemento	Unid.	Muestra LA
		11/03/2014				11/03/2014
B	mg/L	0.01		Mo	mg/L	0.0135
Ag	mg/L	0.0374		Na	mg/L	227.56
Al	mg/L	7.44		Nb	mg/L	<0.0005
As	mg/L	2.081		Ni	mg/L	0.061
Ba	mg/L	0.032		P	mg/L	0.6
Be	mg/L	<0.0001		Pb	mg/L	0.028
Bi	mg/L	0.00079		Rb	mg/L	0.0108
Ca	mg/L	51.064		Sb	mg/L	0.1944
Cd	mg/L	0.0006		Se	mg/L	0.02
Ce	mg/L	0.00225		Sn	mg/L	0.0061
Co	mg/L	0.0797		Sr	mg/L	0.0889
Cr	mg/L	0.005		Ta	mg/L	<0.0007
Cs	mg/L	0.0024		Te	mg/L	0.002
Cu	mg/L	16.233		Th	mg/L	0.00012
Fe	mg/L	5.062		Ti	mg/L	0.01
Ga	mg/L	0.00135		Tl	mg/L	0.00074
Ge	mg/L	0.0007		U	mg/L	0.00162
Hf	mg/L	0.00005		V	mg/L	0.006
Hg	mg/L	0.6245		W	mg/L	0.0047
K	mg/L	3.5		Yb	mg/L	0.00006
La	mg/L	0.0011		Zn	mg/L	0.276
Li	mg/L	0.0024		Zr	mg/L	0.0018
Lu	mg/L	<0.00002		CN Total	mg/L	0.552
Mg	mg/L	0.184		CN Wad	mg/L	35.633
Mn	mg/L	0.1277				

Fuente: Análisis Químico SGS, 2015, La Arena S.A.

Se logró resultados muy por encima de los LMP tal como se puede observar para el caso del cianuro wad (CN^- wad) y metales como aluminio (Al), mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu) y fierro (Fe).

Lográndose identificar un problema in situ a partir de la posición de dosificación de reactivos, el flujo de las bombas dosificadoras y la preparación de estos reactivos. Así mismo, se puede identificar que estos flujos de dosificación NO son los óptimos para el proceso debido a que es importante tener en cuenta los tiempos de agitación en los tanques de degradación (tiempo de retención) y la posición de dosificación de los reactivos, pues estos también van a incidir en el consumo de los mismos.

Así mismo con el objetivo de lograr bajar el contenido de metales y cianuro total por debajo de los Límites Máximos Permisibles, el área de Investigaciones Metalúrgicas en ese entonces La Arena S.A., realizó el siguiente diseño de detoxificación a nivel laboratorio:

1.1.1. Diseño de Detoxificación a Nivel Laboratorio.

Para realizar la cantidad necesaria de pruebas o experimentos y obtener resultados que permitan tener un buen grado de confianza, se realizó las pruebas correspondientes a un diseño factorial.

En las siguientes tablas se puede observar las variables y los niveles del diseño experimental aplicados en la etapa de detoxificación:

Tabla N° 1.6: Variables del diseño de detoxificación – Determinación del problema.

Variable	Factores
Dependiente	Grado de Detoxificación (CN _L)
Independiente	- Dosificación de H ₂ O ₂ al 50%
	- Dosificación de CuSO ₄ .5H ₂ O
	- Tiempo de Residencia (min)

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

Tabla N° 1.7: Factores y niveles del diseño de detoxificación – Determinación del problema.

Factores	Niveles					
	1		2		3	
- Concentración de H ₂ O ₂ (ml/L)	0,40		0,60		0,80	
- Concentración de CuSO ₄ .5H ₂ O (ml/L)	0,05		0,10		0,15	
- Tiempo de residencia (minutos)	1	2	3	4	5	6
	15´	30´	45´	60´	75´	90´

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

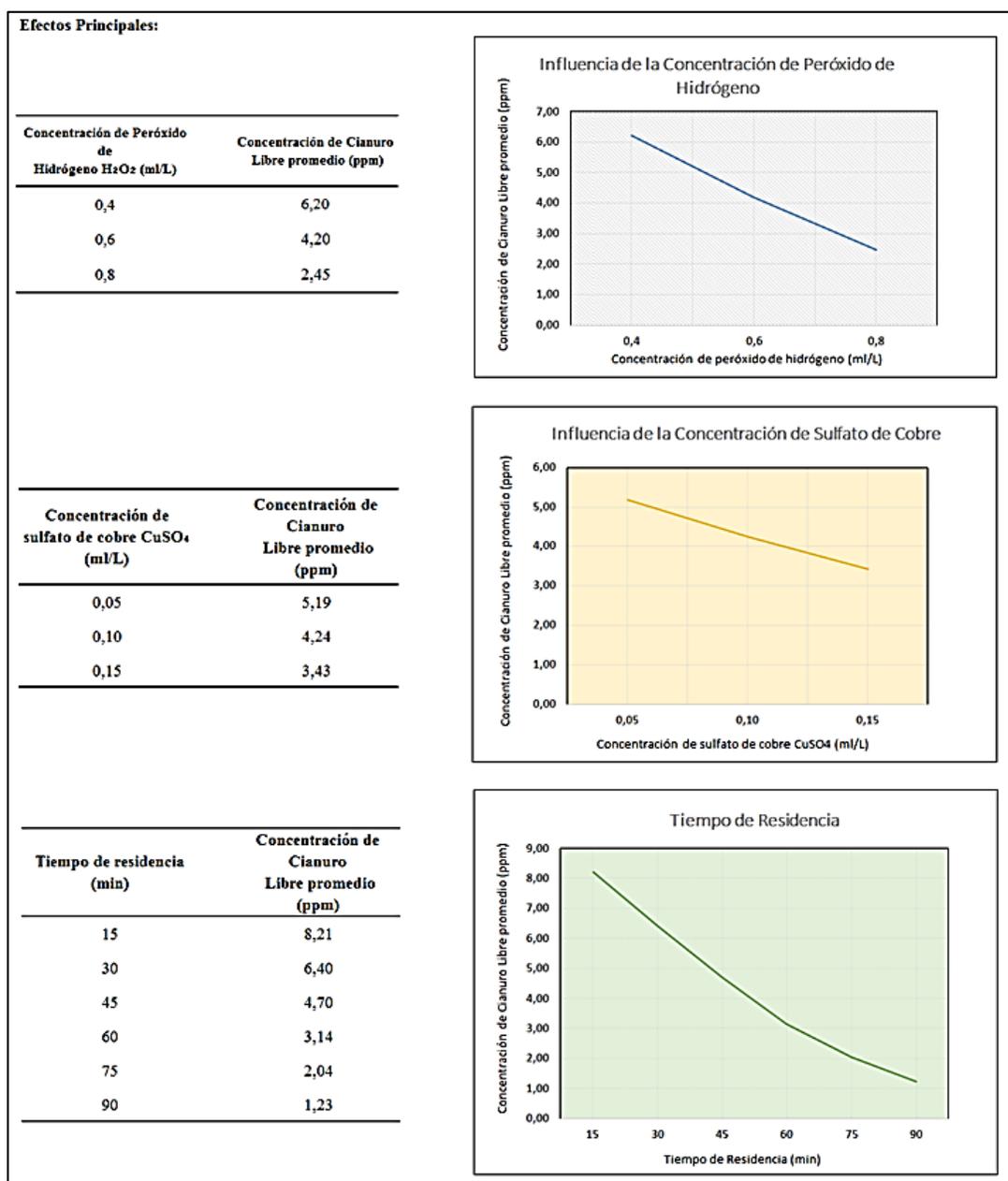
Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla N° 1.8: Resultados obtenidos de la prueba de detoxificación de cianuro – Problema.

Conc. de H ₂ O ₂ (ml/L)	Conc. de CuSO ₄ .5H ₂ O (ml/L)	Tiempo de residencia (min)							% Remoción	
		0	15´	30´	45´	60´	75´	90´	Yi	Yj
0,40	0,05	22,10	11,70	10,76	7,80	5,46	4,21	3,43	91,76	88,01
	0,10	22,10	10,92	8,58	6,55	4,84	3,59	2,65		
	0,15	22,10	9,32	7,02	5,77	4,37	2,81	1,87		
0,60	0,05	22,10	9,67	7,96	5,77	3,74	2,65	1,72	94,83	95,76
	0,10	22,10	8,11	6,24	4,52	2,81	1,87	0,78		
	0,15	22,10	6,86	4,84	3,90	2,50	1,40	0,31		
0,80	0,05	22,10	7,02	4,99	3,12	2,18	0,94	0,31	96,71	99,53
	0,10	22,10	5,93	3,90	2,81	1,56	0,62	0,00		
	0,15	22,10	4,37	3,28	2,03	0,78	0,31	0,00		
Promedio	Yk	22,10	8,21	6,40	4,70	3,14	2,04	1,23	94,43	
Variable Respuesta:		Concentración de CN Libre (ppm)								

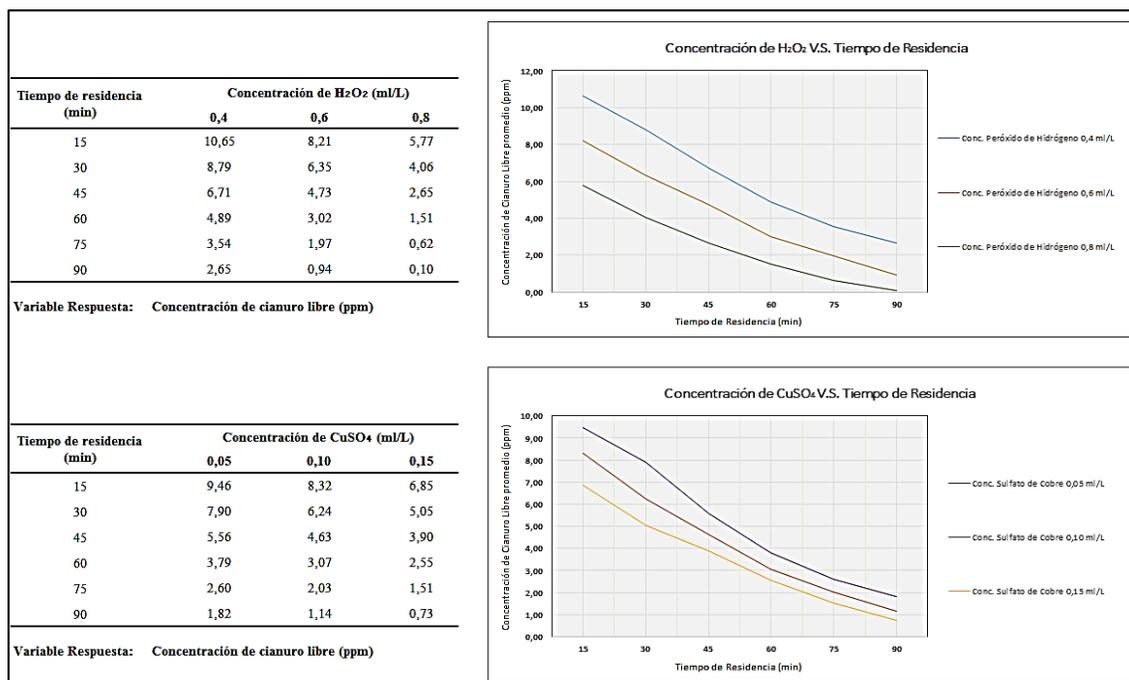
Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

Figura N° 1.2: Efectos principales de las variables H_2O_2 , $CuSO_4$ y tiempo de residencia sobre el CN libre (ppm).



Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2015, La Arena S.A.

Figura N° 1.3: Efectos combinados de las variables H_2O_2 , $CuSO_4$ y tiempo de residencia sobre la concentración de CN libre (ppm).



Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2015, La Arena S.A.

1.1.2. Diseño de Precipitación a Nivel Laboratorio.

Asimismo, en las siguientes tablas se puede observar las variables y los niveles del diseño experimental aplicados en la etapa de precipitación:

Tabla N° 1.9: Variables del diseño de precipitación – Determinación del problema.

Variable	Factores
Dependiente	Grado de Precipitación (ppm)
Independiente	- Dosificación de NaSH al 10%
	- Dosificación de $FeCl_3$ al 42%
	- Tiempo de Residencia (min)

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

Tabla N° 1.10: Factores y niveles del diseño de precipitación – Determinación del problema.

Factores	Niveles		
	1	2	3
- Concentración de FeCl ₃ (ml/L)	0,1	0,2	0,3
- Concentración de NaSH (ml/L)	0,08	0,10	0,12
- Tiempo de residencia (min)	1		
	90´		

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

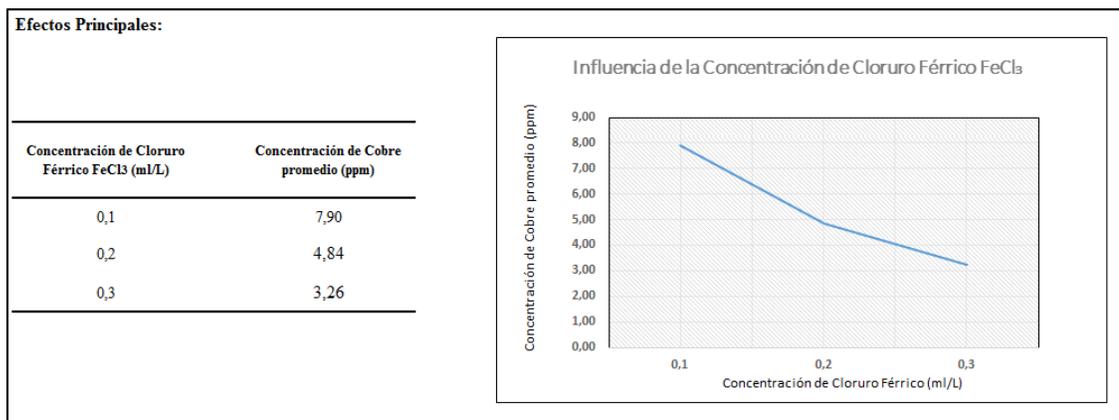
Una vez tratado las muestras se dosificó el floculante aniónico preparado al 0,10 % a un ratio de consumo de 2 ppm (según criterio de diseño de Planta de Tratamiento de Efluentes – PTE) a fin de clarificar la solución tanto a nivel laboratorio y a escala industrial. Los resultados a nivel laboratorio se especifican a continuación:

Tabla N° 1.11: Concentraciones de Cu Vs Tiempo de residencia – Determinación del problema.

Conc. de FeCl ₃ (ml/L)	Conc. de NaSH (ml/L)	Tiempo de residencia (min)		% Remoción	
		0´	90´	Yi	Yj
0,10	0,08	12,47	5,52	55,73	67,34
	0,10	12,47	3,51	71,85	
	0,12	12,47	3,04	75,62	
0,20	0,08	12,47	1,95	84,36	86,23
	0,10	12,47	2,03	83,72	
	0,12	12,47	1,17	90,62	
0,30	0,08	12,47	0,35	97,19	96,82
	0,10	12,47	0,41	96,71	
	0,12	12,47	0,43	96,55	
Óptimo	Yk	12,47	2,04	83,64	
Variable Respuesta:		Concentración de Cu (ppm)			

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A.

Figura N° 1.4: Efectos principales del $FeCl_3$ y $NaSH$ en la remoción del Cu .



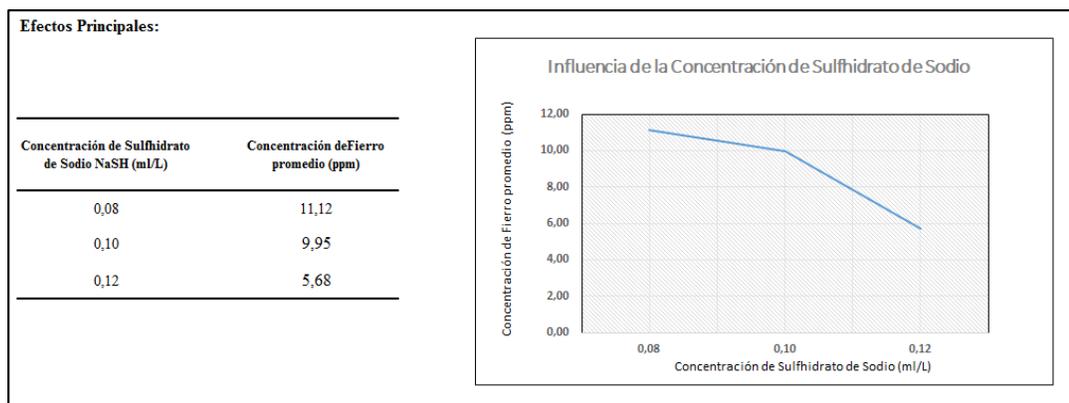
Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2015, La Arena S.A.

Tabla N° 1.12: Concentraciones de Fe Vs Tiempo de residencia – Determinación del problema.

Conc. de $FeCl_3$ (ml/L)	Conc. De $NaSH$ (ml/L)	Tiempo de residencia (min)		% Remoción	
		0	90'	Y_i	Y_j
0,10	0,08	8,31	5,45	34,42	39,95
	0,10	8,31	5,04	39,35	
	0,12	8,31	4,48	46,09	
0,20	0,08	8,31	4,26	48,74	50,42
	0,10	8,31	4,67	43,80	
	0,12	8,31	3,43	58,72	
0,30	0,08	8,31	0,96	88,45	89,05
	0,10	8,31	0,75	90,97	
	0,12	8,31	1,02	87,73	
Óptimo	Y_k	8,31	3,34	59,81	
Variable Respuesta:		Concentración de Fe (ppm)			

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A

Figura N° 1.5: Efectos principales del $FeCl_3$ y $NaSH$ en la remoción del Fe .



Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2015, La Arena S.A.

Los ratios de las dosificaciones de los reactivos a nivel laboratorio en ese momento se especifican a continuación:

Tabla N° 1.13: Ratios de reactivos encontrados a nivel laboratorio – Problema.

Ratios de consumo de reactivos (g/m^3)				
H_2O_2	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	$NaSH$	$FeCl_3$	Floculante
788,97	12,75	50,00	93,00	0,132

Fuente: Elaboración propia, 2015, La Arena S.A

A continuación, se presenta las condiciones y resultados de tratamiento a escala industrial:

Tabla N° 1.14: Registro histórico de tratamiento de efluentes de la La Arena S.A. (2015-2016).

FECHA	SOLUCION TRATADA (m³)	CONSUMO DE REACTIVOS (Kg)							COSTO DE REACTIVOS (\$/Kg)							ENERGIA		COSTO	
		H ₂ O ₂	CuSO ₄	NaSH	FeCl ₃	FLOCULANTE	NaCN	CARBON ACTIVADO	H ₂ O ₂	CuSO ₄	NaSH	FeCl ₃	FLOCULANTE	NaCN	CARBON ACTIVADO	(KW-Hr)	(\$/KW-Hr)	\$	(\$/m³)
5/3/15	700	552	8	35	65	0,09	33	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		261	0,314	813	1,16	
6/3/15	1071	845	13	54	100	0,14	51	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		399	0,314	1.244	1,16	
7/3/15	1441	1.137	17	72	134	0,19	68	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		536	0,314	1.673	1,16	
8/3/15	942	743	11	47	88	0,12	44	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		351	0,314	1.094	1,16	
9/3/15	1459	1.151	17	73	136	0,19	69	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		543	0,314	1.694	1,16	
10/3/15	1403	1.107	16	70	130	0,19	66	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		522	0,314	1.629	1,16	
11/3/15	1024	808	12	51	95	0,14	48	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		381	0,314	1.189	1,16	
12/3/15	780	615	9	39	73	0,10	37	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		290	0,314	906	1,16	
13/3/15	1180	931	14	59	110	0,16	56	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		439	0,314	1.370	1,16	
TOTAL	10.000	7.890	118	500	930	1,32	472								3722	0,314	11.613	1,16	
21/3/15	2360	1.333	26	118	219	0,31	111	2000	0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189	3,25	878	0,314	8.855	3,75
22/3/15	3284	1.854	36	164	305	0,43	155		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		1222	0,314	3.277	1,00
23/3/15	3769	2.128	42	188	351	0,50	178		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		1403	0,314	3.761	1,00
24/3/15	4190	2.366	46	210	390	0,55	198		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		1559	0,314	4.181	1,00
25/3/15	2573	1.453	28	129	239	0,34	121		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		958	0,314	2.567	1,00
26/3/15	2200	1.242	24	110	205	0,29	104		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		819	0,314	2.195	1,00
27/3/15	646	365	7	32	60	0,09	30		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		240	0,314	645	1,00
28/3/15	2048	1.156	23	102	190	0,27	97		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		762	0,314	2.044	1,00
29/3/15	2040	1.152	23	102	190	0,27	96		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		759	0,314	2.036	1,00
30/3/15	2002	1.130	22	100	186	0,26	94		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		745	0,314	1.998	1,00
31/3/15	2107	1.190	23	105	196	0,28	99		0,72	2,69	1,15	2,54	4,5	3,189		784	0,314	2.102	
TOTAL	27.219	15.368	301	1.361	2531	3,59	1.284	2000							10130		33.660		
	37.219	23.258	418	1.861	3.461	4,91	1.756	2000							13851		45.273	1,22	

Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2015-2016, La Arena S.A.

Tabla N° 1.15: Resumen de costos de la operación de la PTE de La Arena S.A. (2015-2016).

COSTO DE MANO DE OBRA			
PERSONAL	JORNAL (\$)		(\$/m3)
Operador de planta tratamiento efluentes 1	699		0,02
Operador de planta tratamiento efluentes 2	699		0,02
Operador de planta tratamiento efluentes 3	699		0,02
Supervisor	1.908		0,05
TOTAL	4.005		0,11
COSTO ANALISIS QUIMICO			
PERSONAL	JORNAL (\$)		(\$/m3)
Global	2.000		0,05
TOTAL	2.000		0,05
OTROS COSTOS			
PERSONAL	JORNAL (\$)		(\$/m3)
Global	2.000		0,05
TOTAL	2.000		0,05
RESUMEN			
CONCEPTO DE COSTOS	(\$)	VOLUMEN TRATADO (m ³)	(\$/m ³)
Reactivos	45.273	37.219	1,22
Mano de Obra	4.005		0,11
Análisis Químico	2.000		0,05
Otros	2.000		0,05
TOTAL	53.278		37.219

Fuente: Planta de Tratamiento de Efluentes, 2015, La Arena S.A.

Se llegó a optimizar el consumo de reactivos, pero NO se obtuvo resultados por debajo de los LMP según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM, direccionándose todo el volumen en la Poza de Grandes Eventos (PGS); y es por ello que este estudio se consideró como PROBLEMA NO OPTIMIZADO.

El área de Metalurgia HLC INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C. a cargo de mi persona en su misión de encontrar las mejores condiciones de operación, ha realizado pruebas a nivel de laboratorio y a nivel industrial de tal forma que puedan detoxificar la solución cianurada con alto contenido de cianuro y metales (en este caso alto en Cu, As y Hg); y evaluar la dosificación óptima de

reactivos que permita un ahorro en el consumo de los reactivos, obteniendo resultados por debajo de los Límites Máximos Permisibles.

Por lo cual se optimizó el proceso a partir de un amplio programa de pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio que fueron plasmados a nivel industrial, variando parámetros de tratamiento de detoxificación específicos para los niveles de cianuro y cambiar la posición de dosificación de los reactivos sobre todo para precipitar los metales como mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu), y otros elementos de alto contenido en ppm.

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La Empresa Minera La Arena S.A. se ubica en el norte del Perú, en la región La Libertad, provincia de Sánchez Carrión, distrito de Huamachuco, situada a una altura promedio de 3400 metros sobre el nivel del mar. En cuanto a la accesibilidad, La Arena se ubica aproximadamente a 184 Km de la ciudad de Trujillo y a 15 Km de la ciudad de Huamachuco. El acceso desde la ciudad de Trujillo es a través de la carretera de penetración Trujillo – Quiruvilca – Huamachuco.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Problema Principal.

- ¿Se podrá optimizar del consumo de reactivos para reducir costos en la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. con el fin de destruir el cianuro y precipitar los metales de alto contenido por

debajo de los LMP y sobre todo obtener un ahorro significativo a partir de una nueva configuración?

1.3.2. Problemas Específicos.

- ¿Se podrá establecer parámetros y variables óptimos para la detoxificación de la solución cianurada y precipitación de los metales?
- ¿Se podrá establecer y proponer los principales rangos operativos en el tiempo del proceso, adición, concentración y posición de dosificación de reactivos?

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general.

- Optimizar el consumo de reactivos para la reducción de costos en la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Seleccionar reactivos específicos adecuados para el proceso de tratamiento de efluentes que nos permiten reducir los costos en la planta de tratamiento de efluentes.
- Determinar el tiempo del proceso, considerando los rangos de tiempo de residencia por cada etapa según criterio de diseño y considerar tiempos adicionales bajando el flujo de tratamiento.
- Alcanzar la exigencia de contenido de cianuro total <0.8 ppm y precipitar los metales presentes en la solución por debajo de los Límites Máximos Permisibles, según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En el trabajo presento información sobre la metodología de detoxificación de solución cianurada y precipitación de los metales para el tratamiento de efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A. lo cual se pretende que este escrito sirva como guía y resulte de mucha importancia no sólo para este caso en particular sino para quienes se interesen en la aplicación de esta técnica descrita.

La presente tesis se justifica de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) Dentro de la problemática que afronta la Empresa Minera La Arena S.A. se encuentra los excesos de solución barren a consecuencia de precipitaciones fluviales en la Poza de Grandes Eventos, haciendo que en muchos casos se presente una serie de problemas en cuanto a la dilución de la solución rica lo cual influye la recuperación final que produce la Planta ADR y por ende exceso de solución barren.
- b) El costo de reactivos es relevante ya que depende de la estimación de la producción de Planta ADR y por ende estos reactivos a usar generan un Opex alto fijado al área.

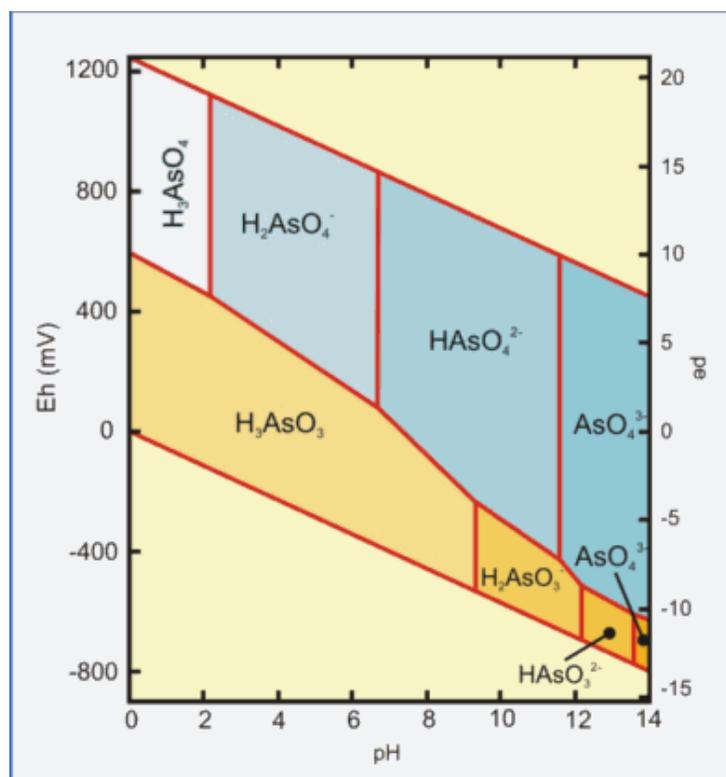
También cabe resaltar que la dosificación en exceso de sulfato de cobre pentahidratado – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en el proceso de detoxificación de cianuro y precipitación de metales, aumenta considerablemente el consumo de peróxido de hidrógeno – H_2O_2 , debido que el H_2O_2 tiene que competir con el cobre en la cinética de reacción. El cobre reacciona con el cianuro, formando complejos débiles de cianuro wad. El H_2O_2 tendría que oxidar el Cu remanente, y también detoxificar el

cianuro remanente formado por los complejos débiles. Por ello en las primeras pruebas realizadas con el diseño original, los consumos se elevaron en el oxidante (H_2O_2), generando altos consumos de los demás reactivos.

Cabe precisar la aplicación de cloruro férrico – FeCl_3 , en el diseño original de la planta, es para precipitar metales pesados, pero los hace como coadyuvante en la coagulación y formando complejos de base ferrosa. Es recomendable su aplicación cuando los metales se encuentren oxidados o reducidos.

El peróxido de hidrógeno – H_2O_2 también está reaccionando con los metales, y son estos los que consumen más oxidante. Esto confirma que el peróxido de hidrógeno – H_2O_2 está oxidando los metales como por ejemplo el As, llevándolo de arsenito a arsenato, para su precipitación (según Diagrama Eh-pH).

Figura N° 1.6: Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico.



Fuente: Internet, trabajos monográficos.

De igual manera con el cobre (Cu), fierro (Fe) y mercurio (Hg). Las variaciones cuantitativas de estos elementos en la solución barren van a definir el consumo próximo de la base química del tratamiento.

- c) El cianuro libre (CN- libre), cianuro wad (CN- wad), cianuro total (CN- total), los metales como arsénico (As), cobre (Cu), fierro (Fe), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) fueron un punto crítico en cuanto a la evacuación porque estos no estaban por debajo de los Límites Máximos Permisibles según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM debido a sus características de formación geológica de mineral tratado, lo cual se encontraron alternativas de dosificación de reactivos que fueron probadas exitosamente y que por esta razón justifica su estudio en este trabajo.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- Una de las dificultades, fue la disponibilidad de efluente para tratamiento, sólo se realizaba en épocas de precipitaciones fluviales, lo cual era necesario su tratamiento para bajar el contenido de metales perjudiciales para el proceso. Se trataba un máximo de 100.000 m³ de solución barren.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

2.1.1. Antecedentes Científicos.

El cianuro es uno de los principales compuestos utilizados por la industria química debido a su composición de carbono y nitrógeno, ambos elementos comunes, y a la facilidad con la cual reacciona con otras sustancias. Anualmente se utiliza más de un millón de toneladas de cianuro, de los cuales cerca del 20% se utiliza en minería en todo el mundo, mayormente para la recuperación de oro (HABASHI, F., 1987)

Después de haber extraído el oro por medio de procesos hidrometalúrgicos, pueden estar presentes tres tipos principales de compuestos de cianuro en los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos: cianuro libre, cianuro débilmente complejo y cianuro fuertemente complejo. Juntos, los tres compuestos de cianuro constituyen el “cianuro total”. Al conocer la química de

estos tres tipos de cianuro se puede comprender su comportamiento respecto de la seguridad y el ambiente (SCOTT y INGLES, 1991).

Se emplean cuatro formas generales de tratamiento de la solución de cianuro:

- Degradación natural,
- Oxidación química,
- Precipitación,
- Biodegradación.

En la degradación natural el principal mecanismo es la volatilización con posteriores transformaciones atmosféricas a sustancias químicas menos tóxicas. Otros factores como la oxidación biológica, la precipitación y los efectos de la luz solar también contribuyen a la degradación del cianuro.

Los procesos de oxidación química para el tratamiento del cianuro incluyen el proceso con SO_2 / Aire (desarrollado por dos compañías mineras canadienses, INCO y NORANDA) y el proceso de tratamiento con H_2O_2 (peróxido de hidrógeno) (iniciado por Degussa). Una alternativa de oxidación química más antigua, el Proceso de Cloración Alcalina, se utiliza rara vez en la industria minera en la actualidad. En el proceso con SO_2 / Aire, el cianuro libre y el cianuro wad se oxidan y el cianuro de hierro se precipita como un sólido insoluble. El proceso puede aplicarse a soluciones o a lodos y la reacción es rápida. Las posibles limitaciones son la necesidad de obtener una licencia para utilizar el proceso, el costo de construcción de una planta procesadora, la necesidad de realizar ensayos empíricos

para optimizar el sistema y la incapacidad del proceso para oxidar subproductos intermedios del cianuro (Noranda 1994, Konigsmann et al 1999).

La precipitación de cianuros estables se puede obtener mediante el agregado deliberado de complejantes tales como el hierro. Esto reduce la concentración de cianuro libre y también es eficaz para controlar los elevados niveles de otros metales que pueden estar presentes. Los cianuros de hierro pueden reaccionar con otras sustancias químicas en solución y producir precipitados sólidos, que pueden contener una docena de sales insolubles de cianuro, removiendo de esta manera el cianuro de la solución. Parte del cianuro de las soluciones de los procesos reaccionará con otros componentes químicos que se encuentren dentro del sistema y formarán concentraciones mucho menos tóxicas de compuestos tales como el amoníaco, el nitrato y el dióxido de carbono.

La biodegradación del cianuro es la base de los sistemas de tratamiento de los efluentes residuales industriales. Durante más de una década, se ha empleado un proceso biológico para tratar el cianuro, con el fin de satisfacer los criterios ambientales de descarga. Las condiciones aeróbicas son mucho más favorables para la degradación del cianuro que las condiciones anaeróbicas, aunque los organismos anaeróbicos pueden ser eficaces para tratar el cianuro en concentraciones de hasta varios miligramos por litro (ppm). Se han creado tanto sistemas activos como sistemas pasivos de tratamiento biológico; estos sistemas remueven el cianuro empleando microorganismos aeróbicos o anaeróbicos (LIEN 1991).

2.2. BASES TEÓRICAS – DESCRIPCIÓN DE LA ARENA S.A.

2.2.1. Módulo I: Pad de Lixiviación.

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico de extracción sólido líquido por disolución. Consiste en hacer pasar una solución diluida de cianuro de sodio (NaCN) a través de la pila de mineral, para que el cianuro pueda disolver las partículas de oro y de plata contenidas en las especies mineralógicas, a fin de obtener una solución enriquecida de lixiviación que se almacena en una poza llamada poza pregnant y los excesos en una poza de grandes eventos.

Figura N° 2.1: Pad de lixiviación – La Arena S.A.



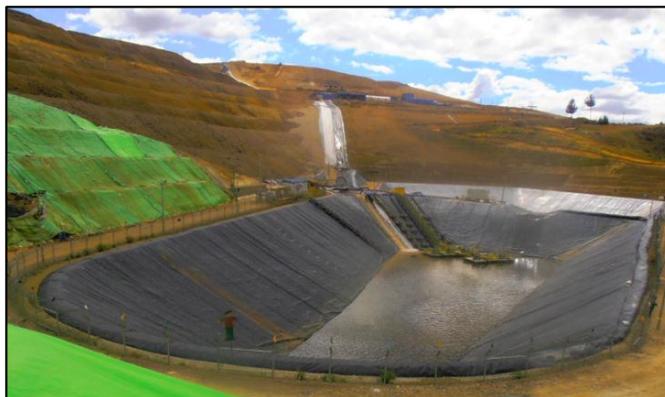
Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

Figura N° 2.2: Poza de Grandes Eventos – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

Figura N° 2.3: PLS (Poza de Solución Pregnant) – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

Las etapas del proceso de lixiviación en pilas para este propósito se han dividido en:

- 1^{ra}. Etapa: Carguío del mineral al pad de lixiviación,
- 2^{da}. Etapa: Instalación del sistema de riego,
- 3^{ra}. Etapa: Lixiviación del mineral y manejo de soluciones.

1^{ra} Carguío de mineral.

El mineral es acarreado por camiones mineros y descargados en la pila de lixiviación, en capas de 8 metros, empleándose tractores y motoniveladoras para conformar la pila. Entre las principales actividades tenemos:

- Descarga de mineral.
- Homogenización de mineral con cal.
- Caracterización mineralógica del mineral.
- Armado de rampas y vías de acceso de carguío.

2^{da} Riego por aspersión.

- Medición de flow rate (ratio de flujo) por celdas y determinación del coeficiente de uniformidad de los aspersores.
- Riego por aspersión por malla cuadrática y malla triangular.
- Matrices de riego, líneas de distribución y líneas de riego de 2" y 3"
- Distribución de solución de riego, tuberías de 20" y manifolds.
- Tiempo de riego por piso y fuerza de cianuro usado.
- Armado de celdas.
- Riego de taludes.

3^{ra} Movimiento de líneas y tuberías.

- Traslado de tuberías, líneas matrices, tuberías y accesorios.
- Traslado de bolsas de cal y luminarias.
- Principios de bombeo de solución de riego al pad.
- Llenado y control de reportes de viajes de mineral, consumo de cal y control de días de riego.

2.2.2. Módulo II: Planta de Procesos – Planta ADR.**a) Sistema de adsorción con carbón activado.**

El sistema de adsorción con carbón activado es un proceso a través del cual se recupera los valores de oro y plata de la solución enriquecida (solución pregnant).

Las etapas del proceso de adsorción en columnas de carbón activado se han dividido en:

- 1^{ra}. Etapa: Bombeo de solución pregnant.
- 2^{da}. Etapa: Adsorción de carbón activado.

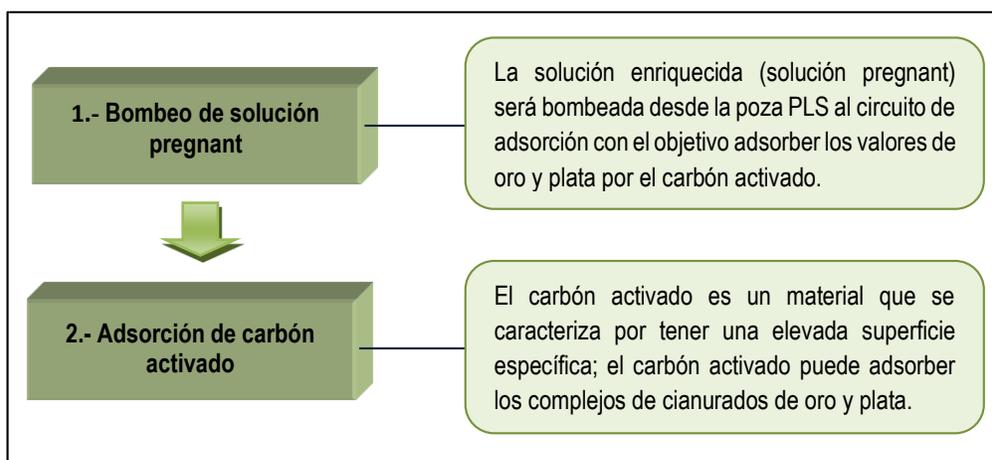
Figura N° 2.4: Columnas de adsorción – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

El siguiente diagrama muestra la función principal de cada etapa:

Figura N° 2.5: Etapas de adsorción – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

b) Manejo de carbón activado.

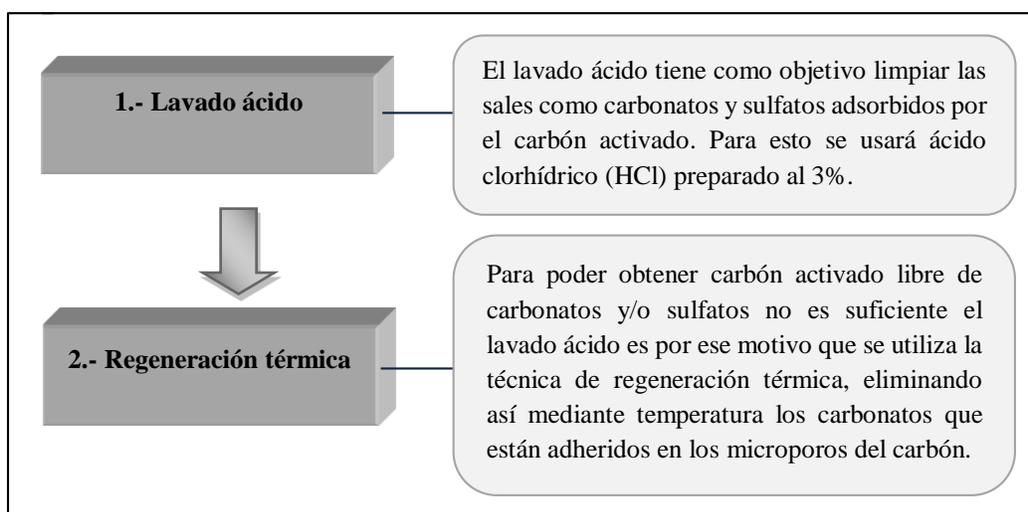
Para poder acondicionar el carbón nuevo que se usará en la planta ADR se hará uso de la tolva de almacenamiento de carbón, en cuanto se tenga acondicionado, el carbón se trasladará hacia las columnas de adsorción por medio de un educor.

Posteriormente el carbón desorbido será transportado desde el reactor de desorción a la tolva de almacenamiento de carbón para después enviar el carbón al reactor de lavado ácido por medio de un educor, luego el carbón retornará a la tolva de manejo de carbón para volver a reutilizar el carbón en las columnas de adsorción.

c) Lavado ácido y regeneración térmica.

Esta sección comprende 2 etapas, lo cual la función principal de cada etapa se muestra a continuación:

Figura N° 2.6: Etapas de lavado y regeneración térmica – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

d) Fundición

Mediante el proceso de fundición se obtiene el producto final de barras Doré. El proceso comienza con la colección del precipitado proveniente de las celdas electrolíticas. Este precipitado electrolítico es retenido en un filtro prensa, para luego ser trasladado a los hornos de

retorta para recuperar el mercurio. Luego el precipitado seco y frío es mezclado con fundentes y cargado al horno de fundición donde por un sistema de colada en cascada se obtiene las barras doré.

Figura N° 2.7: Hornos de fundición basculante – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

Figura N° 2.8: Horno de retorta – La Arena S.A.



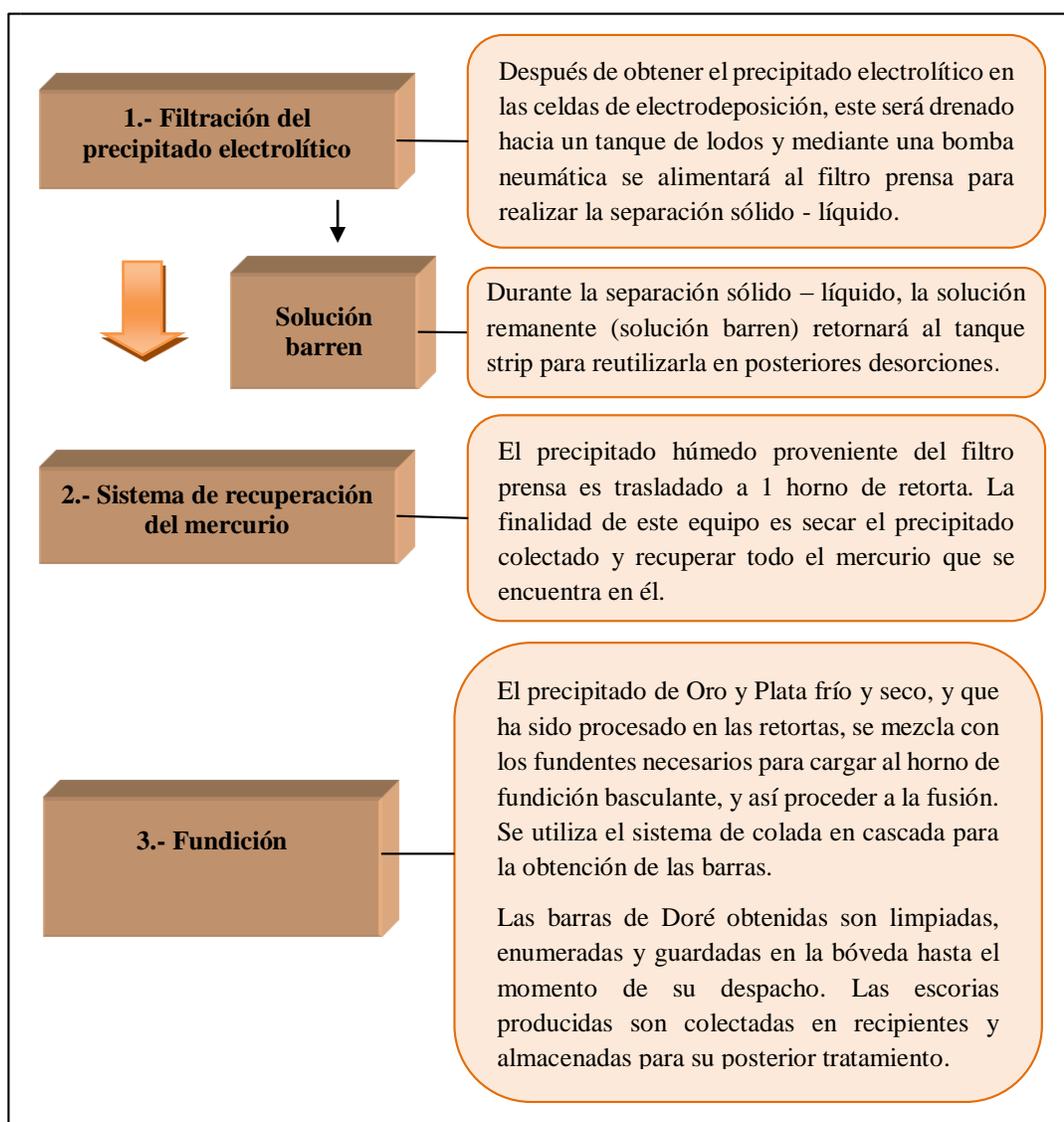
Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

Las etapas del proceso de fundición para este propósito se han dividido en:

- 1^{ra} Etapa: Filtración del precipitado electrolítico
- 2^{da} Etapa: Sistema de recuperación de mercurio
- 3^{ra} Etapa: Fundición
- 4^{ta} Etapa: Sistema de extracción de gases.

La siguiente figura muestra la función principal de cada etapa:

Figura N° 2.9: Etapas de fundición – La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

2.2.3. Módulo III: Investigaciones Metalúrgicas

a) Pruebas Metalúrgicas en Columnas

Las pruebas metalúrgicas en columnas tienen como objetivo determinar el porcentaje de extracción y la cinética del mineral, asimismo determinar la factibilidad de lixiviación para un posterior

escalamiento a nivel piloto y determinar parámetros y variables que favorezcan el ciclo de lixiviación del mineral (densidad de riego, granulometría, concentración de cianuro, curado, consumo de cal, etc.).

Figura N° 2.10: Vista de columnas de lixiviación en el laboratorio metalúrgico.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

- **Preparación mecánica del mineral:** Se realiza cuarteos sucesivos del mineral con la finalidad de obtener una muestra representativa para la prueba.
- **Análisis Granulométrico de Mineral:** Se determina la distribución granulométrica de los minerales muestreados a través de mallas grandes desde 6" hasta malla #10 ubicada en la zona de columnas.

Figura N° 2.11: Análisis granulométrico para prueba en columnas.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

- **Carguío de Mineral para Prueba en Columnas:** Se realiza el cargado de columnas según los pesos para cada diámetro de roca, se agregará CaO a la columna según el ratio de consumo (Kg/TM), dicho dato se obtiene de la prueba de alcalinidad.
- **Lixiviación del Mineral en Columnas:** Se lixivia con solución cianurada a un determinado grado de concentración, con un flow rate de 10 lt/m²-hr hasta que la solución percolada (solución rica) tenga una concentración de Au ≤ 0.02 ppm.
- **Balance Metalúrgico e interpretación de resultados:** Se realiza una vez terminado el ciclo de lixiviación en columnas en un cuadro de Excel, se realiza el balance metalúrgico para interpretar los resultados.

Figura N° 2.12: Descarga de mineral de las columnas de lixiviación.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

b) Pruebas Metalúrgicas en Botellas – BRT

El objetivo de esta actividad es determinar el % de recuperación de oro y plata y evaluar la cinética mediante pruebas de agitación en botellas.

- **Preparación Mecánica de Mineral, Cuarteo y Homogeneizado:** Se prepara el mineral hasta malla 100% -m10 se hará uso de los equipos:

Cuarteador Jones, chancadora de quijadas primaria, secundaria y clasificación por malla -10 usando el rotap.

Figura N° 2.13: Equipos usados en la preparación mecánica.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

- **Prueba de Alcalinidad:** Con el objetivo de determinar el consumo de CaO (óxido de calcio) del mineral (Kg/TM) para llegar hasta su alcalinidad protectora (pH>10.5).
- **Lixiviación del Mineral en Botellas:** Agregar NaCN hasta tener una concentración de 100ppm de CN⁻, u otro valor según requerimiento de prueba mediante agitación en rodillos.

Figura N° 2.14: Agitadores de botellas.



Fuente: Planta ADR, 2016, La Arena S.A.

- **Balance Metalúrgico e interpretación de resultados:** Una vez terminado el ciclo de lixiviación en botellas se procede al balance

metalúrgico en un cuadro de excel, balances metalúrgicos, para posteriormente interpretar los resultados.

2.3. BASES CIENTÍFICAS

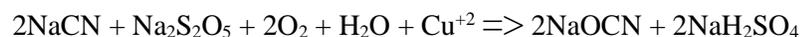
2.3.1. El Cianuro y sus Métodos de Degradación.

El principal objetivo en una campaña de degradación de cianuro en efluentes industriales es disminuir la concentración de cianuro a niveles asimilables y la precipitación de los metales que están por encima de los Límites Máximos Permisibles. Y es por ello, que existen métodos de los cuales se puede mencionar:

a) Proceso Metabisulfito de Sodio (MBS).

Primera Etapa

Oxidación de cianuro libre y complejos débiles. El ión cianuro es oxidado por el MBS a cianato:



Segunda Etapa

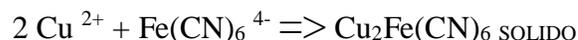
Destrucción de complejos débiles en forma general estas reacciones serian:



Donde: $\text{Me} = \text{Zn}^{2+}; \text{Cu}^{2+}; \text{Ni}^{2+}; \text{Cd}^{2+}$

Tercera Etapa

Precipitación de los metales como hidróxidos y precipitación de los ferrocianuros.

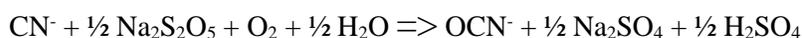
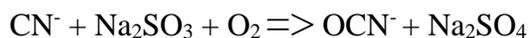


El control del proceso requiere el conocimiento de los siguientes parámetros:

- Concentración de cianuros y metales en la carga y en el efluente,
- pH del proceso (pH=9.0 – 9.5),
- CN⁻ total; CN⁻ libre; CN⁻ wad.
- Demanda de oxígeno (O₂).

b) Proceso INCO.

Puede ser aplicada a soluciones y pulpas cianuradas. La oxidación del cianuro es concordante con alguna de las siguientes reacciones globales:

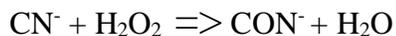


El proceso oxida cianuro libre y todos los cianuros acomplejados con cobre, níquel, zinc, plata, cadmio, fierro, la oxidación es catalizada por el cobre soluble (Cu⁺²), el cual es adicionado en solución como sulfato de cobre pentahidratado.

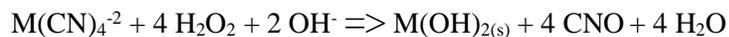
c) Proceso Peróxido de Hidrógeno + Cobre.

Las reacciones involucradas son:

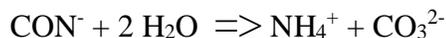
Cianuro libre (fuerza de cianuro)



Complejo de metales cianurados (CN^- wad)



Descomposición del Cianato



d) Proceso Clorinación Alcalina (Hipoclorito de Sodio y/o Calcio).

Las reacciones involucradas son:

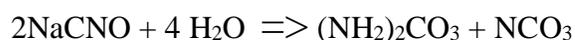
El hipoclorito de calcio al entrar en contacto con el cianuro se oxida formando un cloruro cianógeno.



El cloruro cianógeno se hidroliza mediante una reacción violenta a cianato.



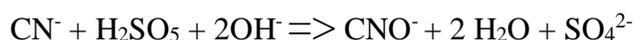
Descomposición del cianato



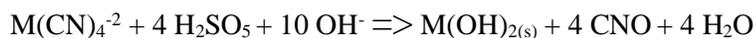
e) Proceso Ácido Caro.

El ácido caro es preparado por la reacción entre oxidantes fuertes, el peróxido de hidrógeno más el ácido sulfúrico, cada una de ellos como soluciones concentradas. Las reacciones involucradas son:

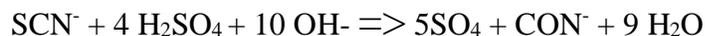
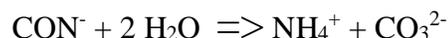
Cianuro libre (fuerza de cianuro)



Complejo de metales cianurados (CN^- wad)



Descomposición del cianato



f) Proceso DETOX.

Es un proceso australiano para tratar aguas residuales precipitando metales pesados y neutralizando cianuro. DTOX reacciona rápidamente con cianuro libre y complejos. El producto final es liberado al medio ambiente como carbonatos y amonio, la reacción es rápida. El sulfuro que contiene el DTOX precipita los metales pesados como minerales sulfurados (tal cual ocurre en la naturaleza).

g) Proceso Ósmosis Inversa.

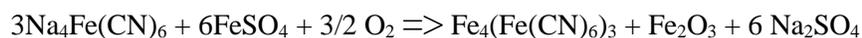
La ósmosis inversa consiste en separar un soluto disuelto de su solvente, mediante fuerzas ejercidas sobre una membrana semipermeable, y está basado en el uso de la tecnología de membranas que tienen por objetivo reducir el contenido de cianuro, así como los metales disueltos y otras sustancias como nitratos y nitritos en la solución.

Este proceso permite la recuperación y recirculación de la solución de alimentación. No utiliza reactivos químicos y generalmente se adiciona cloro en baja proporción al final del proceso a efectos de tener

concentraciones de cianuro y de metales pesados por debajo de los LMP establecidos por la regulación ambiental.

h) Proceso Sulfato Ferroso.

El cianuro libre puede ser convertido en un compuesto poco tóxico con la adición de un exceso de una sal soluble de hierro, como lo es el sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), en un rango de pH entre 7,5-10,5. La adición de iones ferrosos a soluciones conteniendo cianuro férrico deja un precipitado azul conocido como azul de Turnbull. Por otra parte, los iones férricos reaccionan con el cianuro ferroso para formar el insoluble azul de Prusia. Las reacciones son:



i) Biodegradación.

Las bacterias utilizan el oxígeno del aire para descomponer los compuestos de cianuro en nitratos (nitrificación convirtiendo el amoníaco en NO_2 y NO_3), bicarbonatos y sulfatos.

Las ventajas del proceso de tratamiento biológico son:

- Diseño simple y el control del proceso operativo.
- Bajos costos de las sustancias químicas.
- Capacidad para tratar todas las formas del cianuro y sus subproductos.

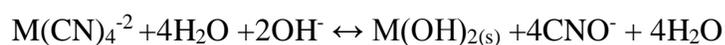
- Limitaciones: Bajo rendimiento con temperaturas frías y con concentraciones muy altas de cianuro.
- Por otro lado, el CN y el SCN son convertidos a amoníaco y a monóxido de carbono, y los metales incluyendo el ferrocianuro son adsorbidos en un biofilm y recuperados posteriormente.

j) Detoxificación con Peróxido de Hidrógeno.

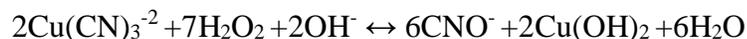
El peróxido de hidrógeno es un potente oxidante no contaminante, cuya comercialización es normalmente en contenedores de plástico (tanques IBC) de 1 m³ con concentraciones superiores al 50 % en H₂O₂.

Las reacciones de oxidación tienen lugar al pH natural del efluente (que generalmente es de 10), y no requiere control de dicho parámetro, puesto que el peróxido de hidrógeno sólo presenta un suave carácter ácido.

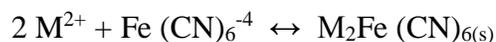
Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



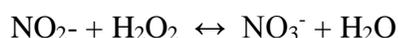
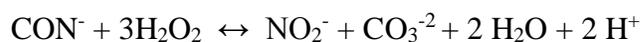
Complejos cianurados de metales como el Cu y Zn son oxidados, permitiendo la precipitación espontánea de los hidróxidos correspondientes en el rango de pH 9:



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



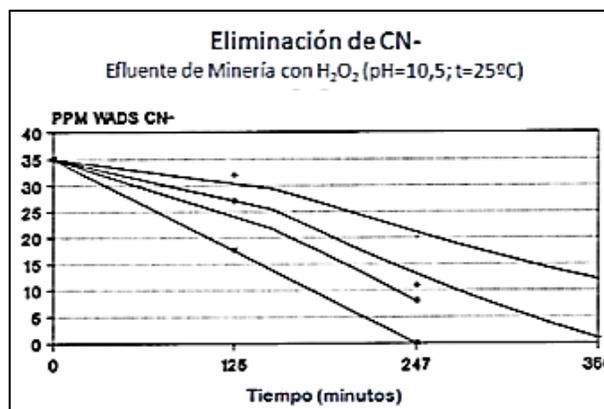
Una presencia de peróxido de hidrógeno en exceso durante el proceso puede favorecer la formación de iones carbonato y nitrito. Éste último, a su vez, puede derivar en nitrato:



El tiocianato no es oxidado, lo que puede constituir una ventaja en plantas donde no es necesario este control, porque así se evita el consumo excesivo de reactivo. Para las instalaciones donde se hace necesario la destrucción del tiocianato serán necesarios procesos oxidativos más drásticos.

Todo el proceso se realiza en tanques abiertos. Aunque la reacción es homogénea (la cinética no se ve afectada por la agitación), la agitación es necesaria para realizar una buena mezcla del oxidante con el efluente, y evitar además la acumulación de precipitados en los tanques de reacción.

Figura N° 2.15: Concentración Vs Tiempo de eliminación de CN⁻.



Fuente: Internet, Eliminación del Cianuro, Efluente de Minería.

2.3.2. Límites Máximos Permisibles (LMP).

El Ministerio del Ambiente en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas establece los Límites Máximos Permisibles en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM para la descarga de efluentes líquidos de actividades Minero – Metalúrgicos.

Los LMP guarda coherencia entre el nivel de protección ambiental establecido para una fuente determinada y los niveles generales que se establecen en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). La implementación de estos instrumentos debe asegurar que no se exceda la capacidad de carga de los ecosistemas, de acuerdo con las normas sobre la materia.

Tabla N° 2.1: Límites Máximos Permisibles según D.S.N°10-2010.

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

Fuente: Decreto Supremo N°010-2010-MINAM

El Decreto Supremo N°010-2010-MINAM también establece que 1 mg/L de cianuro total equivale a 0,2 mg/l de cianuro wad y a 0,1 mg/L de cianuro libre.

2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Alcalinidad:** Se define como la capacidad ácido neutralizante de una solución. La alcalinidad indica la cantidad de cambio que ocurrirá en el pH con la adición de cantidades moderadas de ácido.

- **Aeróbico:** Acción mediante la cual se genera algún tipo de intercambio de oxígeno (O_2) o reacciona con el O_2 , es decir, de transformación del aire.

- **Anaeróbico:** Se refiere a la posibilidad de vivir o existir sin oxígeno y que es el concepto que se contrapone al de aeróbica, que refiere a aquellos organismos que viven y se desarrollan gracias a la presencia del oxígeno.

- **Biodegradación:** Es un proceso natural que viene a ser la eliminación de compuestos nocivos por medio de bacterias impidiendo su concentración de cualquier elemento en la biosfera, permitiendo la restitución de elementos esenciales en la formación y crecimiento de los organismos (carbohidratos, lípidos, proteínas).

- **Biofilm:** Un biofilm o biopelícula es una población de microbios asociada a una superficie y embebida en una matriz de polímeros extracelulares. Un biofilm puede estar formado por una sola especie o por múltiples especies de hongos y bacterias.

- **Carbonatos:** Son las sales del ácido carbónico; la mayoría de los carbonatos, aparte de los carbonatos de los metales alcalinos, son poco solubles en agua.

- **Catalización:** La catálisis es el proceso a través del cual se incrementa la velocidad de una reacción química. El proceso de catálisis implica la presencia de una sustancia (el catalizador sulfato de cobre pentahidratado - $CuSO_4 \cdot 5H_2O$).

- **Catalizador:** Es una sustancia que aumenta la velocidad de una reacción, regenerándose y que puede ser recuperado al final de la reacción (el catalizador se fragmenta en pequeñas partículas para acelerar el proceso). Si retarda la reacción se llama inhibidor.

- **Cianuro:** Sustancia química, potencialmente letal, que actúa rápidamente y puede existir de varias formas. Puede ser un gas incoloro como el cianuro de hidrógeno (HCN), o el cloruro de cianógeno (ClCN), o estar en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN). Se describe con un olor a “almendras amargas”, pero no siempre emana un olor y no todas las personas pueden detectarlo.

- **Cianuro libre (CN- libre):** Describe al ión cianuro que se disuelve en el agua. Casi todo el cianuro libre está presente como ácido cianhídrico cuando hay abundancia de iones hidrógeno presentes; es decir a pH de 8 o menos. En este estado el cianuro se volatiliza y se dispersa en el aire.

- **Cianuro wad (CN- wad):** Es el cianuro fácilmente dissociable por un ácido débil; el resultado de su medición involucra al cianuro libre. Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado al cual se disocian estos complejos depende en gran medida del pH de la solución.

- **Cianuro total (CN- total):** Se denomina así a todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa. El cianuro total incluye el cianuro libre, los cianuros simples y los todos los cianuros complejos.

- **Cinética:** Es el estudio de la velocidad de las reacciones químicas.

- **Coadyuvante:** Dícese de sustancia que acelera o incrementa la actividad de un componente principal.
- **Coagulante:** Son sales metálicas que, añadida al agua, produce la unión de las partículas en suspensión presentes en ella y su agrupamiento en coágulos.
- **Coefficiente de uniformidad:** Es una variable que se utiliza para evaluar la uniformidad de riego en el pad de lixiviación.
- **Colorímetro:** Es un instrumento que permite medir la absorbancia de una disolución en una frecuencia de luz específica, el colorímetro nos permite descubrir la concentración de un soluto conocido que sea proporcional a la absorción.
- **Contaminación de la muestra:** Es la alteración involuntaria de la muestra, causada por agentes físicos, químicos o biológicos y climatológicos, que la invalidan para los fines analíticos a que se destina.
- **Cualitativo:** Es aquello que está relacionado con la cualidad o con la calidad de algo, es decir, con el modo de ser o con las propiedades de un objeto o sustancia. El análisis cualitativo es aquel que revela cuáles son las características o el valor de algo.
- **Desorbido:** Remover por desorción o acción o efecto de retirar un gas, un líquido o una sustancia disuelta de una superficie.
- **Detoxificación:** Viene a ser el proceso mediante el cual se trata aguas residuales que precipitan metales pesados y neutralizan cianuro para minimizar los volúmenes de efluentes y no generar compuestos o derivados metaestables del cianuro.
- **Doré:** Mezcla impura y sin refinar de oro metálico y plata. Se produce mediante la fundición de concentrados de oro y plata, arenas o precipitados. Las impurezas

típicas incluyen metales no nobles. El doré se refina hasta obtener oro casi puro en una fundición o refinería.

- **DSM:** Tipo de malla que se utiliza para la separación sólido – líquido en el circuito de solución barren.

- **Eductor:** Es un impulsador líquido-líquido, que utiliza agua a presión para bombear otro líquido desde un nivel inferior a otro superior. Permite el empleo de todo tipo de líquido o soluciones, siempre que no exista impedimento de mezclarlos.

- **Efluente:** Es cualquier flujo regular o estacional de sustancia líquida descargada a los cuerpos receptores que proviene de:

- Cualquier planta de procesamiento de minerales, incluyendo procesos de trituración, molienda, flotación, separación gravimétrica, separación magnética, amalgamación, reducción, tostación, sinterización, fundición, refinación, lixiviación, extracción por solventes, electrodeposición y otros;

- Cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales asociadas con actividades mineras o conexas, incluyendo plantas de tratamiento de efluentes mineros, efluentes industriales y efluentes domésticos;

- Cualquier depósito de residuos mineros, incluyendo depósitos de relaves, desmontes, escorias y otros;

- **Ferrocianuros:** Es una sal o pigmento formado por cianuros por clase química de hierro, carbono y nitrógeno.

- **ICP:** Proceso con digestión total de cuatro ácidos (nítrico, perclórico, fluorhídrico y clorhídrico) para su respectiva lectura por “x” elementos (Ag, Al, As, Ba, Be, Bi,

Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Te, Ti, V, Zn, Zr, entre otros).

- **Inocuo:** Es la incapacidad que algo presentan para infligir un daño, es decir, cuando de algo o sustancia se dice que es inocuo será porque existe una probada razón que demostró que tal o cual no hacen daño.

- **Metaestables:** Son las propiedades que exhibe un sistema con varios estados de equilibrio, cuando permanece en un estado de equilibrio débilmente estable durante un considerable período de tiempo.

- **Metales:** Son micro-contaminantes inorgánicos (se hallan en pequeña concentración, pero tienen efectos amplios en el medio ambiente). Son bio-refractarios, es decir, tienden a persistir en el medio ambiente indefinidamente, por lo que representan una amenaza más seria que los compuestos orgánicos, que pueden ser más o menos persistentes.

- **Microporos:** Son poros capilares y están asociados con la retención de humedad. Los macroporos son extremadamente importantes en el movimiento del agua (infiltración, percolación y drenaje), intercambio gaseoso (oxígeno y dióxido de carbono) y además proveen espacio para el crecimiento de las raíces (canales).

- **Muestra:** Es una o más porciones de un volumen o masa representativa definida, colectadas en cuerpos receptores de efluentes industriales, efluentes domésticos, redes de abastecimiento público, estaciones de tratamiento de aguas, etc., con el fin de determinar sus características físicas, químicas y/o biológicas.

- **Muestreo:** Es la actividad que consiste en coleccionar una muestra representativa, para fines de análisis y/o medición.

- **Muestra compósito:** Se refiere a una mezcla de muestras simples o puntuales tomadas en el mismo punto en distintos momentos. Para estos propósitos, se considera como estándar una muestra compuesta que representa un período de 24 horas. Sin embargo, bajo otras circunstancias puede ser preferible una muestra compuesta que represente una desviación, un periodo más corto o el ciclo completo de una operación periódica.

- **Oxidación:** Es la reacción química a partir de la cual un átomo, ión o molécula cede electrones; entonces se dice que aumenta su estado de oxidación.

- **Parámetro:** Cualquier elemento, sustancia o propiedad física, química o biológica del efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas que define su calidad y que se encuentra regulado por el D.S. N° 010-2010-MINAM.

- **pH:** Se utiliza esta notación como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa: $\text{pH} = 7$ medio neutro, $\text{pH} < 7$ medio ácido y $\text{pH} > 7$ medio alcalino.

- **Plan de muestreo:** Es el procedimiento que se requiere para obtener una muestra representativa, cuyas características conserven las condiciones del cuerpo de agua original.

- **Pluviales:** Distribución de lluvias que se produce sobre una región geográfica.

- **PLS:** Poza de Solución Pregnant o solución rica de alto contenido en ppm (mg/L) de oro.

- **PGE:** Poza de Grandes Eventos o donde se recauda y recolecta soluciones de aguas de precipitaciones pluviales y solución barren.

- **Precipitación:** Es un proceso de obtención de un sólido a partir de una disolución. Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente. El sólido así obtenido se denomina precipitado y puede englobar impurezas. En general será necesario cristalizarlo y recristalizarlo.

- **Punto de control de efluentes:** Ubicación aprobada por la Autoridad Competente en la cual es obligatorio su evaluación y el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles.

- **Punto de muestreo:** Es el lugar predeterminado en un cuerpo receptor donde se colecta una muestra.

- **Sedimentación:** Se trata de una operación de separación sólido-fluido en la que las partículas sólidas de una suspensión, más densas que el fluido, se separan de éste por la acción de la gravedad. Es una operación controlada por la transferencia de cantidad de movimiento.

- **Tiocianato:** La oxidación del cianuro se puede realizar con oxidantes tales como el cloro (Cl), ozono (O₃), oxígeno (O₂) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para convertirlo a cianato. A temperatura ambiente, el cianato y tiocianato reaccionan lentamente con el agua para formar amoníaco, ión formato, y/o carbonato.

- **Tratamiento de efluentes:** Es el conjunto de procesos destinados a alterar las propiedades o la composición física, química o biológica de las aguas residuales, de manera que se transformen en vertidos inocuos más seguros para su transporte, capaces de recuperación y almacenaje, o más reducidos en volumen.

2.5. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

2.5.1. Hipótesis general.

La optimización del consumo de reactivos influye directamente en la reducción de costos en la planta de tratamiento de efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A.

2.5.2. Hipótesis específica.

- a. Determinar las concentraciones de peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre pentahidratado para la reducción de los iones cianuro de los efluentes líquidos.
- b. Determinar la dosificación de diferentes concentraciones de sulfhidrato de sodio y cloruro férrico para la precipitación de los metales con alto contenido en ppm en función del pH de trabajo.

2.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

2.6.1. Variables Independientes.

Optimización del consumo de reactivos.

Indicadores

- Dosificación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).
- Dosificación de sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$).
- Tiempo de oxidación (minutos).
- Dosificación de sulfhidrato de sodio (NaSH).
- Dosificación de cloruro férrico ($FeCl_3$).
- Tiempo de precipitación (minutos).

- Dosificación de floculante aniónico.
- Tiempo de clarificación (minutos).

2.6.2. Variables Dependientes.

Reducción de costos en la planta de tratamiento de efluentes.

Indicadores

- % de remoción del cianuro total (ppm).
- % de remoción del cobre, arsénico y mercurio (ppm).

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación será de tipo experimental, ya que se tiene un diseño específico y la manipulación de una a más variables con sus niveles.

3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Diseño Factorial – Etapa de Oxidación.

El diseño experimental utilizado para el análisis de los resultados en la etapa de oxidación fue el diseño factorial, de dos factores con dos indicadores independientes “dosificación de peróxido de hidrógeno y tiempo de oxidación” con 2 niveles para cada variable y aplicado a un solo indicador dependiente “% de remoción del CN Total”, entonces el número total de muestras fue de 8, incluido su réplica.

N = número de pruebas;

a,b,c = niveles de las variables independientes;

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será: $N=2*2*2*1= 8$

Tabla N° 3.1: Matriz de diseño experimental – Etapa de oxidación.

Variable		Variable		% Remoción
Indicadores Independientes		Indicadores Dependientes		
H ₂ O ₂ (ppm)	Repetición	Tiempo de oxidación (min)		Y _i
		20'	40'	
C1	R1	Y1111	Y1112	Y _{i1}
	R2	Y1121	Y1122	Y _{i2}
C2	R1	Y1311	Y1312	Y _{i3}
	R2	Y1321	Y1322	Y _{i4}
Variable Respuesta:		Concentración de CNT (ppm)		

Fuente: Diseño Experimental 2^k, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.2.2. Diseño Factorial – Etapa de Precipitación.

El diseño experimental utilizado para el análisis de los resultados en la etapa de precipitación fue el diseño factorial, de dos factores con dos indicadores independientes “dosificación de sulfhidrato de sodio y tiempo de precipitación” con 2 niveles para cada variable y aplicado a un solo indicador dependiente “% de Remoción del Hg”, entonces el número total de muestras fue de 8, incluido su réplica.

N = número de pruebas;

a,b,c = niveles de las variables independientes;

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será: $N=2*2*2*1= 8$

Tabla N° 3.2: Matriz de diseño experimental – Etapa de precipitación.

- pH de Trabajo: 10,5-10,6				
Variable		Variable		% Remoción
Indicadores Independientes		Indicadores Dependientes		
NaSH (ppm)	Repetición	Tiempo de precipitación (min)		Yi
		3'	5'	
N1	R1	Y1111	Y1112	Yi1
	R2	Y1121	Y1122	Yi2
N2	R1	Y1311	Y1312	Yi3
	R2	Y1321	Y1322	Yi4
Variable Respuesta:		Concentración de Hg (ppm)		

Fuente: Diseño Experimental 2^k, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.2.3. Diseño Factorial – Etapa de Coagulación y Clarificación.

Una vez encontrado un ratio de concentración del peróxido de hidrógeno en la etapa de oxidación, así como también un ratio de concentración de sulfhidrato de sodio en la etapa de precipitación, se planteará el diseño factorial, de dos factores con indicadores independientes, en este caso “dosificación de cloruro férrico y dosificación de sulfato férrico” y “dosificación de floculante Magnafloc 155 y dosificación Magnafloc 1011” con 2 niveles para cada variable y aplicado a un solo indicador dependiente (% de remoción del As, Cu y Hg), entonces el número total de muestras fue de 8, incluidos su réplica, siendo estos reactivos

N = número de pruebas;

a,b,c = niveles de las variables independientes;

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será: $N=2*2*2*1= 8$

Tabla N° 3.3: Matriz de diseño experimental – Etapa de coagulación y clarificación.

- pH de Trabajo: 9,2-9,5; 100 ppm H ₂ O ₂ , 40 min Ox.; 5 ppm NaSH, 5 min.				
Variables Independientes		Variables Dependientes		% Remoción
Coagulante (ppm)	Repetición	Floculante Magnafloc		Yi
		155	1011	
FeCl₃ (72 ppm)	R1	Y1111	Y1112	Yi1
	R2	Y1121	Y1122	Yi2
Fe(SO₄)₃ (71 ppm)	R1	Y1311	Y1312	Yi3
	R2	Y1321	Y1322	Yi4
Variable Respuesta:		Conc. de As, Cu y Hg (ppm)		

Fuente: Diseño Experimental 2^k, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Las pruebas experimentales se realizaron en laboratorio metalúrgico mediante Jar Test, posteriormente partiendo de un ratio de consumo de los reactivos, se ejecutó a nivel industrial en la Planta de Tratamiento de Efluentes de la Empresa Minera La Arena S.A.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población.

La población de estudio está conformada por 200 litros de solución cianurada barren perteneciente a la Planta ADR – La Arena S.A., distrito de Huamachuco - Trujillo, con alto contenido de cianuro total (CN_T), arsénico (As), mercurio (Hg) y cobre (Cu), según monitoreo de análisis químico por ICP (metales totales y disueltos) en estos 4 últimos meses.

3.3.2. Muestra.

Para obtener la muestra de cada circuito se realizó la toma de muestras mediante un diseño de plan de muestreo de forma aleatoria.

Lo que se procura que la solución barren sea lo más representativa posible para luego realizar el trabajo estadístico, y se conozca objetivamente las características de la población de estudio (Murray y Larry 2005).

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * N * p * q}{e^2 (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde:

N = Total de la población.

Z_{α} = Valor correspondiente a la distribución de Gauss

P = Prevalencia esperada del parámetro a evaluar.

q = 1 - p.

e = Precisión.

Para nuestro estudio tendremos los siguientes datos:

N = 200

$Z_{\alpha} = 1,96$

P = 0,05

q = 0,95

e = 0,05

Por lo tanto, reemplazando todos los datos tenemos:

$$n = \frac{1,96^2 * 200 * 0,05 * 0,95}{0,05^2 (200 - 1) + 1,96^2 * 0,05 * 0,95}$$

n = 54 (tamaño de la muestra).

Se aplicaron las actividades de observación, muestreo y medición; para ello el supervisor de campo cumplió con determinar los puntos de muestreo y parámetros de análisis conjuntamente con el operador según el siguiente procedimiento:

Procedimiento de Muestreo:

- a) El supervisor coordina en todo momento el ingreso y salida de lugar de trabajo.
- b) Se verifica que el área de trabajo esté debidamente señalizado y ventilado.
- c) El supervisor verifica si los equipos / materiales de muestreos y herramientas se encuentren operativas (Check List).
- d) El operador metalurgista procede a rellenar el IPERC continuo y el supervisor verifica que el área de trabajo cumpla con las medidas de seguridad necesarias para proceder con el muestreo.
- e) El operador metalurgista coordina con el personal a cargo del punto de muestreo (jefe de guardia u operador multifuncional de Planta ADR) para minimizar a cero la posibilidad de algún incidente.
- f) El operador metalurgista con el ayudante metalurgista, procede a tomar la muestra del efluente de los puntos identificados. Primero se identifica los tanques barren que mandan flujo a la planta de tratamiento de efluentes o caso contrario se identifica las líneas de solución barren de los circuitos de absorción, y como siguiente paso se procede a tomar las muestras compositando durante 3 días en 2 turnos de 12 horas c/u, esta

muestra se almacena en bidones herméticos cerrados – compósito, bien sellados para evitar posible contaminación de las muestras.

- g) Luego el ayudante metalurgista traslada la muestra tomada de la sección del punto de muestreo hacia el lugar de preparación y homogenización; aquí se colecta la muestra en tanque IBC, que previamente ha sido limpiada y acondicionada.

Figura N° 3.1: Puntos de muestreo – Efluente solución barren.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.

Figura N° 3.2: Preparación y homogenización de muestras de solución barren.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.

h) Se procede a llenar las muestras en bidones o baldes limpios, previo enjuague (hasta 3 veces) con solución efluente colectada.

Nota: *El lavado de los recipientes para efluentes debe ser estricto. No es recomendable volver a usar frascos donde hayan estado almacenados químicos o reactivos concentrados debido al riesgo de contaminación. Se debe contar con una cantidad adicional mínima de envases por seguridad. Los envases donde se depositará la solución, deben ser nuevas y encontrarse en buen estado para poder evitar cualquier tipo de contaminación por grasas, combustibles etc. Tienen que ser cerradas herméticamente, también se sugiere etiquetar los envases con fecha y hora de toma de muestra indicando si existiera algún parámetro y/o anomalía que crean necesarios de considerar.*

i) Todas las muestras tomadas por el personal en este caso el ayudante metalurgista, fueron inventariadas, pesadas y codificadas para las respectivas pruebas metalúrgicas.

Las muestras tomadas fueron preservadas y almacenadas en un lugar oscuro y fresco. Asimismo, para el contraste, se mandó la muestra representativa de cabeza para el análisis químico, los cuales fueron analizados por Laboratorio Químico Certimin S.A. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

3.3.3. Caracterización de la Muestra Solución Barren N°1

Tabla N° 3.4: Análisis químico de cabeza – Solución Barren N°1.

Código de Muestra	pH	NTU	CN _T	CN _L	CN _{WAD}	TSS	TDS	Hg
			mg /L	mg /L	mg /L	mg /L	mg /L	mg /L
Cabeza-T00	10,20	6,6	19,496	10,136	18,731	< 5	2420	1,304

Fuente: Informe de Ensayo N°FEB1090.R18

Tabla N° 3.5: Análisis químico de cabeza ICP metales totales – Solución Barren N°1.

Ag(t)	Al(t)	As(t)	Ba(t)	Be(t)	Bi(t)	B(t)	Ca(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,034	0,88	3,951	0,007	<0,0003	<0,02	0,026	61,15
Cd(t)	Ce(t)	Co(t)	Cr(t)	Cu(t)	Fe(t)	K(t)	Li(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<0,001	<0,02	0,143	<0,004	7,395	0,35	5,10	<0,004
Mg(t)	Mn(t)	Mo(t)	Na(t)	Ni(t)	P(t)	Pb(t)	Sb(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,21	0,030	0,031	650,46	0,027	0,32	<0,01	0,076
Se(t)	SiO₂(t)	Sn(t)	Sr(t)	Ti(t)	Tl(t)	V(t)	Zn(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<0,02	11,53	<0,007	0,2726	<0,01	<0,05	<0,003	0,057

Fuente: Informe de Ensayo N°FEB1090.R18

Tabla N° 3.6: Análisis químico de cabeza ICP metales disueltos – Solución Barren N°1.

Ag(d)	Al(d)	As(d)	Ba(d)	Be(d)	Bi(d)	B(d)	Ca(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,033	0,85	3,941	0,006	<0,0003	<0,02	0,025	60,24
Cd(d)	Ce(d)	Co(d)	Cr(d)	Cu(d)	Fe(d)	K(d)	Li(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<0,001	<0,02	0,118	<0,004	7,083	0,23	5,02	<0,004
Mg(d)	Mn(d)	Mo(d)	Na(d)	Ni(d)	P(d)	Pb(d)	Sb(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,21	0,011	0,027	646	0,025	0,29	<0,01	0,072
Se(d)	SiO₂(d)	Sn(d)	Sr(d)	Ti(d)	Tl(d)	V(d)	Zn(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
<0,02	11,03	<0,007	0,2539	<0,01	<0,05	<0,003	0,048

Fuente: Informe de Ensayo N°FEB1090.R18

3.4. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El método que se utilizará en la investigación es de carácter “Experimental” que establece la relación directa entre la variable independiente y dependiente – diseño

factorial de detoxificación con peróxido de hidrógeno para destruir los complejos cianurados, precipitación del arsénico, cobre y mercurio con sulfhidrato de sodio, coagulación con cloruro férrico y clarificación con floculante seleccionado.

A nivel Laboratorio:

El método aplicado en esta investigación a nivel laboratorio es mediante diseño experimental en Prueba de Jarras (Jart Test) o vasos de precipitación.

Como primera etapa se evaluó concentraciones de peróxido de hidrógeno en niveles de tiempo de oxidación para la detoxificación del cianuro, asimismo como segunda etapa se evaluó concentraciones de sulfhidrato de sodio en niveles de tiempo de residencia para la precipitación de los metales, que luego fueron coagulados y clarificadas con la adición de agentes coagulantes y floculantes a un determinado tiempo de residencia.

A nivel industrial:

Se ejecutó en la Planta de Tratamiento de Efluentes a partir de los ratios encontrados a nivel laboratorio tanto para la detoxificación del cianuro a un determinado tiempo de oxidación y precipitación de los metales donde la solución barren a tratar se bombeó de los DSM de Planta ADR, ubicados a la descarga de los circuitos de adsorción, para luego cumplir el proceso de destrucción a un tiempo total de reacción de oxidación de los complejos de cianuro (tiempos de retención en los tanques de degradación) y la reacción con los metales mediante el manipuleo de válvulas y dosificación de reactivos para luego ser precipitados en la poza de clarificación.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1. Técnicas de Recolección de Datos

Observación: Mediante esta técnica se toma apuntes como:

- Datas de tratamientos anteriores (2015 - 2016).
- Datas de tratamientos ejecutados en laboratorio que serán escalados a nivel industrial.
- Análisis de documentos emitidos por empresas que trataron esta solución cianurada.
- Observación y ejecución en el lugar de la investigación.

3.5.2. Instrumentos

Los principales instrumentos que se utilizó son los siguientes:

- Procedimientos e instructivos tanto para la preparación de reactivos, así como la ejecución de las pruebas metalúrgicas; y
- Cuestionarios.

Así mismo el requerimiento tales como: personal, equipos, materiales y herramientas para la realización del programa de muestreo se indica en las siguientes tablas:

Tabla N° 3.7: Personal para el muestreo In situ.

Cantidad	Descripción
01	- Supervisor metalurgista
01	- Operador metalurgista
01	- Ayudante metalurgista

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Tabla N° 3.8: Equipo de Protección Personal (EPP's).

Cantidad	Descripción
03	Casco de protección
03	Lentes de seguridad
03	Botas de seguridad (pares)
03	Mameluco con cinta reflectiva
03	Guantes de badana (pares)
03	Respirador con filtros multigases o fullface
03	Tapones de oídos u orejeras

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Tabla N° 3.9: Herramientas y materiales para el muestreo.

Descripción
- Muestreador y envases frascos de plástico
- Tanque IBC
- Bidones de 25 Litros cada uno.
- Envases adicionales en caso de ruptura o contaminación.
- Preservantes (se recomienda tomar datos insitu para ver si aplica o no)
- Etiquetas y plumones indelebles.
- Cadena de custodia.
- Formatos de registro, transporte y cronograma de puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

En esta etapa se ordenó, clasificó, codificó y se tabularon los datos obtenidos. Se aplicó el análisis (cuantitativo y cualitativo). Se aplicó el tipo de análisis estadístico, descriptivo, ello sirvió para efectos de la contrastación de la hipótesis.

3.6.1. Procesamiento.

Se utilizaron aplicativos estadísticos – Minitab para el procesamiento de la información recolectada.

3.6.2. Análisis de datos.

Se elaboraron cuadros, gráficos, tablas, esquemas, y su análisis de información correspondiente, para los efectos e interacción de factores, análisis de varianza ANAVA, en función del % de remoción de los metales.

3.6.3. Materiales y reactivos.

Materiales:

- Equipo Jar Test
- Jeringas de dosificación
- Matraz,
- Vasos de precipitación,
- pH metro,
- Turbidímetro,
- Agitadores magnéticos.

Reactivos:

- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 50%).
- Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al 10%)
- Sulfhidrato de sodio (NaSH al 10%)
- Cloruro férrico (FeCl_3 al 42%) y sulfato férrico ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ al 40,5%)
- Floculantes Magnafloc 155 y Magnafloc 1011.

3.6.4. Preparación de muestras.

- A la muestra representativa recolectada de 200 litros de solución barren se realizó la homogenización hasta obtener alícuotas de 2 litros que fueron compartidos en vasos de precipitación de 1 litro de capacidad para las pruebas a nivel laboratorio (según diseño factorial).
- Así mismo, se realizó el cálculo estequiométrico en función de los resultados de análisis de contenido de cabeza (ppm) para la dosificación de concentración del peróxido de hidrógeno y demás reactivos.

Nota: Se tomó como punto de partida los datos de consumos (ppm) en el diseño factorial, para luego trabajar con % de excesos de adición de los reactivos.

- Y se procedió a realizar las pruebas metalúrgicas en Jart Test, que serán descritos en el capítulo siguiente:

3.6.5. Procedimiento de muestreo y mediciones

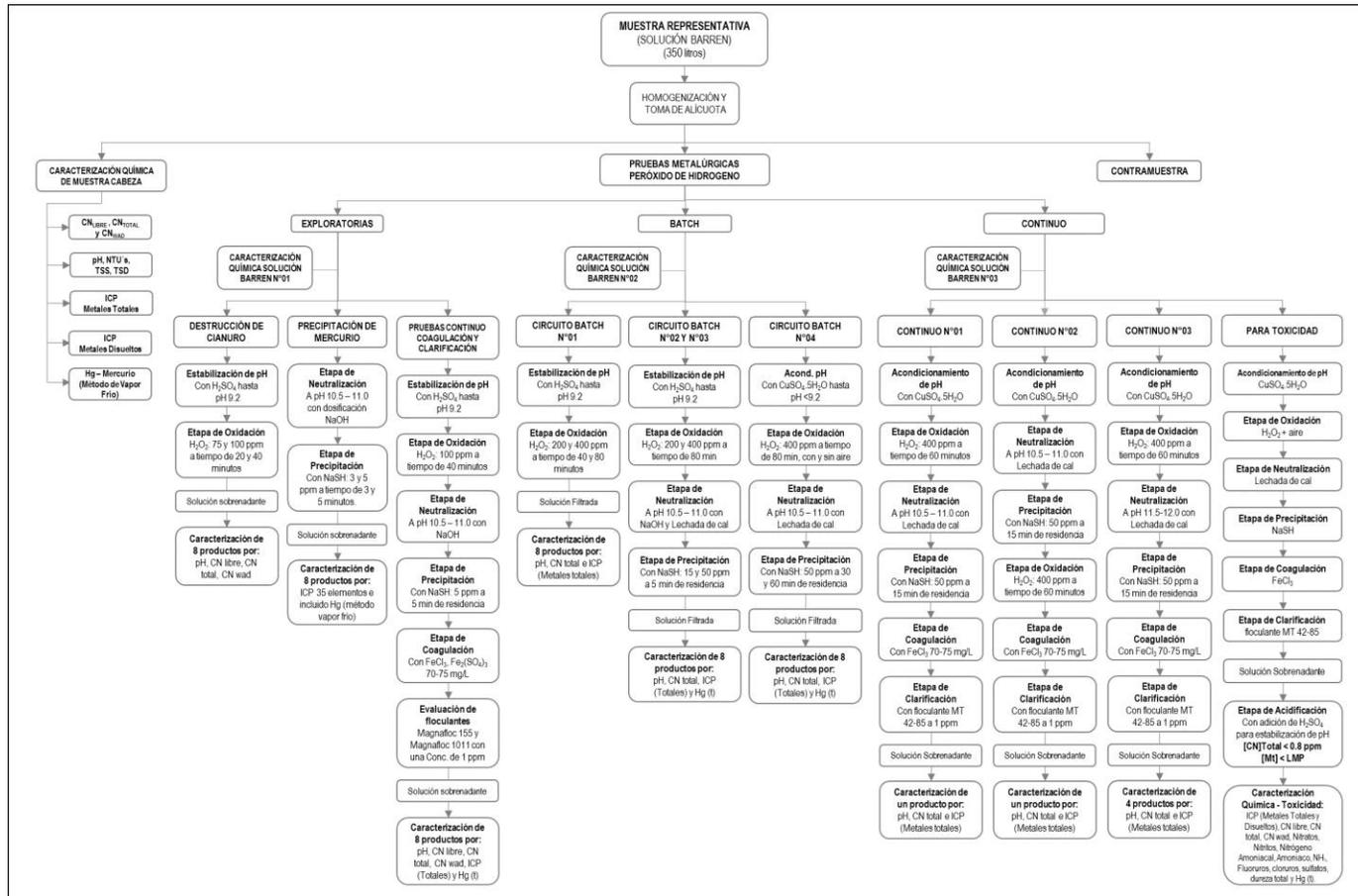
Antes de realizar las pruebas metalúrgicas se realizaron la toma de muestra de cabeza en frascos de 500 ml que fueron enviados a análisis químico por cianuro total, cianuro wad, cianuro libre, Hg e ICP (metales totales y disueltos) a Laboratorio Certimin S.A.

3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO, SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Para el tratamiento estadístico, selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación es necesario mencionar el detalle de las pruebas realizadas a nivel laboratorio, y conforme al plan de trabajo aplicado a este proyecto se discute los resultados.

A continuación, se presenta el esquema general de pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio y los lineamientos de cómo fueron ejecutados:

Figura N° 3.3: Plan de pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio (HLC).



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.7.1. Pruebas Metalúrgicas Exploratorias.

➤ Pruebas de Destrucción del Cianuro – Proceso Peróxido de Hidrógeno – Exploratoria

Se realizaron 4 pruebas exploratorias aplicando el peróxido de hidrogeno (H_2O_2) estabilizando el pH a 9,2 seguido de la etapa de oxidación, a diferentes concentraciones y tiempo de residencia.

a) Estabilización de pH

Se realizaron las pruebas de estabilización de pH, las cuales consistieron en llevar a la solución de su pH natural 10,2 a un pH de 9,2-9,5 utilizando ácido sulfúrico diluido al 10%. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.10: Estabilización de pH – Exploratoria.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ESTABILIZACIÓN DE pH				pH llegado
			pH inicial	H ₂ SO ₄			
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g /m ³	
HLC-T01	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,28
HLC-T02	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,28
HLC-T03	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,27
HLC-T04	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,26
R-HLC-T01	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,26
R-HLC-T02	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,24
R-HLC-T03	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,25
R-HLC-T04	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,25

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 0,06 kg/m³ de ácido sulfúrico.

b) Etapa de Oxidación

Una vez estabilizado el pH, se realizaron las pruebas de oxidación, las cuales consistieron en oxidar a la solución a cianato utilizando el peróxido de hidrógeno al 50%. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.11: Etapa de oxidación con H₂O₂ – Exploratoria.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Oxid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm		
HLC-T01	1,0	20	50	0,15	75	9,11	150
HLC-T02	1,0	40	50	0,15	75	9,05	150
HLC-T03	1,0	20	50	0,20	100	9,10	150
HLC-T04	1,0	40	50	0,20	100	9,07	150
R-HLC-T01	1,0	20	50	0,15	75	9,08	150
R-HLC-T02	1,0	40	50	0,15	75	9,06	150
R-HLC-T03	1,0	20	50	0,20	100	9,08	150
R-HLC-T04	1,0	40	50	0,20	100	9,07	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se dosificó 75 y 100 ppm de peróxido de hidrógeno.

Una vez culminado el tiempo de residencia se procedió a la toma de alícuota de solución sobrenadante para su envío a análisis químico, los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Tabla N° 3.12: Análisis químico de productos H_2O_2 – Exploratoria.

Código de Muestra	pH	CN _T	CN _w	CN _L	% Remoción		
		mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	CN _w	CN _L
Cabeza-T00	10,2	19,496	18,731	10,136	-	-	-
HLC-T01	9,11	0,342	0,052	0,005	98,25	99,72	99,95
HLC-T02	9,05	0,340	0,072	0,005	98,26	99,62	99,95
HLC-T03	9,10	0,363	0,062	0,005	98,14	99,67	99,95
HLC-T04	9,07	0,366	0,063	0,005	98,12	99,66	99,95
R-HLC-T01	9,08	0,342	0,095	0,016	98,25	99,49	99,84
R-HLC-T02	9,06	0,343	0,133	0,021	98,24	99,29	99,79
R-HLC-T03	9,08	0,361	0,114	0,016	98,15	99,39	99,84
R-HLC-T04	9,07	0,366	0,116	0,021	98,12	99,38	99,79

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

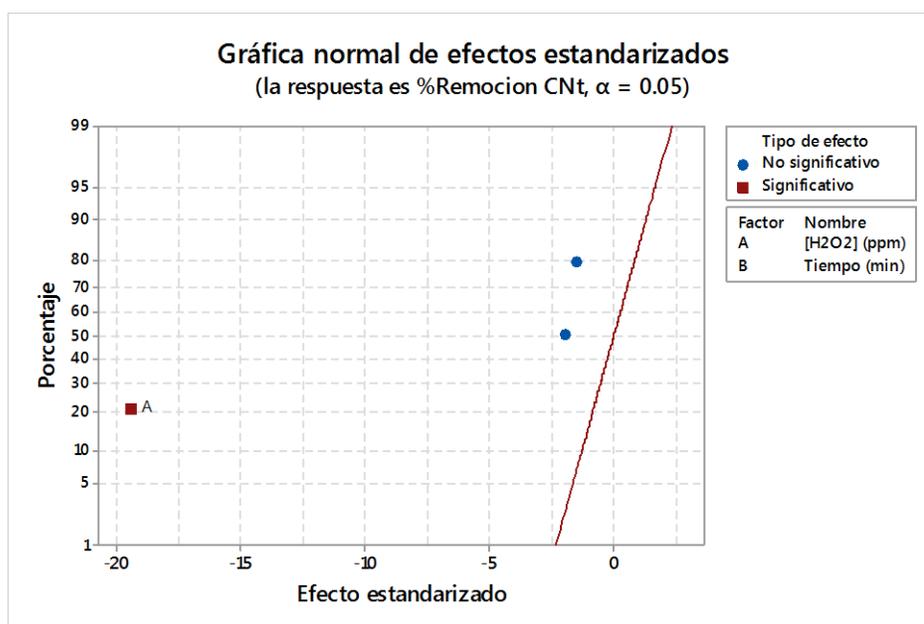
Según los resultados obtenidos se realizó el análisis estadístico para determinar las variables de mayor influencia sobre la destrucción de cianuro total, según se detalla a continuación:

Tabla N° 3.13: Tabla de diseño experimental – Exploratoria.

Corrida	A	B	[H ₂ O ₂]	Tiempo	% Remoción
			mg /L	min	CN _T
1	-	-	75	20	98,25
2	+	-	100	20	98,26
3	-	+	75	40	98,14
4	+	+	100	40	98,12
5	-	-	75	20	98,25
6	+	-	100	20	98,24
7	-	+	75	40	98,15
8	+	+	100	40	98,12

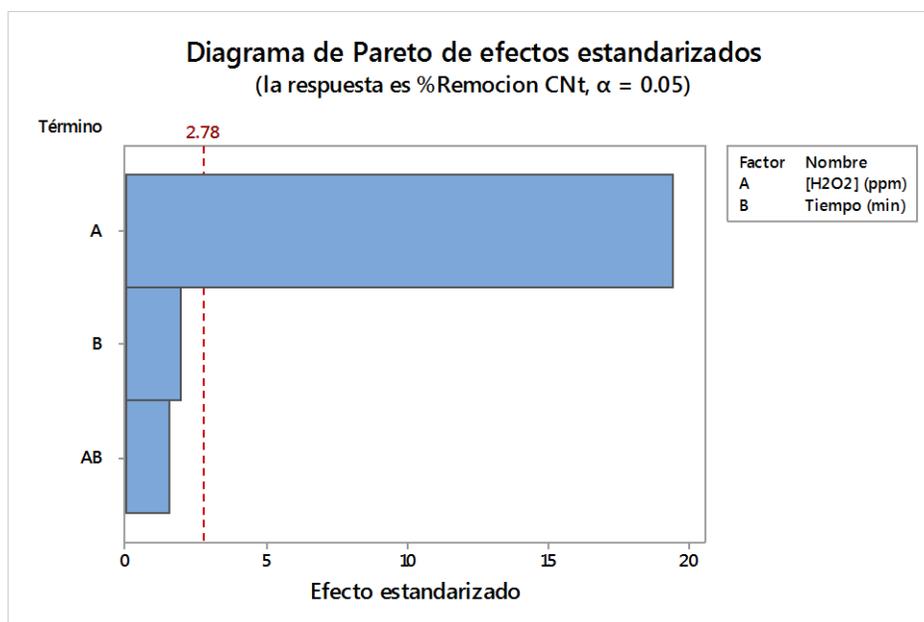
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.1: Efectos Estandarizados % Rem. CN Total – Exploratoria.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.2: Diagrama de Pareto % Rem. CN Total – Exploratoria.

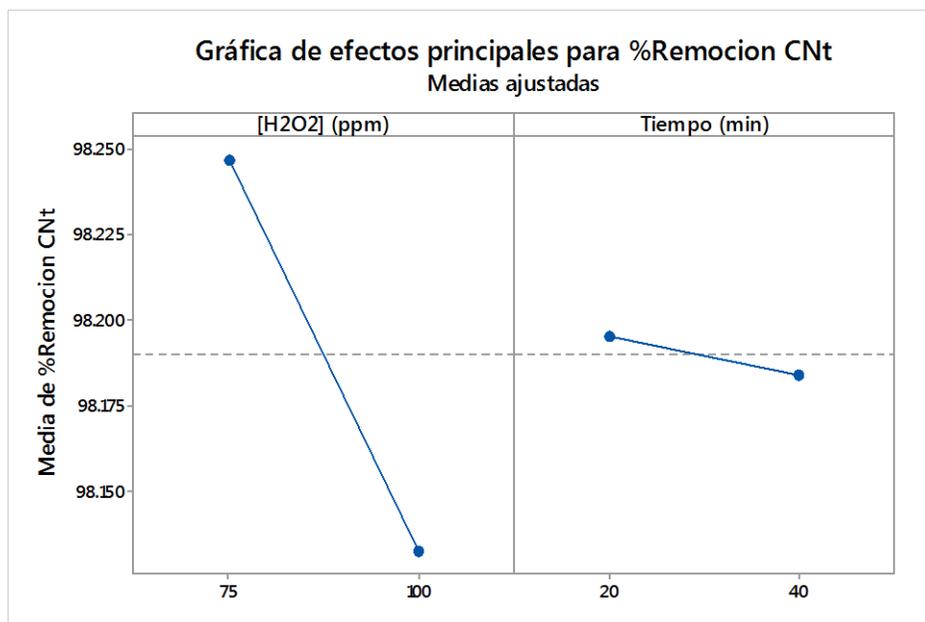


Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Discusión: Según las gráficas N°4.1 y N°4.2, podemos observar que la variable de influencia significativa sobre el grado de destrucción de

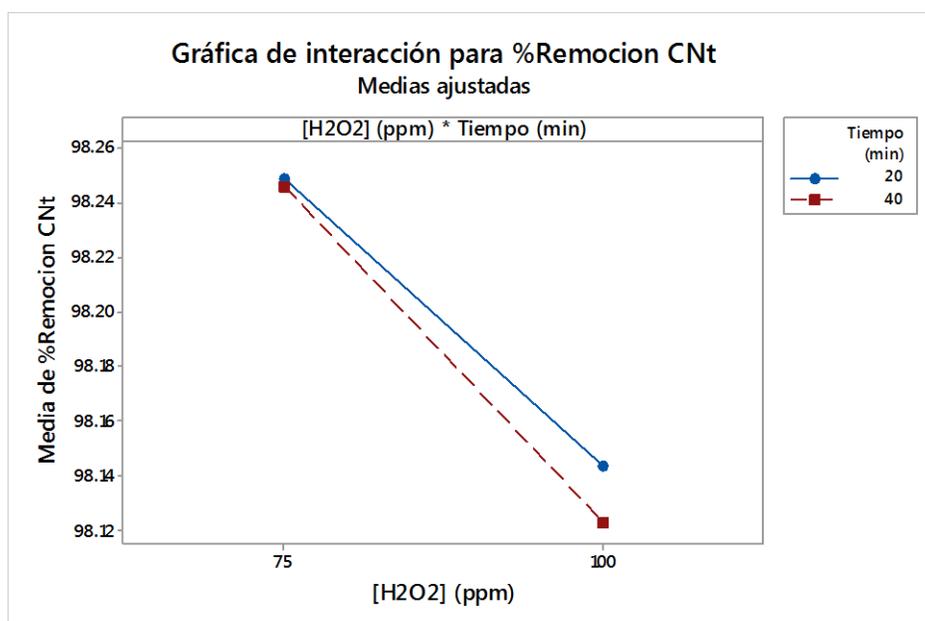
cianuro a cianato es la concentración de peróxido de hidrógeno. El tiempo de residencia y la interacción entre ambos no influyen sobre ello.

Gráfica N° 3.3: Gráfica de Efectos Principales % Rem. CN Total – Exploratoria.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.4: Grafica de Interacción % Rem. CN Total – Exploratoria.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Discusión: *Aquí podemos corroborar que el tiempo no influye en el proceso de destrucción de cianuro. Así mismo se acepta la hipótesis que la concentración de peróxido de hidrógeno influye significativamente a medida que se disminuye.*

Comentarios: *En las pruebas ejecutadas se puede deducir que un consumo de entre 75 – 100 ppm de H_2O_2 es suficiente para destruir el cianuro total ya que se tiene una concentración por debajo de 0,8 ppm de CN_T según LMP D.S. N°010-2010, pero no significa que otros metales de alto contenido como el caso del arsénico, cobre y mercurio tiendan a oxidarse en su totalidad.*

➤ **Pruebas de Precipitación del Mercurio con NaSH – Exploratoria**

Se realizaron 4 pruebas exploratorias con sus respectivas réplicas aplicando sulfhidrato de sodio (NaSH), a diferentes concentraciones y tiempo de residencia.

a) Etapa de Neutralización

Se realizó pruebas de neutralización de pH hasta obtener un rango de 10,5-11,0 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.14: Neutralización de pH – Exploratoria.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH				
			pH inicial	NaOH			pH llegado
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g/m ³	
HLC-T05	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,54
HLC-T06	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,60
HLC-T07	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,61
HLC-T08	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,58
R-HLC-T05	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,47
R-HLC-T06	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,58
R-HLC-T07	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,54
R-HLC-T08	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,61

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Precipitación

Una vez transcurrido el tiempo de neutralización se dosificó sulfhidrato de sodio (NaSH) preparado al 10% a fin de precipitar los metales sobre todo el mercurio. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.15: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH - Exploratoria.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Precip. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc. %	Adición ml	Dosif. ppm	pH Tratado	RPM
HLC-T05	1,0	3	10	0,03	3	10,54	150
HLC-T06	1,0	5	10	0,03	3	10,60	150
HLC-T07	1,0	3	10	0,05	5	10,61	150
HLC-T08	1,0	5	10	0,05	5	10,58	150
R-HLC-T05	1,0	3	10	0,03	3	10,47	150
R-HLC-T06	1,0	5	10	0,03	3	10,58	150
R-HLC-T07	1,0	3	10	0,05	5	10,54	150
R-HLC-T08	1,0	5	10	0,05	5	10,61	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 3 y 5 ppm de NaSH.

Una vez culminado el tiempo de precipitación se procedió a la toma de alícuota de solución sobrenadante para su envío a análisis químico por mercurio por el Método de Vapor Frio (ya sea muestra cabeza de solución barren representativo, así como también las muestras tratadas), los resultados se detallan a continuación:

Tabla N° 3.16: Análisis químico de productos de precipitación con NaSH – Exploratoria.

Código de Muestra	pH	Hg	% Rem.
		mg /L	Hg
Cabeza - T00	10,20	1,304	-
HLC-T05	10,54	0,679	47,93
HLC-T06	10,60	0,543	58,36
HLC-T07	10,61	0,608	53,37
HLC-T08	10,58	0,550	57,82
R-HLC-T05	10,47	0,670	48,62
R-HLC-T06	10,58	0,549	57,90
R-HLC-T07	10,54	0,560	57,06
R-HLC-T08	10,61	0,602	53,83

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

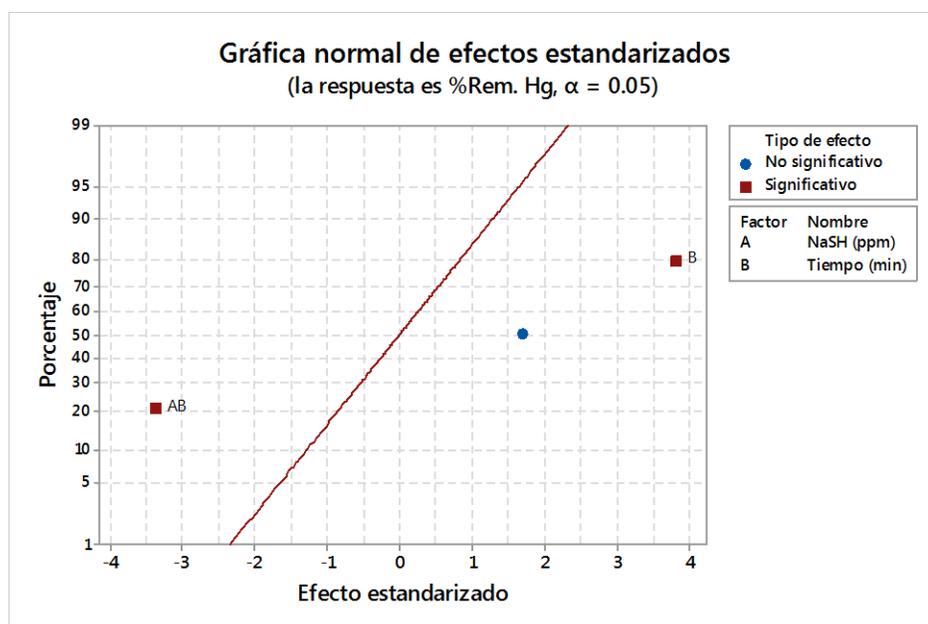
Según los resultados obtenidos se realizó el análisis estadístico para determinar las variables de mayor influencia sobre la remoción del mercurio total, según se detalla a continuación:

Tabla N° 3.17: Tabla de diseño experimental – Exploratoria.

Corrida	A	B	[NaSH]	Tiempo	% Remoción
			mg /L	min	Hg
1	-	-	3	3	47,93
2	+	-	5	3	53,37
3	-	+	3	5	58,36
4	+	+	5	5	57,82
5	-	-	3	3	48,62
6	+	-	5	3	57,06
7	-	+	3	5	57,90
8	+	+	5	5	53,83

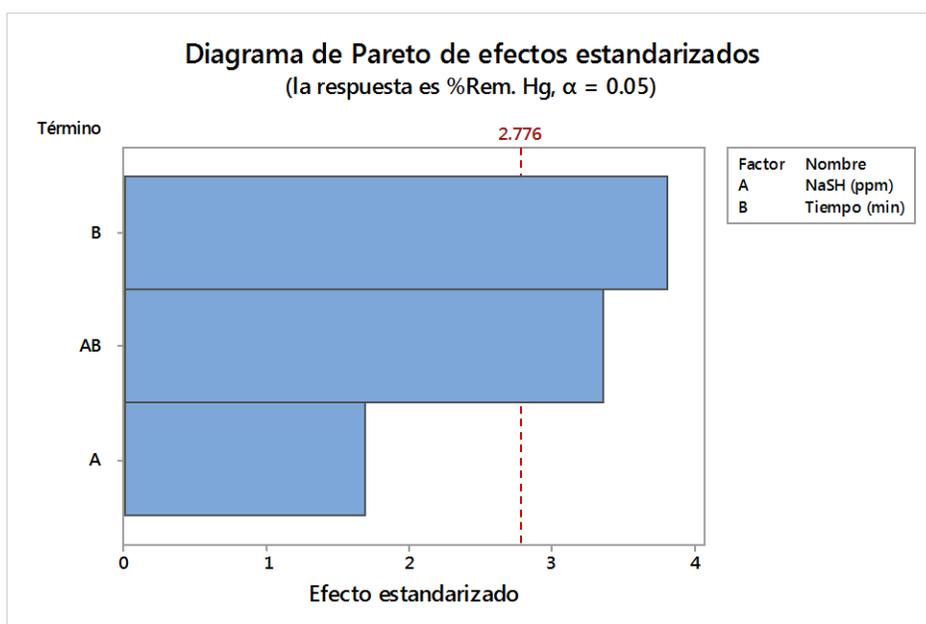
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.5: Efectos Estandarizados % Rem. Hg – Exploratoria.



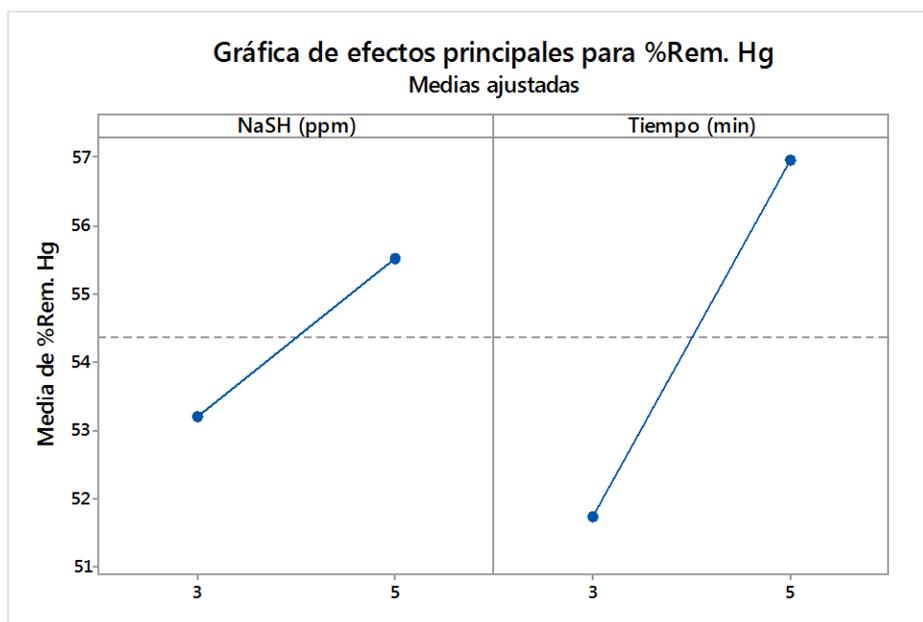
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.6: Diagrama de Pareto % Rem. Hg – Exploratoria.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.7: Efectos Principales % Rem. Hg – Exploratoria.

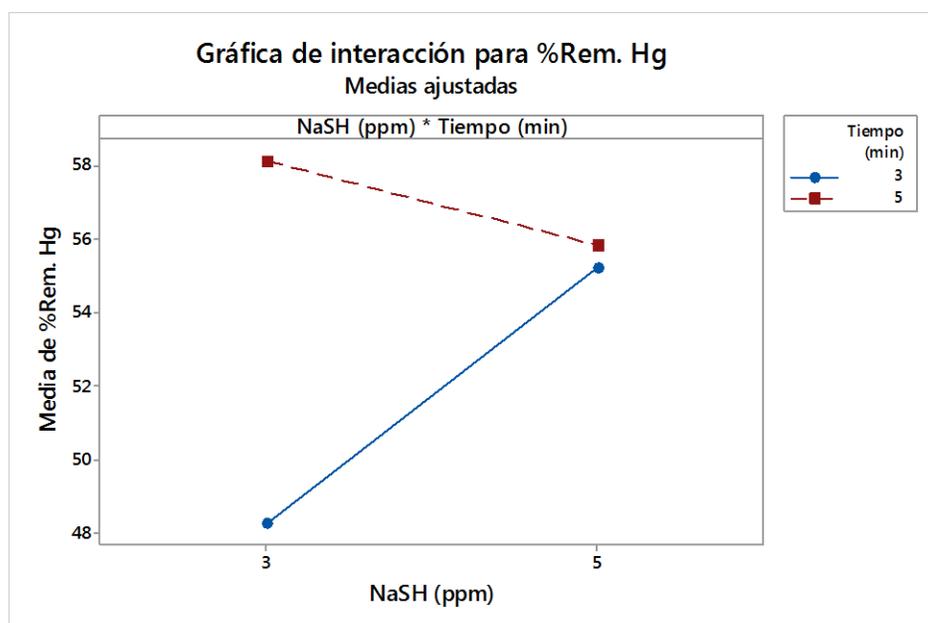


Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Comentarios: Según las gráficas N° 4.6 y N° 4.7, podemos observar que el tiempo de residencia y la interacción del tiempo y la concentración de

NaSH, influyen significativamente sobre el grado de remoción de mercurio, lo cual significa que dichas variables no pueden trabajar aisladas.

Gráfica N° 3.8: Gráfica de Interacción % Rem. Hg – Exploratoria.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Comentarios: Según la gráfica N° 4.8, podemos corroborar que el tiempo influye significativamente en el proceso de precipitación de mercurio y éste se potencia interactuando con la concentración de NaSH, donde se interpreta que a mayores tiempos y concentraciones bajas de NaSH, se incrementa la remoción de mercurio en la solución tratada.

➤ Pruebas en Continuo de Coagulación y Clarificación – Exploratoria

Se realizaron 4 pruebas exploratorias con sus respectivas réplicas, aplicando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) seguido de sulfhidrato de sodio (NaSH), evaluando el cloruro férrico ($FeCl_3$) y sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$)

como etapa de coagulación y clarificados con floculantes de alta eficiencia como lo son el Magnafloc 155 y Magnafloc 1011.

a) Estabilización de pH

Se realizó la estabilización del pH en un rango de 9,2-9,5 mediante la adición de ácido sulfúrico diluido al 10%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.18: Estabilización de pH – Exploratoria Continua.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ESTABILIZACIÓN DE pH				
			pH inicial	H ₂ SO ₄			pH llegado
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g /m ³	
HLC-T09	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,28
HLC-T10	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,28
R-HLC-T09	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,27
R-HLC-T10	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,26
HLC-T11	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,28
HLC-T12	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,28
R-HLC-T11	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,27
R-HLC-T12	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,26

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 0,06 kg/m³ de ácido sulfúrico.

b) Etapa de Oxidación

Una vez estabilizado el pH, se realizaron las pruebas de oxidación, las cuales consistieron en oxidar a la solución a cianato utilizando el peróxido de hidrógeno al 50%. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.19: Etapa de oxidación con H_2O_2 – Exploratoria Continua.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm		
HLC-T09	1,0	40	50	0,20	100	9,04	150
HLC-T10	1,0	40	50	0,20	100	9,03	150
R-HLC-T09	1,0	40	50	0,20	100	9,04	150
R-HLC-T10	1,0	40	50	0,20	100	9,05	150
HLC-T11	1,0	40	50	0,20	100	8,99	150
HLC-T12	1,0	40	50	0,20	100	8,95	150
R-HLC-T11	1,0	40	50	0,20	100	8,97	150
R-HLC-T12	1,0	40	50	0,20	100	8,96	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se dosificó 100 ppm de peróxido de hidrógeno.

c) Etapa de Neutralización

Después de concluido la etapa de oxidación, se dosificó hidróxido de sodio preparada al 10% para neutralizar los complejos precipitados a pH de 10,5 durante 3 minutos. Los parámetros de trabajo se muestran:

Tabla N° 3.20: Neutralización de pH – Exploratoria Continua.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH				
			pH inicial	NaOH			pH llegado
				Conc.	Adición	Dosif.	
			%	ml	g /m ³		
HLC-T09	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,68
HLC-T10	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,69
R-HLC-T09	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,70
R-HLC-T10	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,72
HLC-T11	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,57
HLC-T12	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,59
R-HLC-T11	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,57
R-HLC-T12	1,0	3	10,20	10	0,15	15	10,63

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró dosificar 0,015 Kg de NaOH / m³.

d) Etapa de Precipitación

Una vez transcurrido el tiempo de neutralización se dosificó sulfhidrato de sodio preparado al 10% a fin de precipitar los metales sobre todo el mercurio. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.21: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Exploratoria Continúa.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm		
HLC-T09	1,0	5	10	0,05	5	10,68	150
HLC-T10	1,0	5	10	0,05	5	10,69	150
R-HLC-T09	1,0	5	10	0,05	5	10,70	150
R-HLC-T10	1,0	5	10	0,05	5	10,72	150
HLC-T11	1,0	5	10	0,05	5	10,57	150
HLC-T12	1,0	5	10	0,05	5	10,59	150
R-HLC-T11	1,0	5	10	0,05	5	10,57	150
R-HLC-T12	1,0	5	10	0,05	5	10,63	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

e) Etapa de Coagulación

Una vez culminada la etapa de precipitación se procedió a dosificar cloruro férrico (FeCl₃) y/o sulfato férrico (Fe₂(SO₄)₃) en razón de 70-75 mg/L para cada prueba acondicionándose por 3 minutos. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.22: Etapa de coagulación – Exploratoria Continúa.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo (min)	ETAPA DE COAGULACIÓN					
			Reactivo	Densidad	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
				g/cm ³	ml	mg /L		
HLC-T09	1,0	3	FeCl ₃	1,43	0,05	72	10,28	150
HLC-T10	1,0	3	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,42	0,05	71	10,42	150
R-HLC-T09	1,0	3	FeCl ₃	1,43	0,05	72	10,39	150
R-HLC-T10	1,0	3	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,42	0,05	71	10,46	150
HLC-T11	1,0	3	FeCl ₃	1,43	0,05	72	10,32	150
HLC-T12	1,0	3	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,42	0,05	71	10,36	150
R-HLC-T11	1,0	3	FeCl ₃	1,43	0,05	72	10,39	150
R-HLC-T12	1,0	3	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,42	0,05	71	10,38	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

f) Etapa de Clarificación

Después de concluido la etapa de precipitación / coagulación, se dosificó para cada una de las pruebas los floculantes Magnafloc 155 y Magnafloc 1011, respectivamente, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta a 50 RPM. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.23: Etapa de clarificación – Exploratoria Continúa.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Agit. (min)	Floculante Magnafloc	ETAPA DE CLARIFICACIÓN			
				Conc.	Adición	Dosif.	RPM
				%	ml	mg /L	
HLC-T09	1,0	3	155	0,1	1,0	1	50
HLC-T10	1,0	3	155	0,1	1,0	1	50
R-HLC-T09	1,0	3	155	0,1	1,0	1	50
R-HLC-T10	1,0	3	155	0,1	1,0	1	50
HLC-T11	1,0	3	1011	0,1	1,0	1	50
HLC-T12	1,0	3	1011	0,1	1,0	1	50
R-HLC-T11	1,0	3	1011	0,1	1,0	1	50
R-HLC-T12	1,0	3	1011	0,1	1,0	1	50

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 1 g/m³ de cada uno de los floculantes.

Una vez transcurrido el tiempo de residencia de clarificación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por pH, CN Total, CN Wad, CN Libre y metales totales (ICP).

Tabla N° 3.24: Análisis químico de productos – Exploratoria Continua.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cabeza-T00	10,20	19,496	3,951	7,395	1,304	-	-	-	-
HLC-T09	10,50	0,407	2,578	1,163	0,310	97,91	34,76	84,28	76,20
HLC-T10	10,48	0,433	2,950	2,164	0,474	97,78	25,33	70,73	63,67
R-HLC-T09	10,52	0,435	2,808	2,060	0,440	97,77	28,93	72,14	66,23
R-HLC-T10	10,54	0,475	2,740	1,336	0,306	97,56	30,66	81,93	76,53
HLC-T11	10,40	0,530	2,652	2,062	0,354	97,28	32,88	72,12	72,83
HLC-T12	10,44	0,476	2,713	1,414	0,346	97,56	31,32	80,88	73,49
R-HLC-T11	10,43	0,475	2,583	1,758	0,421	97,56	34,64	76,23	67,68
R-HLC-T12	10,43	0,500	2,752	1,918	0,402	97,44	30,34	74,07	69,16

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

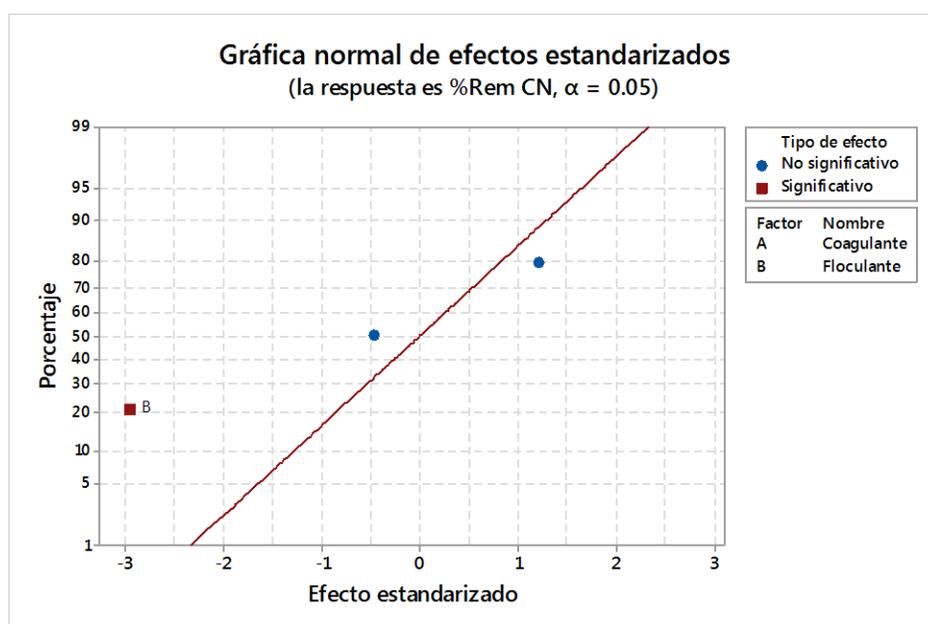
Según los resultados obtenidos se realizó el análisis estadístico para determinar las variables de mayor influencia sobre la remoción de cianuro total, arsénico, cobre y mercurio total, según se detalla a continuación:

Tabla N° 3.25: Tabla de diseño experimental – Exploratoria Continua.

Corrida	A	B	Coagulante	Floculante	% Rem.			
			Tipo	Magnafloc	CNT	As	Cu	Hg
1	-	-	FeCl ₃	155	97,91	34,76	84,28	76,20
2	+	-	Fe ₂ (SO ₄) ₃	155	97,78	25,33	70,73	63,67
3	-	+	FeCl ₃	1011	97,28	32,88	72,12	72,83
4	+	+	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1011	97,56	31,32	80,88	73,49
5	-	-	FeCl ₃	155	97,77	28,93	72,14	66,23
6	+	-	Fe ₂ (SO ₄) ₃	155	97,56	30,66	81,93	76,53
7	-	+	FeCl ₃	1011	97,56	34,64	76,23	67,68
8	+	+	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1011	97,44	30,34	74,07	69,16

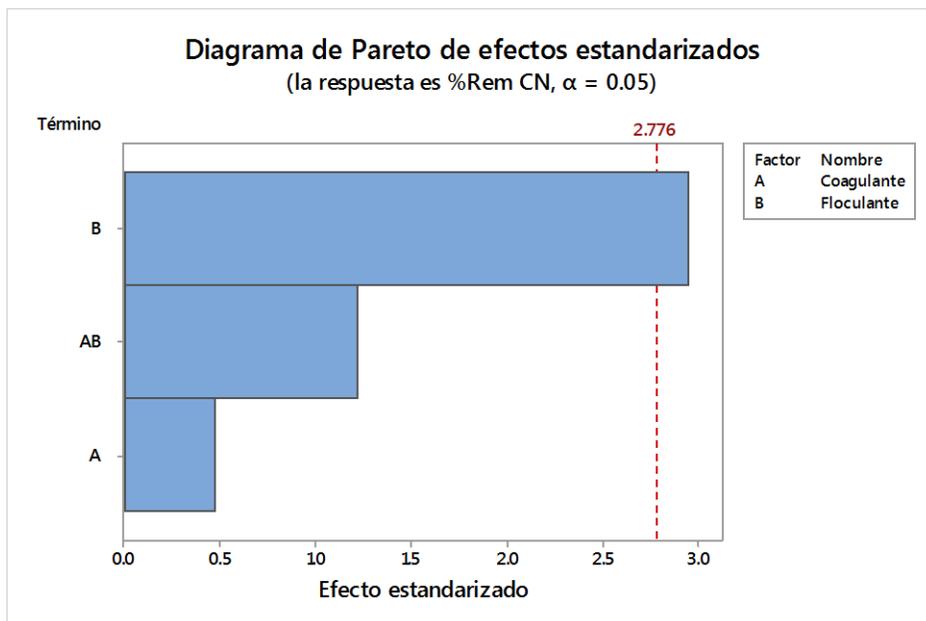
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.9: Efectos estandarizados sobre el %Rem. CNT – Exploratoria Continua.



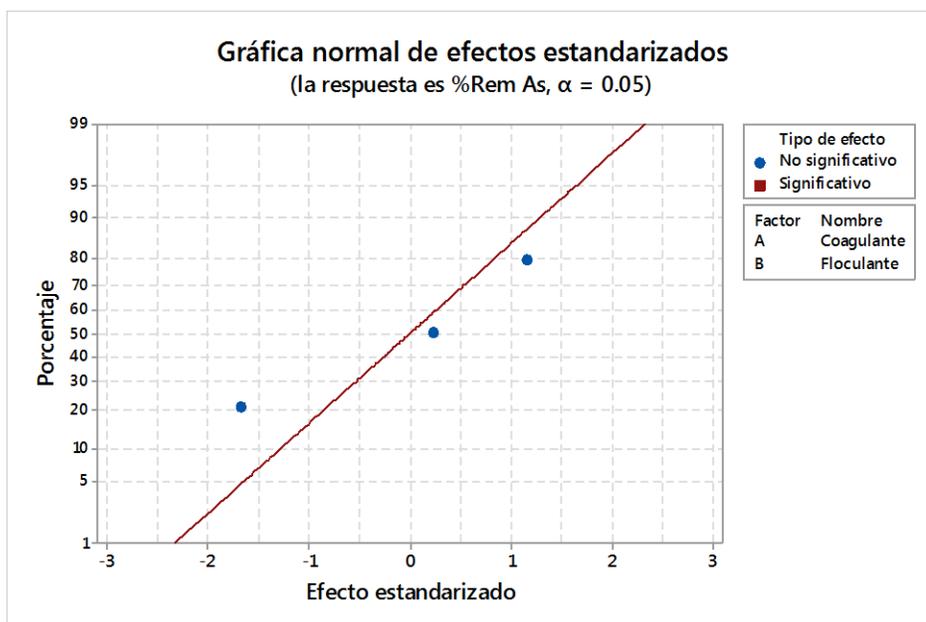
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.10: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. CNT – Exploratoria Continua.



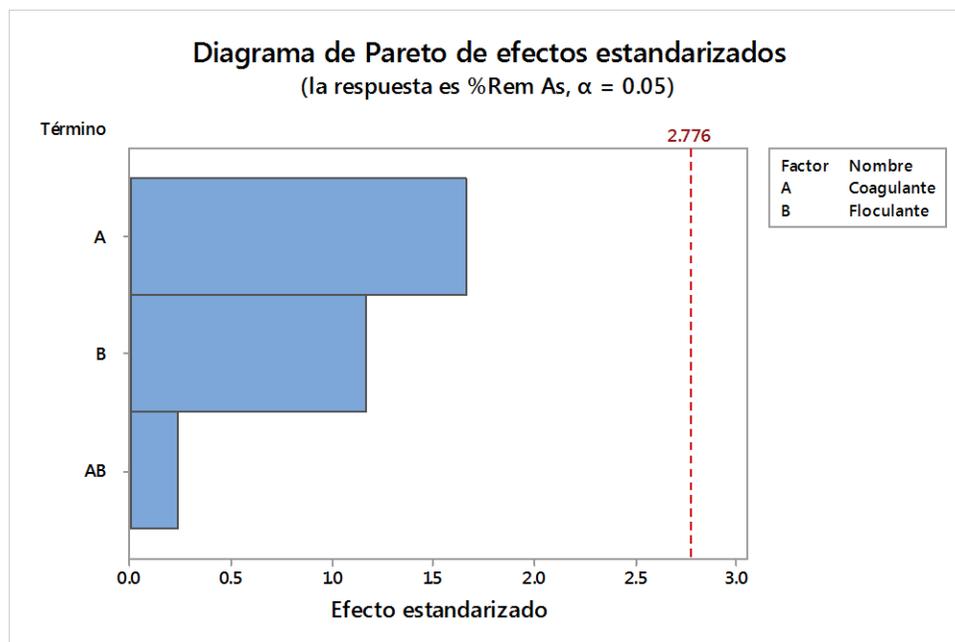
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.11: Diagrama de Efectos estandarizados sobre el %Rem. As – Exploratoria Continua.



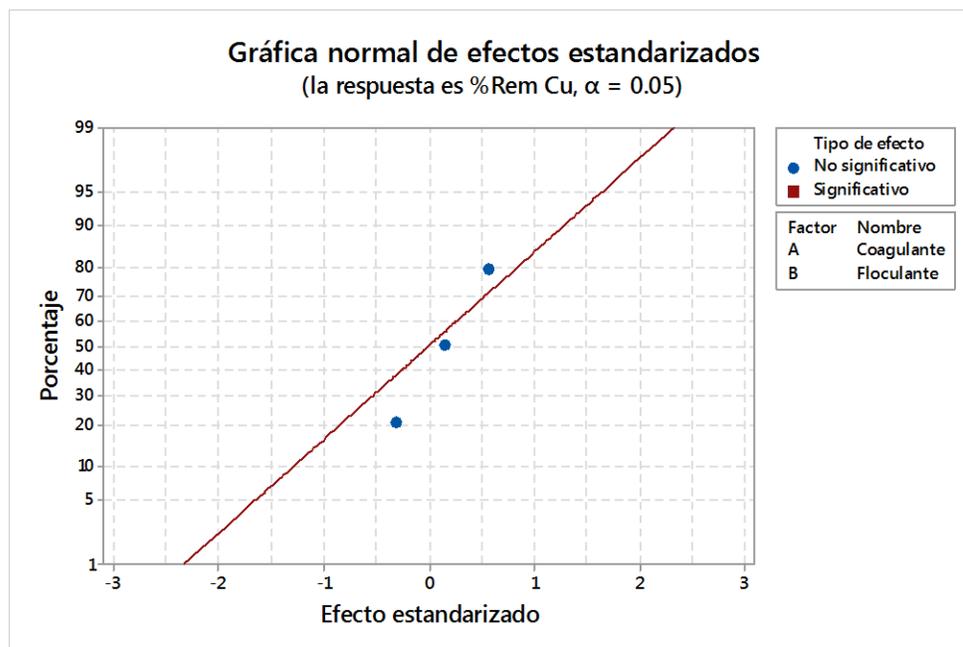
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.12: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. As – Exploratoria Continúa.



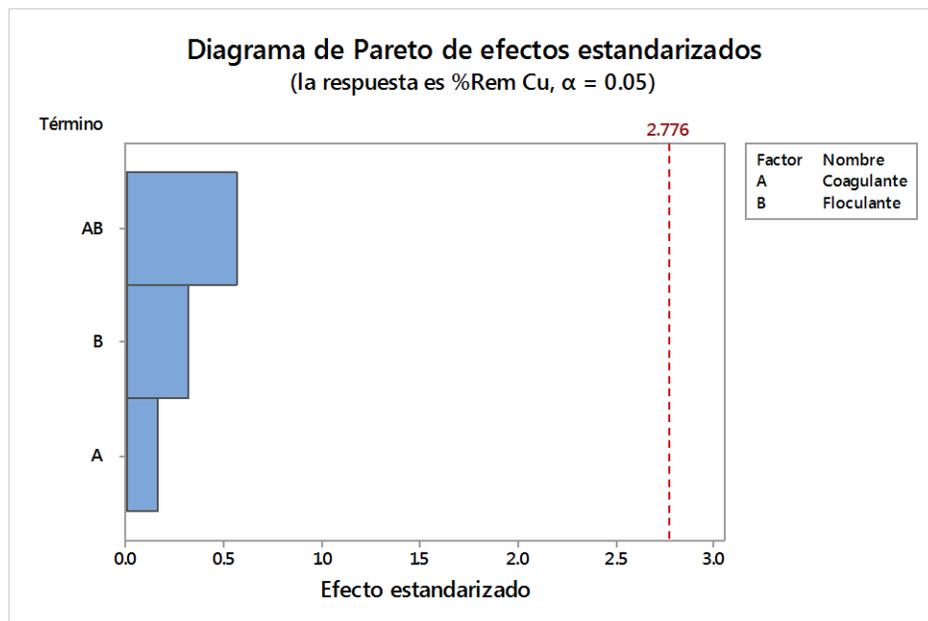
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.13: Diagrama de Efectos estandarizados sobre el %Rem. Cu – Exploratoria Continúa.



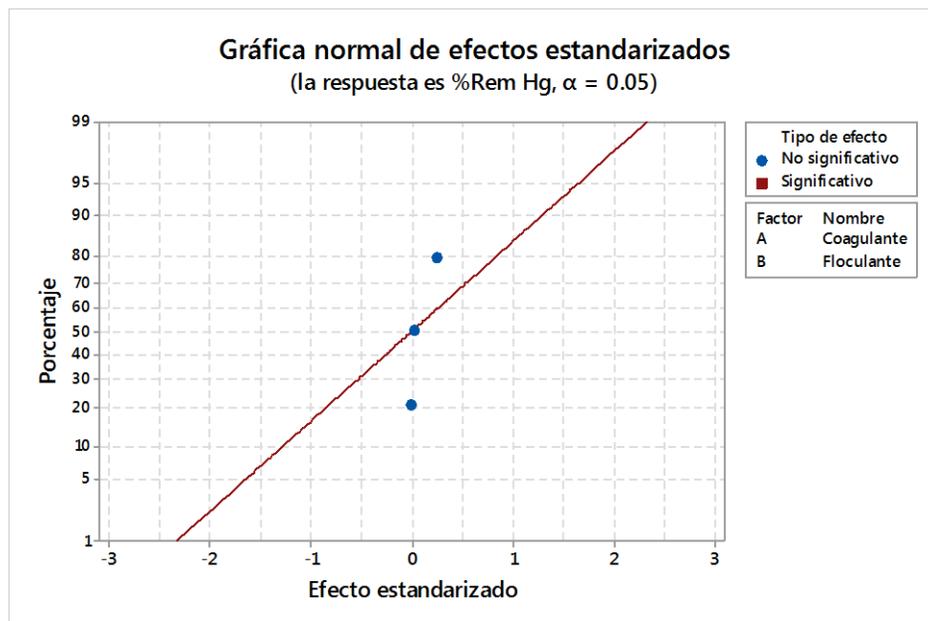
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.14: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. Cu – Exploratoria Contínua.



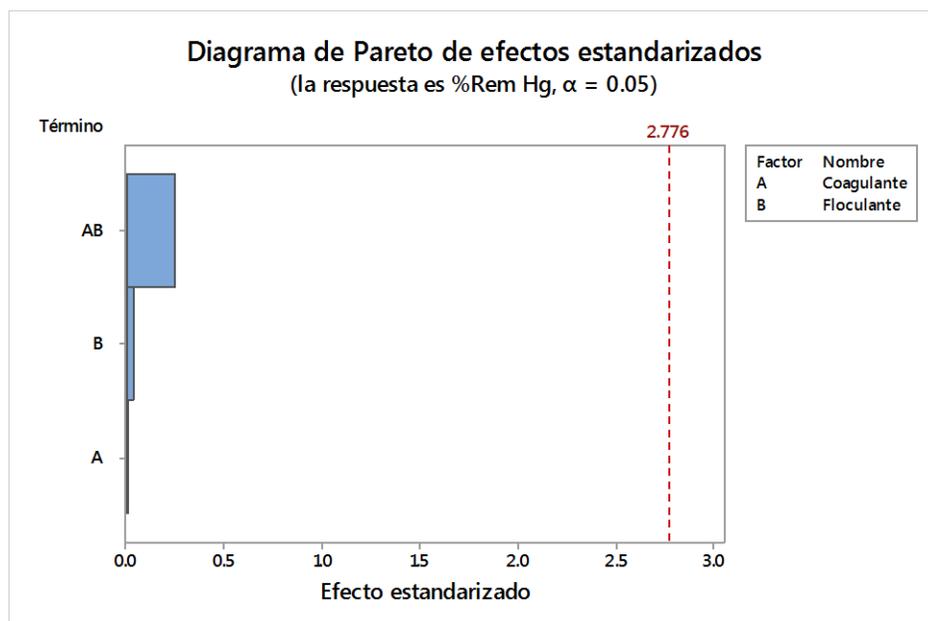
Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.15: Diagrama de Efectos estandarizados sobre el %Rem. Hg – Exploratoria Contínua.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.16: Diagrama de Pareto respecto al %Rem. Hg –
Exploratoria Continua.

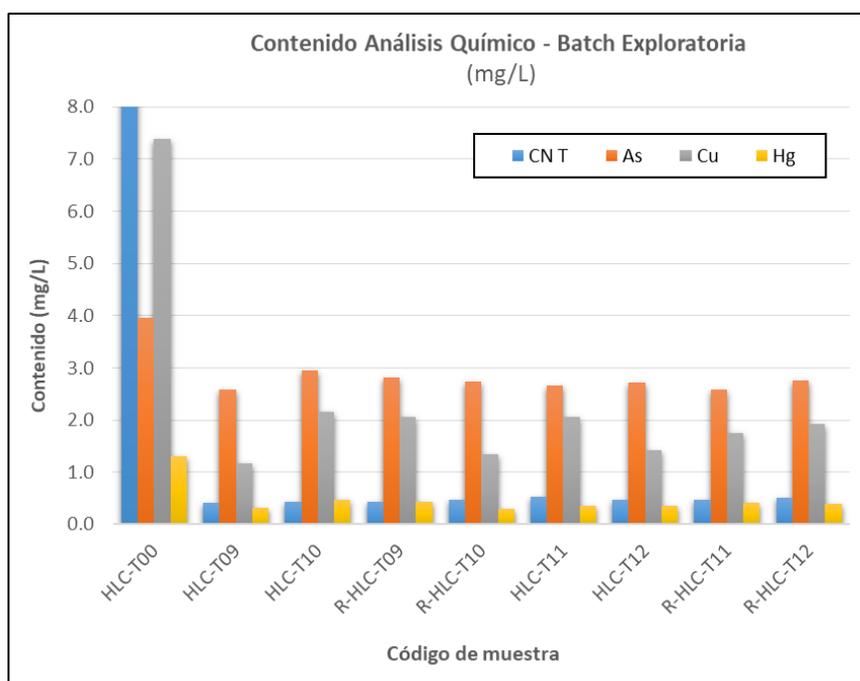


Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Discusión Según las gráficas de efectos estandarizados y diagramas de Pareto podemos, mencionar que no existe ninguna influencia significativa al utilizar en la etapa de coagulación cloruro férrico o sulfato férrico, asimismo los floculantes Magnafloc 155 y Magnafloc 1011 presentan las características similares y no ejercen diferencia alguna en la etapa de clarificación. Sin embargo, la baja eficiencia de remoción de los metales As, Cu y Hg, está directamente relacionada con las variables influyentes de las etapas iniciales de los procesos de Oxidación y Precipitación, según lo observado en la experimentación.

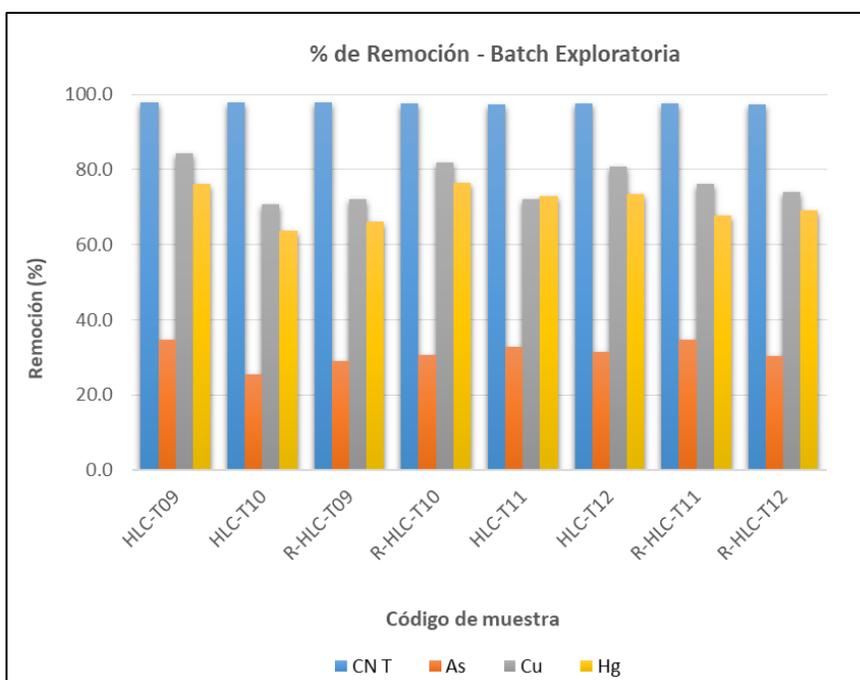
A continuación, se presenta los gráficos que detallan el comportamiento de las pruebas realizadas y el % de remoción:

Gráfica N° 3.17: Contenido en ppm – Exploratoria Continua.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.18: % de remoción – Exploratoria Continua.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

➤ **Selección de floculante – Exploratoria**

Se realizaron pruebas experimentales con el fin de seleccionar el floculante idóneo, las cuales consistieron en evaluar 6 tipos de reactivos a partir de la precipitación con 5 ppm de NaSH. Los floculantes evaluados fueron:

Tabla N° 3.26: Floculantes evaluados – Características básicas.

F1	F2	F3	F4	F5	F6
Magnafloc 338	Magnafloc 155	Magnafloc 1055	Magnafloc 455	Chemlok 2010	MT 42-85
ANIÓNICO	ANIÓNICO	ANIÓNICO	ANIÓNICO	ANIÓNICO	ANIÓNICO

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

A continuación, se presenta el detalle de estas pruebas:

a) Etapa de Precipitación con NaSH

Se realizó las pruebas de precipitación en solución rica con 5 ppm de NaSH a pH de 10,2, con el fin de generar partículas en suspensión. Los parámetros de trabajo se detallan en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.27: Etapa de precipitación validado con NaSH.

Código de Floculante	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	pH Inicial	ETAPA DE PRECIPITACIÓN			
				Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado
				%	ml	mg /L	
F1	1,0	5	10,12	10	0,05	5,00	10,15
F2	1,0	5	10,14	10	0,05	5,00	10,16
F3	1,0	5	10,16	10	0,05	5,00	10,18
F4	1,0	5	10,14	10	0,05	5,00	10,16
F5	1,0	5	10,11	10	0,05	5,00	10,14
F6	1,0	5	10,13	10	0,05	5,00	10,15

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Clarificación

Después de concluido la etapa de precipitación se dosificó los floculantes preparado al 0,1% por cada prueba según detalle con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta a 50 RPM. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

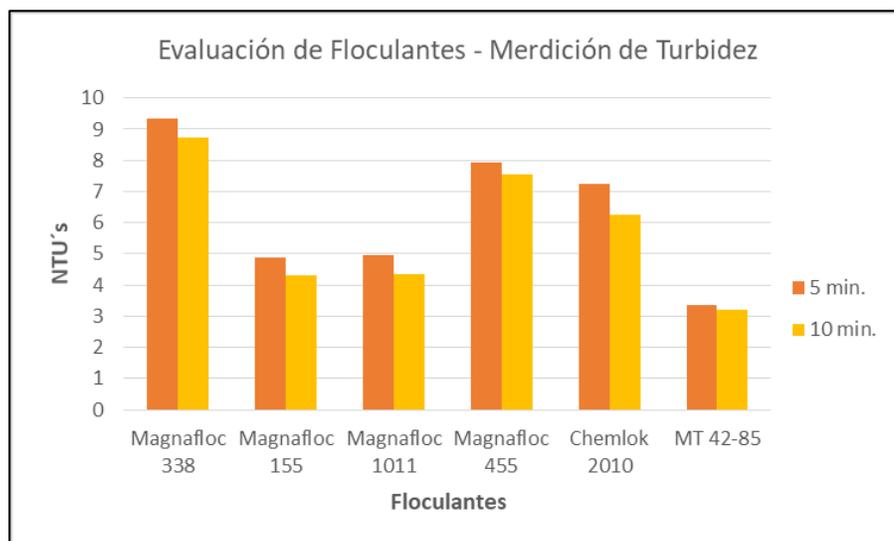
Tabla N° 3.28: Etapa de clarificación – Evaluación de floculantes.

Código de Floc.	Vol. (L)	Tiempo de Agit. (min)	pH Tratado	ETAPA DE CLARIFICACIÓN				
				Conc.	Adición	Dosif.	Turbidez (NTU's)	
				%	ml	mg /L	5 min	10 min
F1	1,0	3	10,15	0,1	1,0	1,00	9,34	8,75
F2	1,0	3	10,16	0,1	1,0	1,00	4,89	4,31
F3	1,0	3	10,18	0,1	1,0	1,00	4,95	4,34
F4	1,0	3	10,16	0,1	1,0	1,00	7,92	7,54
F5	1,0	3	10,14	0,1	1,0	1,00	7,23	6,24
F6	1,0	3	10,15	0,1	1,0	1,00	3,35	3,20

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

De las pruebas se eligió el floculante de acuerdo al menor grado de turbidez (NTU's) en el siguiente orden: el floculante MT 42-85 (F-6) de menor turbidez así como también los floculantes F-2 (Magnafloc 155) y F-3 (Magnafloc 1011), los cuales estos dos últimos fueron probados, dándonos remociones bajas, por lo que, en las pruebas posteriores en la etapa de Clarificación se usará el floculante MT 42-85.

Figura N° 3.4: Selección del floculante de menor turbidez.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Figura N° 3.5: Medición de turbidez a 5 min. – Etapa de clarificación.



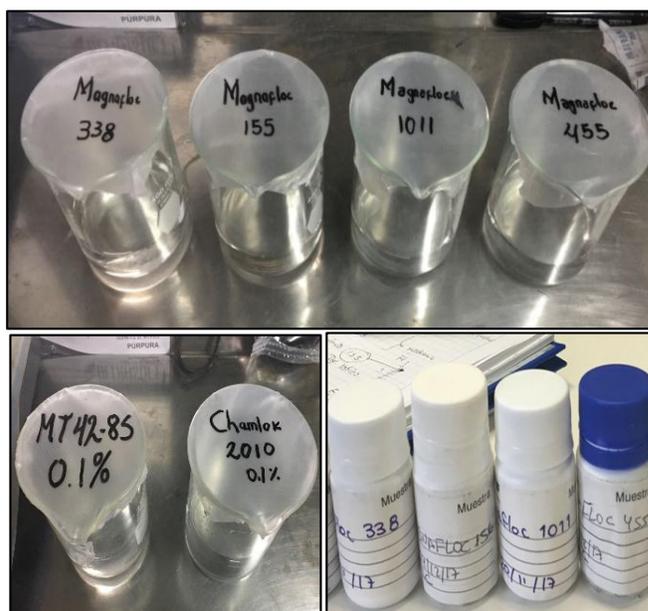
Fuente: Laboratorio Metalúrgico, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Figura N° 3.6: Medición de turbidez a 10 min. – Etapa de clarificación.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Figura N° 3.7: Preparación de floculantes al 0,1%.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.7.2. Caracterización de la Muestra Solución Barren N°2.

Corresponde al análisis químico en ICP 32 elementos (Metales Totales y Disueltos) CN total, Hg (vapor frío) y pH de la muestra representativa de solución barren. Los resultados obtenidos son presentados en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.29: Análisis químico de cabeza – Solución Barren N°2.

Código de Muestra	pH	CN _T	Turbidez	CN _L	CN _{WAD}	Hg (V.F.)
		mg /L	NTU's	mg /L	mg /L	mg /L
Cab.-T00-R	10,15	16,193	13,2	6,020	10,640	1,6147

Fuente de Informe de Ensayo N°MAR1154.R18

Tabla N° 3.30: Análisis químico de cabeza ICP metales totales – Solución Barren N°2.

Ag(t)	Al(t)	As(t)	Ba(t)	Be(t)	Bi(t)	B(t)	Ca(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,03875	1,013	4,1035	0,00742	<0,0003	<0,02	0,03	62,42
Cd(t)	Ce(t)	Co(t)	Cr(t)	Cu(t)	Fe(t)	K(t)	Li(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,00059	<0,02	0,1646	0,0021	8,4581	0,32	4,88	<0,004
Mg(t)	Mn(t)	Mo(t)	Na(t)	Ni(t)	P(t)	Pb(t)	Sb(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,22	0,0282	0,03674	638,14	0,0381	0,35	0,00358	0,0901
Se(t)	SiO₂(t)	Sn(t)	Sr(t)	Ti(t)	Tl(t)	V(t)	Zn(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,044	11,26	0,0003	0,2805	<0,01	0,0004	0,002	0,049

Fuente: Informe de Ensayo N°MAR1154.R18

Tabla N° 3.31: Análisis químico de cabeza ICP metales disueltos – Solución Barren N°2.

Ag(d)	Al(d)	As(d)	Ba(d)	Be(d)	Bi(d)	B(d)	Ca(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,03726	0,75	3,6307	0,00693	<0,0003	<0,02	0,029	59,63
Cd(d)	Ce(d)	Co(d)	Cr(d)	Cu(d)	Fe(d)	K(d)	Li(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,00052	<0,02	0,15633	0,002	7,8114	0,19	4,66	<0,004
Mg(d)	Mn(d)	Mo(d)	Na(d)	Ni(d)	P(d)	Pb(d)	Sb(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,20	0,01139	0,0365	610,38	0,0353	0,31	0,00184	0,0875
Se(d)	SiO₂(d)	Sn(d)	Sr(d)	Ti(d)	Tl(d)	V(d)	Zn(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,041	10,65	0,0002	0,2696	<0,01	0,0004	0,002	0,047

Fuente de Informe de Ensayo N°MAR1154.R18

Con este nuevo resultado de reensayo químico Cabeza-T00-R (Solución Barren N°02) se procedió a dosificar los reactivos y desarrollar las pruebas metalúrgicas batch aplicando peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para la destrucción del cianuro, luego sulfhidrato de sodio (NaSH) para la precipitación del mercurio y finalmente ser filtrados; asimismo probar el proceso sulfato de cobre + peróxido de hidrógeno, el detalle de las pruebas realizadas se presenta a continuación:

3.7.3. Pruebas Metalúrgicas Batch.

➤ Pruebas de Oxidación – Circuito Batch N°01

Se realizaron 4 pruebas con sus réplicas aplicando peróxido de hidrogeno (H₂O₂) a pH de 9,2, a diferentes concentraciones y tiempo de residencia, para luego ser filtradas.

a) Estabilización de pH

Se realizó la estabilización del pH en un rango de 9,2 mediante la adición de ácido sulfúrico diluido al 10%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.32: Estabilización de pH – Batch N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ESTABILIZACIÓN DE pH				pH llegado
			pH inicial	H ₂ SO ₄			
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g /m ³	
HLC-T13	1,0	1	10,11	10	0,60	60	9,30
HLC-T14	1,0	1	10,12	10	0,60	60	9,27
R-HLC-T13	1,0	1	10,13	10	0,60	60	9,27
R-HLC-T14	1,0	1	10,15	10	0,60	60	9,22
HLC-T15	1,0	1	10,10	10	0,60	60	9,19
HLC-T16	1,0	1	10,12	10	0,60	60	9,20
R-HLC-T15	1,0	1	10,10	10	0,60	60	9,16
R-HLC-T16	1,0	1	10,09	10	0,60	60	9,21

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Oxidación

Una vez realizada la estabilización del pH se realizaron las pruebas de destrucción de cianuro mediante la adición de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 50%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.33: Etapa de oxidación con H₂O₂ – Batch N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Oxid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RP M
			%	ml	ppm		
HLC-T13	1,0	40	50	0,40	200	9,16	150
HLC-T14	1,0	40	50	0,80	400	9,18	150
R-HLC-T13	1,0	40	50	0,40	200	9,15	150
R-HLC-T14	1,0	40	50	0,80	400	9,14	150
HLC-T15	1,0	80	50	0,40	200	8,81	150
HLC-T16	1,0	80	50	0,80	400	8,85	150
R-HLC-T15	1,0	80	50	0,40	200	8,81	150
R-HLC-T16	1,0	80	50	0,80	400	8,92	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Una vez culminado el tiempo de residencia de oxidación se procedió a filtrar el 100% de muestra tratada con papel filtro circular # 42*125mm para su envío a análisis químico, los resultados fueron:

Tabla N° 3.34: Análisis químico de productos – Bath N°01.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	% de Remoción		
			mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu
Cabeza-T00-R	10,2	16,193	4,104	8,458	-	-	-
HLC-T13	9,16	0,890	3,785	4,444	94,50	7,77	47,46
HLC-T14	9,18	0,540	3,586	3,417	96,67	12,62	59,61
R-HLC-T13	9,15	1,720	3,734	3,818	89,38	9,01	54,86
R-HLC-T14	9,14	0,660	3,727	3,436	95,92	9,19	59,37
HLC-T15	8,81	1,140	3,727	4,922	92,96	9,17	41,81
HLC-T16	8,85	0,700	3,761	3,591	95,68	8,36	57,55
R-HLC-T15	8,81	0,930	3,716	3,864	94,26	9,45	54,32
R-HLC-T16	8,92	0,720	3,775	3,658	95,55	8,02	56,75

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Según los resultados obtenidos, el de mayor porcentaje de remoción fue a partir de una dosificación de 400 ppm de peróxido de hidrógeno y a un tiempo de 80 minutos de oxidación, lo que nos permite deducir el escenario para la remoción del cianuro total.

Asimismo, con el fin de evaluar el tipo de agente neutralizador ya sea lechada de cal y/o hidróxido de sodio, se evaluarán los siguientes batch, para identificar la eficiencia de remoción de los metales después de la etapa de oxidación para luego ser precipitadas.

➤ **Pruebas de Oxidación / Neutralización con Cal / Precipitación – Circuito Batch N°02**

Se realizaron 4 pruebas con sus réplicas aplicando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con el ratio de consumo y tiempo de oxidación obtenido en el Batch N°01, seguido de la neutralización con lechada de cal al 10%, para luego continuar la etapa de precipitación del mercurio con sulfhidrato de sodio (NaSH) y luego ser filtradas.

a) Estabilización de pH

Se realizó la estabilización del pH en un rango de 9,2 mediante la adición de ácido sulfúrico diluido al 10%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.35: Estabilización de pH – Batch N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ESTABILIZACIÓN DE pH				
			pH inicial	H ₂ SO ₄			pH llegado
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g/m ³	
HLC-T17	1,0	1	10,17	10	0,60	60	9,17
HLC-T18	1,0	1	10,17	10	0,60	60	9,20
R-HLC-T17	1,0	1	10,19	10	0,60	60	9,19
R-HLC-T18	1,0	1	10,17	10	0,60	60	9,21
HLC-T19	1,0	1	10,18	10	0,60	60	9,18
HLC-T20	1,0	1	10,18	10	0,60	60	9,17
R-HLC-T19	1,0	1	10,19	10	0,60	60	9,16
R-HLC-T20	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,10

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Oxidación

Una vez realizada la estabilización del pH se realizaron las pruebas de oxidación mediante la adición de H₂O₂ al 50%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.36: Etapa de oxidación con H₂O₂ – Batch N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN				
			Conc. %	Adición ml	Dosif. ppm	pH Tratado	RPM
			HLC-T17	1,0	80		
HLC-T18	1,0	80	50	0,80	400	8,86	150
R-HLC-T17	1,0	80	50	0,40	200	8,84	150
R-HLC-T18	1,0	80	50	0,80	400	8,86	150
HLC-T19	1,0	80	50	0,40	200	8,91	150
HLC-T20	1,0	80	50	0,80	400	8,91	150
R-HLC-T19	1,0	80	50	0,40	200	8,80	150
R-HLC-T20	1,0	80	50	0,80	400	8,84	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

c) Etapa de Neutralización

Enseguida se realizó pruebas de neutralización de pH hasta obtener un rango de 10,5-11,0 mediante la adición de lechada de cal preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.37: Neutralización de pH con lechada de cal – Batch N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH				pH llegado
			pH inicial	Lechada de Cal			
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g /m ³	
HLC-T17	1,0	3	8,78	10	1,60	129,6	10,80
HLC-T18	1,0	3	8,86	10	1,60	129,6	10,75
R-HLC-T17	1,0	3	8,84	10	1,60	129,6	10,80
R-HLC-T18	1,0	3	8,86	10	1,60	129,6	10,77
HLC-T19	1,0	3	8,91	10	1,60	129,6	10,70
HLC-T20	1,0	3	8,91	10	1,60	129,6	10,72
R-HLC-T19	1,0	3	8,80	10	1,60	129,6	10,71
R-HLC-T20	1,0	3	8,84	10	1,60	129,6	10,69

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 81% de cal útil (según Hojas MSDS – MOLICAL S.A.C.) obtenido es 0,130 Kg /m³.

d) Etapa de Precipitación

Una vez realizada la neutralización del pH se realizaron las pruebas de precipitación de mercurio mediante la adición de NaSH al 10%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.38: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Batch N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm		
HLC-T17	1,0	5	10	0,15	15	10,80	150
HLC-T18	1,0	5	10	0,15	15	10,77	150
R-HLC-T17	1,0	5	10	0,15	15	10,91	150
R-HLC-T18	1,0	5	10	0,15	15	10,80	150
HLC-T19	1,0	5	10	0,50	50	11,22	150
HLC-T20	1,0	5	10	0,50	50	11,28	150
R-HLC-T19	1,0	5	10	0,50	50	11,28	150
R-HLC-T20	1,0	5	10	0,50	50	11,25	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Una vez culminado el tiempo de residencia de precipitación se procedió a filtrar el 100% de muestra tratada con papel filtro circular # 42*125mm para su envío a análisis químico, lo cual se detalla a continuación:

Tabla N° 3.39: Análisis químico de productos – Batch N°02.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cab-T00-R	10,15	16,193	4,104	8,458	1,6147	-	-	-	-
HLC-T17	10,80	0,625	3,690	0,618	0,2902	96,14	10,07	92,69	82,03
HLC-T18	10,77	0,341	2,499	0,380	0,1505	97,89	39,10	95,51	90,68
R-HLC-T17	10,91	0,570	3,258	0,570	0,3165	96,48	20,61	93,26	80,40
R-HLC-T18	10,80	0,319	2,377	0,297	0,1551	98,03	42,07	96,49	90,39
HLC-T19	11,22	0,765	3,431	3,009	0,3715	95,28	16,39	64,43	76,99
HLC-T20	11,28	0,339	1,938	0,181	0,1341	97,91	52,77	97,86	91,70
R-HLC-T19	11,28	0,705	2,990	1,975	0,4708	95,65	27,15	76,65	70,84
R-HLC-T20	11,25	0,407	2,528	0,194	0,1859	97,49	38,39	96,09	88,49

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Comentarios: Según los resultados obtenidos se logra una considerable eficiencia de remoción los cuales llegaron a un 52,77% de As, 97,86% de Cu y 91,70% de Hg total, utilizando la lechada de cal como neutralizador antes de la etapa de precipitación con NaSH.

➤ **Pruebas de Oxidación / Neutralización con NaOH / Precipitación - Circuito Batch N°03**

Se realizaron 4 pruebas con sus réplicas aplicando peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con el ratio de consumo obtenido en el Batch N°01, seguido de la neutralización con hidróxido de sodio preparado al 10%, para luego seguir la etapa de precipitación con NaSH y luego ser filtradas.

a) Estabilización de pH

Se realizó la estabilización del pH en un rango de 9,2 mediante la adición de ácido sulfúrico diluido al 10%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.40: Estabilización de pH – Batch N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ESTABILIZACIÓN DE pH				pH llegado
			pH inicial	H ₂ SO ₄			
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g/m ³	
HLC-T21	1,0	1	10,18	10	0,60	60	9,19
HLC-T22	1,0	1	10,18	10	0,60	60	9,18
R-HLC-T21	1,0	1	10,17	10	0,60	60	9,20
R-HLC-T22	1,0	1	10,20	10	0,60	60	9,21
HLC-T23	1,0	1	10,15	10	0,60	60	9,17
HLC-T24	1,0	1	10,14	10	0,60	60	9,20
R-HLC-T23	1,0	1	10,14	10	0,60	60	9,18
R-HLC-T24	1,0	1	10,13	10	0,60	60	9,22

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Oxidación

Una vez realizada la estabilización del pH se realizaron las pruebas de oxidación mediante la adición de H_2O_2 al 50%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.41: Etapa de oxidación con H_2O_2 – Batch N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Oxid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm		
HLC-T21	1,0	80	50	0,40	200	8,85	150
HLC-T22	1,0	80	50	0,80	400	8,88	150
R-HLC-T21	1,0	80	50	0,40	200	8,86	150
R-HLC-T22	1,0	80	50	0,80	400	8,85	150
HLC-T23	1,0	80	50	0,40	200	8,83	150
HLC-T24	1,0	80	50	0,80	400	8,90	150
R-HLC-T23	1,0	80	50	0,40	200	8,82	150
R-HLC-T24	1,0	80	50	0,80	400	8,93	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

c) Etapa de Neutralización

Enseguida se realizó pruebas de neutralización de pH hasta obtener un rango de 10,5-11,0 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.42: Neutralización de pH con NaOH – Batch N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH				pH llegado
			pH inicial	NaOH			
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g/m ³	
HLC-T21	1,0	3	8,85	10	1,40	140	10,68
HLC-T22	1,0	3	8,88	10	1,40	140	10,69
R-HLC-T21	1,0	3	8,86	10	1,40	140	10,70
R-HLC-T22	1,0	3	8,85	10	1,40	140	10,72
HLC-T23	1,0	3	8,83	10	1,40	140	10,57
HLC-T24	1,0	3	8,90	10	1,40	140	10,59
R-HLC-T23	1,0	3	8,82	10	1,40	140	10,57
R-HLC-T24	1,0	3	8,93	10	1,40	140	10,63

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de NaOH obtenido es 0,140 Kg /m³.

d) Etapa de Precipitación

Una vez realizada la neutralización del pH se realizaron las pruebas de precipitación de mercurio mediante la adición de NaSH al 10%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.43: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Batch N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc. %	Adición ml	Dosif. ppm	pH Tratado	RPM
			HLC-T21	1,0	5	10	0,15
HLC-T22	1,0	5	10	0,15	15	10,73	150
R-HLC-T21	1,0	5	10	0,15	15	10,70	150
R-HLC-T22	1,0	5	10	0,15	15	10,69	150
HLC-T23	1,0	5	10	0,50	50	10,69	150
HLC-T24	1,0	5	10	0,50	50	10,70	150
R-HLC-T23	1,0	5	10	0,50	50	10,70	150
R-HLC-T24	1,0	5	10	0,50	50	10,69	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Una vez culminado el tiempo de residencia de precipitación se procedió a filtrar el 100% de muestra tratada con papel filtro circular # 42*125mm para su envío a análisis químico, lo cual se detalla a continuación:

Tabla N° 3.44: Análisis químico de productos – Batch N°03.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cabeza-T00-R	10,15	16,193	4,1035	8,4581	1,6147	-	-	-	-
HLC-T21	10,78	1,050	4,086	3,153	0,6317	93,52	0,42	62,72	60,88
HLC-T22	10,73	0,535	3,984	2,681	0,6508	96,70	2,90	68,30	59,70
R-HLC-T21	10,70	0,740	3,852	3,088	0,6391	95,43	6,13	63,49	60,42
R-HLC-T22	10,69	0,620	3,692	2,664	0,6539	96,17	10,03	68,51	59,50
HLC-T23	10,69	0,497	3,887	7,067	0,7811	96,93	5,29	16,45	51,63
HLC-T24	10,70	0,945	4,044	7,531	1,1339	94,16	1,46	10,97	29,78
R-HLC-T23	10,70	0,520	3,848	7,108	0,7910	96,79	6,23	15,96	51,01
R-HLC-T24	10,69	0,975	4,060	7,122	1,1498	93,98	1,06	15,80	28,79

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Comentarios: Según los resultados obtenidos se logra una baja eficiencia de remoción los cuales llegaron a un 10,03% de As, 68,51% de Cu y 59,50% de Hg total, utilizando el hidróxido de sodio como neutralizador antes de la etapa de precipitación con NaSH.

➤ **Pruebas con Sulfato de Cobre + Peróxido de Hidrógeno / Neutralización / Precipitación – Circuito Batch N°04**

Se realizaron 4 pruebas aplicando Sulfato de Cobre Pentahidratado (CuSO₄.5H₂O) más peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con el ratio de consumo obtenido en el Batch N°01 previo acondicionamiento de la solución con y

sin ayuda de aire seguido de la neutralización con lechada de cal al 10% (de eficiente remoción), para luego continuar la etapa de precipitación con NaSH, pero en este caso evaluando el tiempo de precipitación.

a) Acondicionamiento de pH

Se realizaron 4 pruebas acondicionando el pH, la cual consistió en llevar a la solución de su pH natural 10,15 a un pH <9,2 utilizando sulfato de cobre pentahidratado a fin de que la solución contenga Cu disuelto para aplicar el peróxido de hidrógeno. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.45: Acondicionamiento de pH – Batch N°04.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ACONDICIONAMIENTO DE pH					pH tratado
			pH Inicial	CuSO ₄ .5H ₂ O				
				Conc.	Adición	Dosif.	Cu	
				%	ml	mg /L	mg /L	
HLC-T25	1,0	3	10,14	10	2,00	300	76,35	9,17
HLC-T26	1,0	3	10,15	10	2,00	300	76,35	9,18
HLC-T27	1,0	3	10,14	10	2,00	300	76,35	9,17
HLC-T28	1,0	3	10,14	10	2,00	300	76,35	9,17

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Oxidación

Una vez realizada el acondicionamiento del pH se realizaron las pruebas de oxidación mediante la adición de H₂O₂ al 50% con y sin ayuda de aire.

Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.46: Etapa de oxidación con H₂O₂ – Batch N°04.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Oxid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN						
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	O ₂	ORP	RP M
			%	ml	ppm			mv	
HLC-T25	1,0	80	50	0,80	400	9,19	Aire	-114,1	150
HLC-T26	1,0	80	50	0,80	400	9,13	-	-109,9	150
HLC-T27	1,0	80	50	0,80	400	9,20	Aire	-114,4	150
HLC-T28	1,0	80	50	0,80	400	9,17	-	-112,0	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Así mismo con el fin de mantener el rango de pH 9,15-9,25; se dosificó 1,10 mL/L de ácido sulfúrico diluido al 10% equivalente a 59,8 g/m³, a la vez se dosificó 0,16 mL/L de lechada de cal al 10% equivalente a 0,13 g/m³.

* Este dato es referencial como estudio para la remoción de los metales.

c) Etapa de Neutralización

Se realizó pruebas de neutralización de pH hasta obtener un rango de 10,5-11,0 mediante la adición de lechada de cal preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.47: Neutralización de pH – Batch N°04.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH					
			pH inicial	Lechada de Cal			ORP	pH llegado
				Conc.	Adición	Dosif.		
				%	ml	g /m ³	mv	
HLC-T25	1,0	3	9,19	10	1,60	129,6	-214,2	10,80
HLC-T26	1,0	3	9,13	10	1,60	129,6	-212,4	10,70
HLC-T27	1,0	3	9,20	10	1,60	129,6	-211,2	10,71
HLC-T28	1,0	3	9,17	10	1,60	129,6	-217,0	10,74

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 81% de cal útil (según hojas MSDS – MOLICAL S.A.C.) es 0,130 Kg /m³.

d) Etapa de Precipitación

Una vez realizada la neutralización del pH se realizaron las pruebas de precipitación de mercurio mediante la adición de NaSH al 10%, evaluando tiempo de residencia. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.48: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Batch N°04.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN					
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	ORP mv	RP M
			%	ml	ppm			
HLC-T25	1,0	30	10	0,50	50	10,92	-212,0	150
HLC-T26	1,0	30	10	0,50	50	10,88	-210,0	150
HLC-T27	1,0	60	10	0,50	50	10,78	-204,4	150
HLC-T28	1,0	60	10	0,50	50	10,90	-210,6	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Una vez culminado el tiempo de residencia de precipitación se procedió a filtrar el 100% de muestra tratada con papel filtro circular # 42*125mm para su envío a análisis químico, los resultados están en proceso de análisis químico.

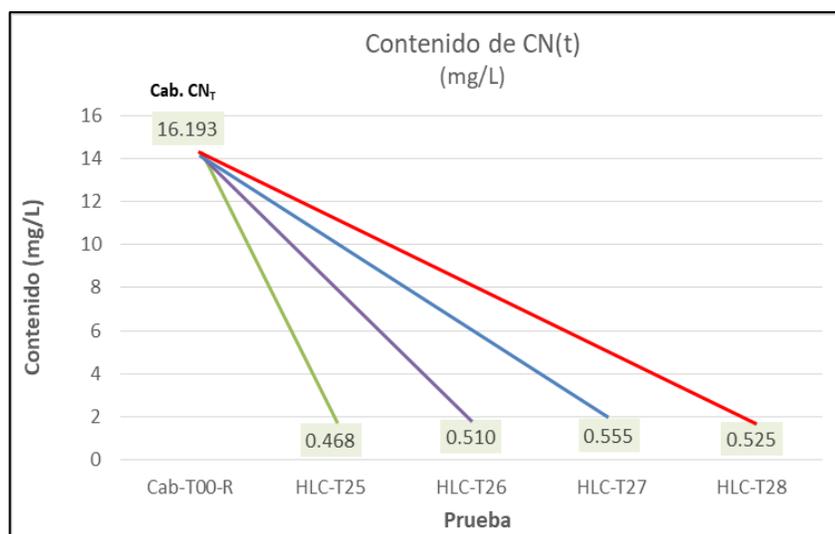
Tabla N° 3.49: Análisis químico de productos – Batch N°04.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cab-T00-R	10,15	16,193	4,1035	8,4581	1,6147	-	-	-	-
HLC-T25	10,92	0,468	1,947	0,186	0,0877	97,11	52,56	97,80	94,57
HLC-T26	10,90	0,510	2,287	0,212	0,0928	96,85	44,27	97,49	94,25
HLC-T27	10,78	0,555	1,950	0,179	0,0997	96,57	52,48	97,89	93,83
HLC-T28	10,90	0,525	2,355	0,188	0,0900	96,76	42,62	97,78	94,43

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

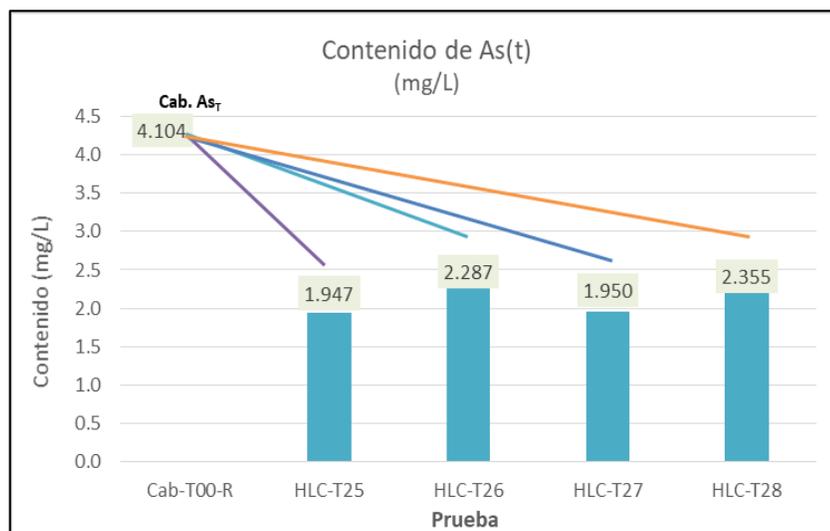
Comentarios: Según los resultados obtenidos en estas pruebas Batch N°04 se logra una eficiente remoción llegando a remover un 97,11% de CN total, 52,56 % de As, 97,80% de Cu y 94,57% de Hg total, las cuales nos indican que es necesario acondicionar con cobre disuelto a la solución barren para acelerar la reacción a fin de oxidar el cianuro a cianato con peróxido de hidrógeno, para luego neutralizar la solución con lechada de cal hasta un $pH < 10,5$ a fin de precipitar el arsénico y mercurio con NaSH, enseguida coagularlos y finalmente clarificarlos con un floculante idóneo.

Gráfica N° 3.19: Comportamiento del CN (total) – Batch N°04.



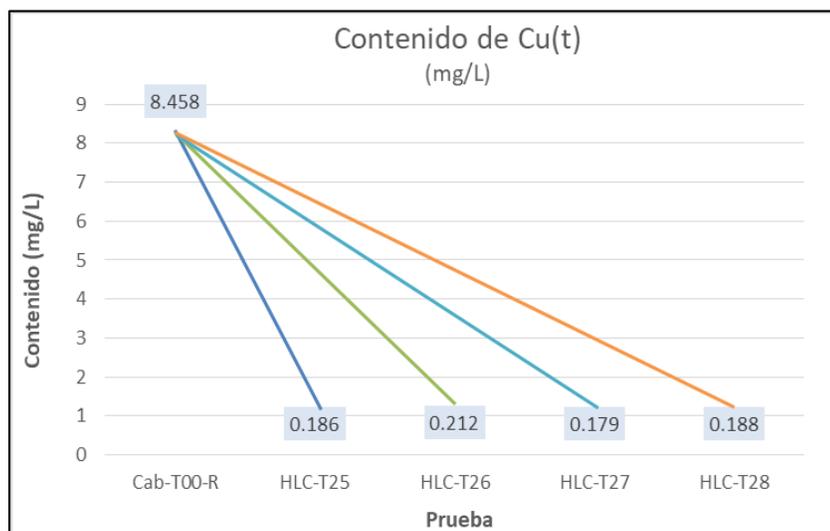
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.20: Comportamiento del arsénico – Batch N°04.



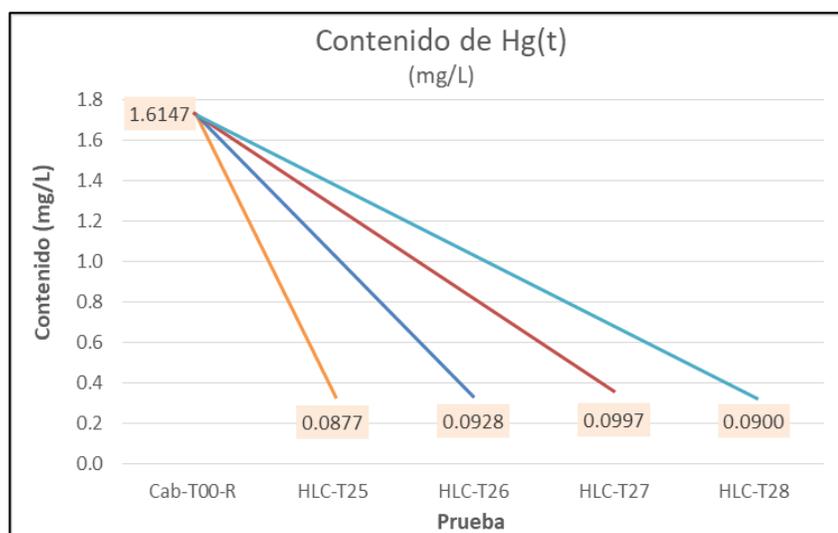
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.21: Comportamiento del cobre – Batch N°04.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.22: Comportamiento del mercurio – Batch N°04.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.7.4. Caracterización de la Muestra Solución Barren N°3.

Corresponde al reensayo de análisis químico en ICP 32 elementos (Metales Totales), CN total, Hg y pH de la muestra representativa de solución barren. Los resultados obtenidos son presentados en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.50: Análisis químico de cabeza – Solución Barren N°3.

Código de Muestra	pH	Turbidez	CN _T	As	Hg	NH ₃	SO ₄ ⁼
		NTU	mg /L	mg /L	mg /L	mg /L	mg /L
Cab.-T00-R1	10,15	13,0	16,05	4,638	1,1819	42,95	616

Fuente: Informes de Ensayo N°ABR1071.R18 y N°MAY1069.R18

Tabla N° 3.51: Análisis químico de cabeza ICP metales totales – Solución Barren N°3.

Ag(t)	Al(t)	As(t)	Ba(t)	Be(t)	Bi(t)	B(t)	Ca(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,042	1,208	4,638	0,009	<0,0003	<0,02	0,029	59,840
Cd(t)	Ce(t)	Co(t)	Cr(t)	Cu(t)	Fe(t)	K(t)	Li(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,0006	<0,02	0,176	0,004	9,447	0,29	1,1819	<0,004
Mg(t)	Mn(t)	Mo(t)	Na(t)	Ni(t)	P(t)	Pb(t)	Sb(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,19	0,038	0,039	892,390	0,045	0,320	0,037	0,1048
Se(t)	SiO₂(t)	Sn(t)	Sr(t)	Ti(t)	Tl(t)	V(t)	Zn(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,065	10,62	<0,0001	0,3494	<0,01	0,0004	0,002	0,052

Fuente: Informe de Ensayo N°ABR1071.R18

Con este nuevo resultado de reensayo químico Cabeza-00-R1 (Solución Barren N°03) se procedió a realizar las dosificación de reactivos y desarrollar las pruebas metalúrgicas en continuo aplicando sulfato de cobre pentahidratado (CuSO₄.5H₂O) más peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para la destrucción del cianuro, luego sulfhidrato de sodio (NaSH) para la precipitación del mercurio, cloruro férrico para la remoción del arsénico y finalmente ser clarificados con el floculante MT 42-85 (de buena eficiencia), el detalle de las pruebas realizadas se presenta a continuación:

3.7.5. Pruebas Metalúrgicas en Continuo.

➤ Pruebas con $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + Peróxido de Hidrógeno / Neutralización / Precipitación / Coagulación y Clarificación – Continuo N°01

Se realizó una prueba aplicando sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) más peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con el ratio de consumo obtenido en las pruebas batch previo acondicionamiento de la solución con aire seguido de la neutralización con lechada de cal al 10% hasta pH de 10.5-11.0, para luego continuar la etapa de precipitación con NaSH, adicionando el coagulante cloruro férrico (FeCl_3) y finalmente seguir la etapa de clarificación con el floculante MT 42-85.

a) Acondicionamiento de pH

Se realizó una prueba de acondicionamiento de pH, la cual consistió en dosificar a la solución sulfato de cobre pentahidratado a fin de que la solución contenga Cu disuelto para aplicar el peróxido de hidrógeno con acondicionamiento de aire. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.52: Acondicionamiento de pH – Continuo N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ACONDICIONAMIENTO DE pH					pH tratado
			pH Inicial	CuSO ₄ ·5H ₂ O			Cu	
				Conc. %	Adición ml	Dosif. mg /L		
HLC-T29	5,0	3	10,15	10	10,00	200	50,9	10,12

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Oxidación

Una vez acondicionado la solución con cobre se realizó la prueba de oxidación mediante la adición de H_2O_2 al 50%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.53: Etapa de oxidación con H_2O_2 – Continuo N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Oxid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN					
			Conc.	Adición	Dosif.	Aire	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm	ppm		
HLC-T29	5,0	60	50	4,00	400	8,50	10,23	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

c) Etapa de Neutralización

Enseguida se realizó prueba de neutralización de pH hasta obtener un rango de 10,5-11,0 mediante la adición de lechada de cal preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.54: Neutralización de pH – Continuo N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH					
			pH inicial	Lechada de Cal			pH Tratado	RPM
				Conc.	Adición	Dosif.		
				%	ml	g /m ³		
HLC-T29	5,0	3	10,23	10	0,80	64,8	10,58	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 81% de cal útil (según hojas MSDS – MOLICAL S.A.C.) es 0,065 Kg /m³.

d) Etapa de Precipitación

Una vez realizada la neutralización del pH se realizó la prueba de precipitación de mercurio mediante la adición de NaSH al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.55: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Continuo N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm		
HLC-T29	5,0	15	10	2,5	50	10,62	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

e) Etapa de Coagulación

Una vez culminada la etapa de precipitación se procedió a dosificar cloruro férrico (FeCl_3) en razón de 72 mg/L acondicionadas durante 3 minutos. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.56: Etapa de coagulación – Continuo N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Coag. (min)	ETAPA DE COAGULACIÓN				
			Densidad	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			g/cm^3	ml	mg /L		
HLC-T29	5,0	3	1,43	0,25	71,5	10,57	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

f) Etapa de Clarificación

Después de concluido la etapa de precipitación / coagulación, se dosificó el floculante MT 42-85, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta a 50 RPM. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.57: Etapa de clarificación – Continuo N°01.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Agit. (min)	Floculante	ETAPA DE CLARIFICACIÓN			
				Conc.	Adición	Dosif.	RPM
				%	ml	mg /L	
HLC-T29	5,0	15	MT 42-85	0,1	5,0	1,00	50

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 1 g/m³ de floculante MT 42-85.

Una vez transcurrido el tiempo de residencia de clarificación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por pH, CN Total y metales totales (ICP).

Tabla N° 3.58: Análisis químico de productos – Continuo N°01.

Código de Muestra	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
		mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cab-T00-R1	16,050	4,638	9,447	1,1819				
HLC-T29	0,095	0,954	0,832	0,1664	99,41	79,44	91,19	85,92

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Comentarios: Según los resultados obtenidos se logra una considerable eficiencia de remoción los cuales llegaron a un 99,41% de CN total, 79,44% de As, 91,19% de Cu y 85,92% de Hg total, estando el contenido de estos metales por encima de los LMP.

➤ **Pruebas con CuSO₄.5H₂O / Neutralización / Precipitación / Peróxido de Hidrógeno / Coagulación y Clarificación – Continuo N°02**

Se realizó una prueba aplicando sulfato de cobre pentahidratado (CuSO₄.5H₂O) con neutralización con lechada de cal, enseguida pasar a la etapa de precipitación con NaSH, para luego dosificar el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con el ratio de consumo obtenido en las pruebas batch previo acondicionamiento de la solución con aire, seguido de la adición del coagulante cloruro férrico (FeCl₃) durante 15 minutos y finalmente pasar a la etapa de clarificación con el floculante MT 42-85.

a) Acondicionamiento de pH

Se realizó una prueba de acondicionamiento de pH, la cual consistió en dosificar a la solución sulfato de cobre pentahidratado a fin de que la solución contenga Cu disuelto para aplicar el peróxido de hidrógeno con acondicionamiento de aire. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.59: Acondicionamiento de pH – Continuo N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ACONDICIONAMIENTO DE pH					pH tratado
			pH Inicial	CuSO ₄ .5H ₂ O			Cu	
				Conc. %	Adición ml	Dosif. mg /L		
HLC-T30	5,0	3	10,15	10	10,00	200	50,9	10,11

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Neutralización

Enseguida se realizó prueba de neutralización de pH hasta obtener un rango de 10,5-11,0 mediante la adición de lechada de cal preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.60: Neutralización de pH – Continuo N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH					
			pH inicial	Lechada de Cal			pH Tratado	RPM
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g /m ³		
HLC-T30	5,0	3	10,11	10	0,8	64,8	10,58	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 81% de cal útil (según hojas MSDS – MOLICAL S.A.C.) es 0,065 Kg /m³.

c) Etapa de Precipitación

Una vez realizada la neutralización del pH se realizó la prueba de precipitación de mercurio mediante la adición de NaSH al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.61: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Continuo N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc. %	Adición ml	Dosif. ppm	pH Tratado	RPM
			HLC-T30	5,0	15		

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

d) Etapa de Oxidación

Una vez precipitados la solución con NaSH previa etapa de neutralización se realizó la prueba de oxidación mediante la adición de H_2O_2 al 50%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.62: Etapa de oxidación con H_2O_2 – Continuo N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN					
			Conc.	Adición	Dosif.	Aire	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm	ppm		
HLC-T30	5,0	60	50	4,00	400	8,52	10,23	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

e) Etapa de Coagulación

Una vez culminada la etapa de oxidación se procedió a dosificar cloruro férrico ($FeCl_3$) en razón de 72 mg/L acondicionadas durante 15 minutos.

Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.63: Etapa de coagulación – Continuo N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Coag. (min)	ETAPA DE COAGULACIÓN				
			Densidad	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			g/cm ³	ml	mg /L		
HLC-T30	5,0	15	1,43	0,25	71,5	10,22	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

f) Etapa de Clarificación

Después de concluido la etapa de precipitación / coagulación, se dosificó el floculante MT 42-85, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta a 50 RPM. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.64: Etapa de clarificación – Continuo N°02.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Agit. (min)	Floculante	ETAPA DE CLARIFICACIÓN			
				Conc.	Adición	Dosif.	RPM
				%	ml	mg /L	
HLC-T30	5,0	3	MT 42-85	0,1	5,0	1,00	50

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 1 g/m³ de floculante MT 42-85.

Una vez transcurrido el tiempo de residencia de clarificación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por pH, CN Total y metales totales (ICP).

Tabla N° 3.65: Análisis químico de productos – Continuo N°02.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cab-T00-R1	-	16,050	4,638	9,447	1,1819				
HLC-T30	10,92	0,345	1,718	0,611	0,0991	97,85	62,97	93,53	91,32

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Discusión: Según los resultados obtenidos se logra una considerable eficiencia de remoción los cuales llegaron a un 97,85% de CN total, 62,97% de As, 93,53% de Cu y 91,32% de Hg total, estando el contenido de estos metales por encima de los LMP.

➤ **Pruebas con $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + Peróxido de Hidrógeno / Neutralización / Precipitación / Coagulación y Clarificación – Continuo N°03**

Se realizaron 4 pruebas aplicando sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) más peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con el ratio de consumo obtenido en las pruebas batch previo acondicionamiento de la solución con aire seguido de la neutralización con lechada de cal al 10% hasta pH de 11,5-12,0, para luego continuar la etapa de precipitación con NaSH, seguido de la adición del coagulante cloruro férrico (FeCl_3) durante 35 minutos y finalmente seguir la etapa de clarificación con el floculante MT 42-85.

a) Acondicionamiento de pH

Se realizaron 4 pruebas de acondicionamiento de pH, la cual consistió en dosificar a la solución sulfato de cobre pentahidratado a fin de que la solución contenga Cu disuelto para aplicar el peróxido de hidrógeno con acondicionamiento de aire. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.66: Acondicionamiento de pH – Continuo N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ACONDICIONAMIENTO DE pH					pH tratado
			pH Inicial	CuSO ₄ ·5H ₂ O				
				Conc. %	Adición ml	Dosif. mg /L	Cu mg /L	
HLC-T31	5,0	3	10,17	10	10,00	200	50,9	10,12
R-HLC-T31	5,0	3	10,14	10	10,00	200	50,9	10,11
HLC-T32	5,0	3	10,14	10	10,00	200	50,9	10,13
R-HLC-T32	5,0	3	10,16	10	10,00	200	50,9	10,13

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

b) Etapa de Oxidación

Una vez acondicionado la solución con cobre se realizó la prueba de oxidación mediante la adición de H₂O₂ al 50%. Los parámetros de trabajo fueron:

Tabla N° 3.67: Etapa de oxidación con H₂O₂ – Continuo N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE OXIDACIÓN					
			Conc.	Adición	Dosif.	Aire	pH Tratado	RPM
			%	ml	ppm	ppm		
HLC-T31	5,0	60	50	4,00	400	8,50	9,25	150
R-HLC-T31	5,0	60	50	4,00	400	8,51	9,32	150
HLC-T32	5,0	60	50	4,00	400	8,52	10,56	150
R-HLC-T32	5,0	60	50	4,00	400	8,51	10,58	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Cabe resaltar que se hicieron 2 pruebas sin mantener el rango de pH de entre 10,5-11,0, mientras que a las dos siguientes si se mantuvo el pH en esta etapa de oxidación siendo el consumo de cal igual a 0,049 kg/m³.

c) Etapa de Neutralización

Enseguida se realizó prueba de neutralización de pH hasta obtener un rango de 11,5-12,0 mediante la adición de lechada de cal preparado al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.68: Neutralización de pH – Continuo N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	NEUTRALIZACIÓN DE pH				
			pH inicial	Lechada de Cal			pH llegado
				Conc. %	Adición ml	Dosif. g /m ³	
HLC-T31	5,0	3	9,25	10	10,2	165,2	11,56
R-HLC-T31	5,0	3	9,32	10	10,2	165,2	11,58
HLC-T32	5,0	3	10,56	10	7,0	113,4	11,65
R-HLC-T32	5,0	3	10,58	10	7,0	113,4	11,59

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 81% de cal útil (según hojas MSDS–MOLICAL S.A.C.) es 0,165 Kg/m³ y 0,114 Kg/m³ respectivamente.

d) Etapa de Precipitación

Una vez realizada la neutralización del pH se realizó la prueba de precipitación de mercurio mediante la adición de NaSH al 10%. Los parámetros de trabajo se detallan a continuación:

Tabla N° 3.69: Etapa de precipitación de mercurio con NaSH – Continuo N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Resid. (min)	ETAPA DE PRECIPITACIÓN				
			Conc. %	Adición ml	Dosif. ppm	pH Tratado	RPM
			HLC-T31	5,0	15		
R-HLC-T31	5,0	15	10	2,50	50	11,46	150
HLC-T32	5,0	15	10	2,50	50	11,53	150
R-HLC-T32	5,0	15	10	2,50	50	11,52	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

e) Etapa de Coagulación

Una vez culminada la etapa de precipitación se procedió a dosificar cloruro férrico (FeCl_3) en razón de 72 mg/L acondicionadas durante 35 minutos. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.70: Etapa de coagulación – Continuo N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Coag. (min)	ETAPA DE COAGULACIÓN				
			Densidad	Adición	Dosif.	pH Tratado	RPM
			g/cm ³	ml	mg /L		
HLC-T31	5,0	35	1,43	0.25	71,5	11,45	150
R-HLC-T31	5,0	35	1,43	0.25	71,5	11,43	150
HLC-T32	5,0	35	1,43	0.25	71,5	11,50	150
R-HLC-T32	5,0	35	1,43	0.25	71,5	11,51	150

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

f) Etapa de Clarificación

Después de concluido la etapa de precipitación / coagulación, se dosificó el floculante MT 42-85, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta a 50 RPM. Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.71: Etapa de clarificación – Continuo N°03.

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Agit. (min)	Floculante	ETAPA DE CLARIFICACIÓN			
				Conc.	Adición	Dosif.	RPM
				%	ml	mg /L	
HLC-T31	5,0	5	MT 42-85	0,1	5,00	1,00	50
R-HLC-T31	5,0	5	MT 42-85	0,1	5,00	1,00	50
HLC-T32	5,0	5	MT 42-85	0,1	5,00	1,00	50
R-HLC-T32	5,0	5	MT 42-85	0,1	5,00	1,00	50

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se logró un ratio de consumo de 1 g/m³ de floculante MT42-85.

Una vez transcurrido el tiempo de residencia de clarificación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por pH, CN Total y metales totales (ICP).

Tabla N° 3.72: Análisis químico de productos – Continuo N°03.

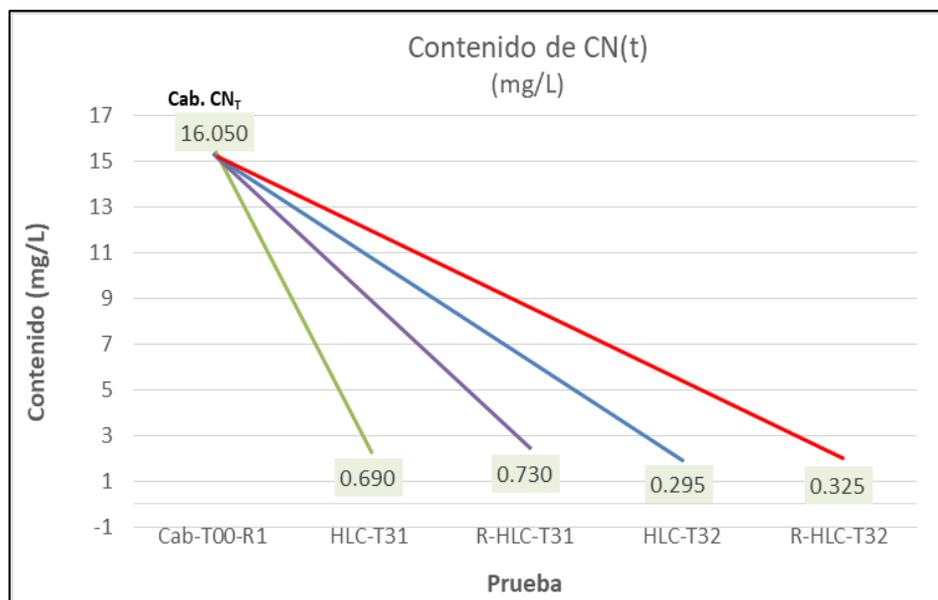
Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
Cab-T00-R1	-	16,050	4,638	9,447	1,1819				
HLC-T31	10,92	0,690	0,5978	0,9717	0,0159	95,70	87,11	89,71	98,65
R-HLC-T31	10,90	0,730	0,5999	1,0027	0,0189	95,45	87,07	89,39	98,40
HLC-T32	10,78	0,295	0,1031	0,0844	0,0008	98,16	97,78	99,11	99,93
R-HLC-T32	10,90	0,325	0,1842	0,1070	0,0022	97,98	96,03	98,87	99,82

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Discusión: Según los resultados obtenidos se logra una eficiente de remoción los cuales llegaron a un 98,16% de CN total, 97,78% de As, 99,11% de Cu y 99,93% de Hg total, estando el contenido de estos metales por DEBAJO de los LMP, lo que queda establecido este proceso.

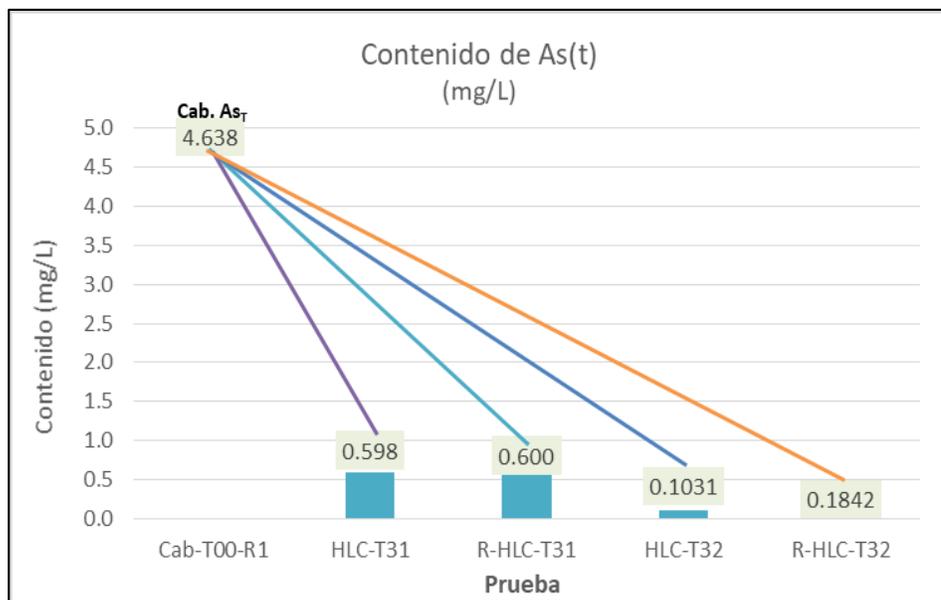
A continuación, se presenta el comportamiento de cada uno de los metales en función de la cabeza (Solución Barren N°03):

Gráfica N° 3.23: Comportamiento del CN (total) – Continuo N°03.



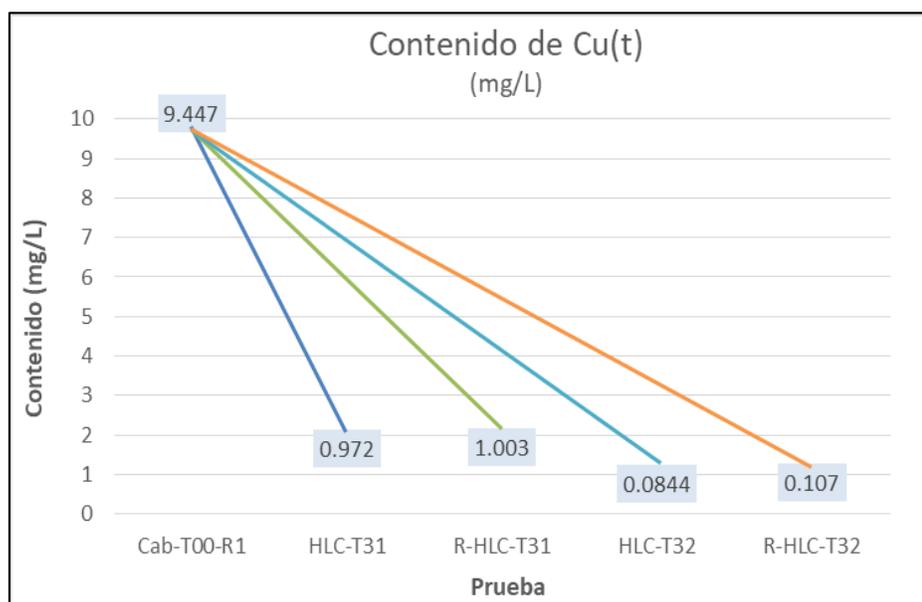
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.24: Comportamiento del arsénico – Continuo N°03.



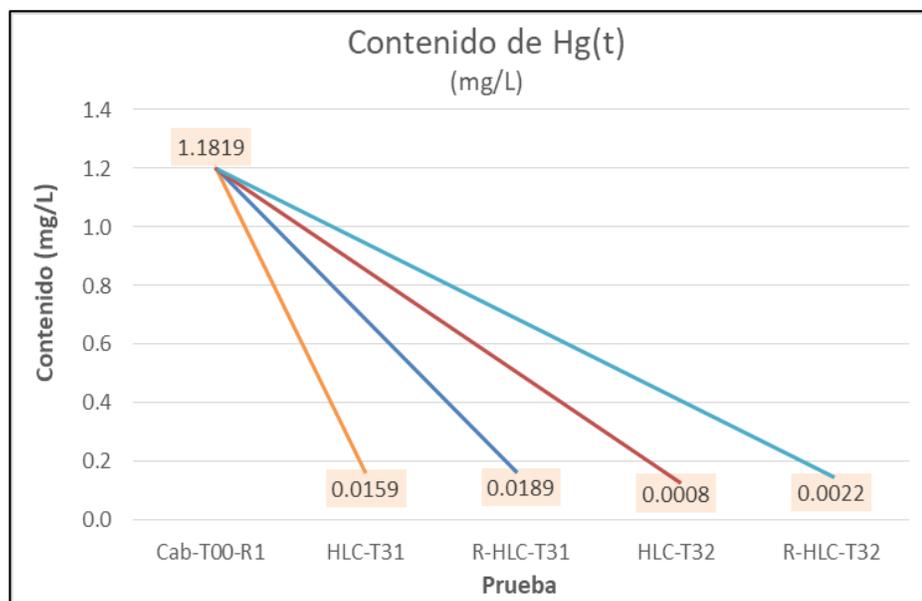
Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.25: Comportamiento del cobre – Continuo N°03.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Gráfica N° 3.26: Comportamiento del mercurio – Continuo N°03.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.7.6. Porcentaje de Sólidos – Continuo N°03.

Después de encontrar el ratio de consumo en la ejecución de las pruebas en Continuo N°03 se procedió a hallar el porcentaje de sólidos, las partículas precipitadas se procedió a secar a Temperatura de 25 °C (ambiente) para luego pesarlos y sacar el % de sólidos en función del volumen. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N° 3.73: % de sólidos - Continuo N°03.

Código de Muestra	RESULTADOS			
	Volumen	Peso	Ratio	Sólidos
	L	g	g / L	%
HLC-T31	5,0	3,305	0,661	0,066
R-HLC-T31	5,0	3,296	0,659	0,066
HLC-T32	5,0	3,426	0,685	0,069
R-HLC-T32	5,0	3,413	0,683	0,068

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

3.7.7. Velocidad de Sedimentación – Continuo N°03.

Se realizó la prueba de sedimentación libre, teniendo en cuenta las variables y condiciones de la prueba de código HLC-T032 de acuerdo al procedimiento estándar en probetas de 1 litro. Esta prueba se realizó para encontrar la velocidad de sedimentación lo cual se detalla a continuación:

Tabla N° 3.74: Velocidad de sedimentación – Continuo N°03.

Muestra	Floculante MT 42-85		Velocidad de Sedimentación
	(%)	g/m ³	m/h
Solución Barren	0,1	1,0	1,145

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Los resultados de tratamiento de la muestra representativa de solución barren La Arena S.A. logran una buena precipitación y remoción de metales cuyos valores obtenidos son eficientes. El consumo de dichos reactivos estuvo en el siguiente orden:

Tabla N° 3.75: Consumo de reactivos de la mejor prueba HLC-T032.

Código de Muestra	ETAPAS				
	ACONDICIONAMIENTO		OXIDACIÓN		
	CuSO ₄ .5H ₂ O	Cu	H ₂ O ₂	Cal	Aire
HLC-TF	200 ppm	60 ppm	400 ppm	49 g/m ³	8,5 ppm
	NEUTRALIZ.	PRECIP.	COAG.	CLARIF.	ACID.
	Cal	NaSH	FeCl ₃	Floculante MT 42-85	H ₂ SO ₄
	132 g/m ³	50 ppm	72 ppm	1 gr/m ³	80 gr/m ³

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

De las gráficas se puede concluir que la prueba que mejor resultado arrojó fue la HLC-T32, la misma que sirvió para el arranque de la Planta de Tratamiento de Efluentes.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÒN

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO – NIVEL INDUSTRIAL

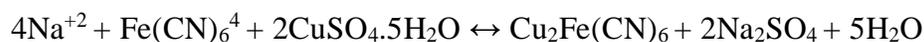
Etapa 1: Oxidación.

Corresponde a la destrucción de cianuros libres y dissociables en ácido débil por acción oxidante del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) utilizando como catalizador $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. La adición del H_2O_2 al 50% está en una relación según pruebas a nivel laboratorio a un pH de 10.5-11.0; Si no se está en ese rango de pH se debe adicionar hidróxido de sodio.



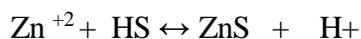
Etapa 2: Precipitación del Hierro (Fe).

La precipitación del hierro (Fe) como ferrocianuros de cobre se realiza dosificando sulfato de cobre pentahidratado – $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. La precipitación de los ferrocianuros se efectúa mediante las reacciones.



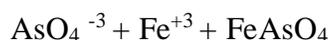
Etapa 3: Precipitación de Mercurio (Hg).

Para la precipitación del mercurio (Hg) se ha considerado conveniente el uso del sulfhidrato de sodio (NaSH), que se alimentará con una bomba dosificadora al ingreso del quinto tanque, de esta manera se podrá reducir los niveles de contaminación a valores por debajo de los límites permisibles. Este compuesto no sólo reacciona con el mercurio, sino que también con iones de Cu, Fe, Zn, para formar sulfuros de metal insolubles, las cantidades de cada elemento se obtienen del análisis de las soluciones pregnant y barren por ICP (elementos) realizado por laboratorio CERTIMIN S.A. y del balance de determinación de producción de precipitados.



Etapa 4: Precipitación del Arsénico (As).

La precipitación de compuestos de arsénico (As) se realizará con ayuda de una solución de cloruro férrico (FeCl_3) de una concentración de 42% que actuará como coagulante. El compuesto de As reacciona con el cloruro férrico para dar un precipitado estable, de acuerdo a la siguiente reacción:



Etapa 5: Clarificación.

Adicionalmente en el rebose del quinto tanque reactor se dosificará floculante preparado al 0.1% para clarificar y aglomerar las partículas sólidas en la poza de sedimentación con un tiempo de residencia de 12 horas, tiempo en el que se sedimentarán los lodos y el agua clarificada será enviada a columnas con carbón activado.

Procedimiento de Operación del Circuito de la PTE:

- Se coordina con el personal encargado de mantenimiento eléctrico para arrancar la Planta de Tratamiento de Efluentes (energizado de equipos y panel de control).
- Una vez coordinado se enciende por medio de los paneles de control los agitadores tanto de los tanques de preparación de reactivos y de los tanques de degradación.
- Se coordina con el operador de Planta ADR para que apertura la válvula de alimentación de solución cianurada a tratar y asimismo abrir poco a poco la válvula de ingreso a la Planta de Tratamiento de Efluentes para evitar el golpe de la solución.
- Se toma la muestra de solución a tratar y se gradúa a un flujo determinado para la dosificación de los reactivos según los resultados de las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio.
- Dependiendo de la solución barren a tratar y aun flujo establecido, se procede a calcular la dosificación de los reactivos según la siguiente fórmula:

$$B_{\text{REACTIVO}} = \text{Ratio} \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times \text{Flujo} \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = X \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

- Ya sea para reactivos como: peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), sulfhidrato sódico ($NaSH$), cloruro férrico ($FeCl_3$) y floculante, los cuales se dosifican mediante el uso de bombas peristálticas.
- Cabe resaltar que el ratio de reactivos en cuanto el flujo de las bombas dosificadoras para el contraste es medido con una probeta (ml/min).

Procedimiento de Parada de Planta de Efluentes:

- Una vez tratado el efluente y llegando a la capacidad máxima de la poza clarificadora 10000 m^3 se para la Planta de Tratamiento de Efluentes.
- Se coordina con el operador de Planta ADR para que cierre la válvula de alimentación de solución cianurada a tratar y asimismo cerrar poco a poco la válvula de ingreso a la Planta de Tratamiento de Efluentes.
- Una vez coordinado se apaga por medio de los paneles de control los agitadores tanto de los tanques de preparación de reactivos y de los tanques de degradación, asimismo también las bombas dosificadoras de reactivos
- Se coordina con el personal encargado de mantenimiento eléctrico parar la Planta de Tratamiento de Efluentes (desenergizado de equipos y panel de control).
- Una vez tratada la solución se deja sedimentar los metales disueltos como partículas en suspensión por un espacio de 2 a 3 días debido a la capacidad de la poza clarificadora.

4.1.1. Pilotaje a Nivel Industrial.

Con los ratios obtenidos en las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio (prueba HLC-T32) se procede a arrancar la Planta de Tratamiento de Efluentes teniendo consideración los procedimientos de arranque y parada de planta.

El día **21 de agosto del 2018** se reapertura el arranque de la Planta de Tratamiento de Efluentes con un caudal de 120 m³/hr, solo un circuito. El flujo total tratado fue de 27053 m³ trabajándose por un lapso de 10 días, cabe resaltar que en ese periodo el contenido de cianuro total a tratar estuvo en 19,496 ppm.

Tabla N° 4.1: Resumen del consumo de reactivos – Pilotaje a nivel industrial.

FECHA	SOL. TRAT (m ³)	CONSUMO DE REACTIVOS (Kg)						
		H ₂ O ₂	CuSO ₄	Cal	NaSH	FeCl ₃	Floc.	H ₂ SO ₄
21/08/18	2.410	964	482	318	121	174	2,40	192
22/08/18	2.811	1.125	563	371	141	203	2,81	224
23/08/18	2.654	1.062	531	350	133	191	2,65	212
24/08/18	2.745	1.098	549	362	138	198	2,74	219
25/08/18	2.880	1.152	576	380	144	208	2,88	230
26/08/18	2.784	1.114	557	367	140	201	2,78	223
27/08/18	2.880	1.152	576	380	144	208	2,88	230
28/08/18	2.787	1.115	558	368	140	201	2,78	223
29/08/18	2.596	1.039	520	342	130	187	2,59	207
30/08/18	2.506	1.003	502	331	126	181	2,50	200
TOTAL	27.053	10.824	5.414	3.569	1.357	1.952	27,01	2.160

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

El ratio de consumo de reactivos a nivel industrial se presenta a continuación:

Tabla N° 4.2: Ratios de consumo de reactivos – Pilotaje a nivel industrial.

Ratios de consumo de reactivos (gr/m ³)						
H ₂ O ₂	CuSO ₄ .5H ₂ O	Cal	NaSH	FeCl ₃	Floc.	H ₂ SO ₄
400,10	200,13	131,93	50,16	72,15	1,00	79,84

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

- Dosificación calculada para el tratamiento de efluentes:

$$B \text{ H}_2\text{O}_2 = 400,10 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 800,20 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$B \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 200,13 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 400,26 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$B \text{ Cal} = 131,93 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 263,86 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$B \text{ NaSH} = 50,16 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 100,32 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$B \text{ FeCl}_3 = 72,15 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 144,30 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$B \text{ Floc.} = 1,00 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 2,00 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

$$B \text{ H}_2\text{SO}_4 = 79,84 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3} \times 120 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 159,68 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

De los resultados obtenidos se puede concluir que las variables concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), concentración de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), concentración de sulfhidrato de sodio (NaSH), cloruro férrico (FeCl_3) y tiempo de residencia (minutos) por cada etapa influyen significativamente en la remoción de concentración de cianuro total (ppm) y la precipitación de los metales, respectivamente; hay que aclarar que la cal solo se usó para el acondicionamiento de pH.

Se demostró que optimizando la concentración de dichos reactivos y dándole más tiempo de residencia, conllevan a una disminución en la concentración de cianuro

total en la solución como % de remoción en la etapa de oxidación, esto se confirma y se comprueba con el fundamento teórico de detoxificación de cianuro utilizando peróxido de hidrógeno más sulfato de cobre pentahidratado como catalizador y la precipitación de los metales con sulfhidrato sódico, con coagulante cloruro férrico y floculante MT 42-85.

Para determinar los **valores óptimos de dosificación** se procede a realizar un ejemplo de cálculo a través de datos y valores reales que se maneja en la Planta de Tratamiento de Efluentes.

Tabla N°4.3: Condiciones y especificaciones de los reactivos utilizados a nivel industrial.

Condiciones	Und.	Reactivos						
		[H ₂ O ₂]	[CuSO ₄ .5H ₂ O]	[lechada de cal]	[NaSH]	[FeCl ₃]	[Floc.]	[H ₂ SO ₄]
Grado de Conc.	%	50	10	10	10	42	0,1	98
Dosificación	ml/L	0,80	2,00	2,04	0,5	0,05	1,00	0,72
Conc. Dosis	gr/m ³	400	200	132	50	71,5	1	80
Densidad	gr/ml	1,20	1,00	-	1,00	1,43	-	1,84

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Tabla N° 4.4: Condiciones operativas de PTE – Pilotaje a nivel industrial.

Flujo Planta (m ³ /hr)	Valores promedio leídos (ppm)						
	Ingreso	Poza Clarificadora (Salida)					
	[CN ⁻ Total]	[CN ⁻ Total]	[CN ⁻ wad]	[Hg]	[Cu]	[As]	pH
120	19,59	0,30	0,004	0,0008	0,085	0,103	7,9

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Tabla N° 4.5: Tiempo de residencia según PTE a un flujo 120 m³/hr.

Capacidad de la PTE	Volumen de Tk (m ³)	Tiempo de Retención por Tanque (min.)
TK N° 01	8,20	4,10
TK N° 02	67,9	33,95
TK N° 03	67,9	33,95
TK N° 04	67,9	33,95
TK N° 05	67,9	33,95
	Tiempo Res. Total (min)	139,90
	Flujo de Planta (m³/hr)	120,00

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Como se observa a un flujo de planta de 120 m³/hr (01 circuito de la PTE), a una concentración de dosificación de 0,8 ml/L de peróxido de hidrógeno (H₂O₂ al 50%) equivalente a 400 ppm y 2,00 ml/L de sulfato de cobre pentahidratado (CuSO₄.5H₂O preparado al 10%) equivalente a 200 ppm, se obtuvo una concentración de cianuro total en la salida del Tk N°05 menor de 0,30 ppm.

Asimismo en cuanto a la precipitación de los metales, a una concentración de dosificación de 0,50 ml/L de sulfhidrato de Sodio (NaSH preparado al 10%) equivalente a 50 ppm; asimismo a una concentración de dosificación de 0,05 ml/L de cloruro férrico (FeCl₃ al 42%) equivalente a 71,5 ppm y a un ratio de 1 ppm floculante aniónico se bajó los contenidos a 0,0008 ppm de Hg, 0,085 ppm de Cu y 0,103 ppm de As, respectivamente.

Figura N° 4.1: Solución tratada – Poza Clarificadora de capacidad 10000 m³.



Fuente: Imagen, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Figura N° 4.2: Solución clarificada – Poza Clarificadora de capacidad 10000 m³.



Fuente: Imagen, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

4.1.2. Caracterización de Solución Tratada – Nivel Industrial.

Corresponde al análisis químico de agua de proceso correspondiente a ICP 32 elementos (Metales Totales y Disueltos), CN total, CN wad, CN Libre, Hg y pH, así como Nitrógeno Amoniacal, Amoniac, Fluoruros, Cloruros, Dureza total, Nitratos, Nitritos y Sulfatos, para poder determinar la toxicidad de la solución tratada, el resultado de los ensayos mencionados se detalla a continuación:

Tabla N° 4.6: Análisis químico de solución tratada a nivel industrial.

Código de Muestra	pH	CN _T	CN _w	CN _L	As	Hg
		mg /L	mg /L	mg /L	mg /L	mg /L
HLC-TF	7,20	0,360	0,063	<0,005	0,0968	0,0012

Fuente: Informe de Ensayo N°ABR1115.R18

Tabla N° 4.7: Análisis químico ICP metales totales de solución tratada.

Ag(t)	Al(t)	As(t)	B(t)	Ba(t)	Be(t)	Bi(t)	Ca(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,001	0,831	0,0968	0,033	0,00512	<0,0003	<0,02	121,99
Cd(t)	Ce(t)	Co(t)	Cr(t)	Cu(t)	Fe(t)	K(t)	Li(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,00015	<0,02	0,14829	0,0023	0,0811	0,22	5,07	<0,004
Mg(t)	Mn(t)	Mo(t)	Na(t)	Ni(t)	P(t)	Pb(t)	Sb(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,30	0,00352	0,03348	651,32	0,0011	0,2	0,00179	0,0567
Se(t)	SiO ₂ (t)	Sn(t)	Sr(t)	Ti(t)	Tl(t)	V(t)	Zn(t)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,052	10,80	0,003	0,4515	<0,01	<0,01	0,004	0,021

Fuente: Informe de Ensayo N°ABR1115.R18

Tabla N° 4.8: Análisis químico ICP metales disueltos – solución tratada.

Ag(d)	Al(d)	As(d)	B(d)	Ba(d)	Be(d)	Bi(d)	Ca(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,00128	0,110	0,0596	0,030	0,00487	<0,0003	<0,02	120,29
Cd(d)	Ce(d)	Co(d)	Cr(d)	Cu(d)	Fe(d)	K(d)	Li(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,00014	<0,02	0,13398	0,0020	0,0522	0,04	4,97	<0,004
Mg(d)	Mn(d)	Mo(d)	Na(d)	Ni(d)	P(d)	Pb(d)	Sb(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,30	0,00218	0,03080	650,74	0,001	0,18	0,00159	0,0553
Se(d)	SiO ₂ (d)	Sn(d)	Sr(d)	Ti(d)	Tl(d)	V(d)	Zn(d)
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0,045	10,60	0,0025	0,4433	<0,01	0,0002	0,003	0,019

Fuente: Informe de Ensayo N°ABR1115.R18

Tabla N° 4.9: Análisis de toxicidad de solución tratada – La Arena S.A.

Código de Muestra	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	NO ₃ :N	NO ₂ :N	ORP
	mg/L	mg/L	mg /L	mg /L	-mV
Parámetro ECA-3	500,00	1000,00	90,00	10,00	-
HLC-TF	183,50	205,00	360,00	60,00	-266,1
Código de Muestra	N-NH ₃	NH ₃	Fluoruros	Dureza (t)	Turbidez
	mg /L	mg /L	mg/L	mg CaCO ₃ /L	NTU's
Parámetro ECA-3	-	0,125	1,00	-	-
HLC-TF	22,00	26,75	0,83	304,00	3,0

Fuente: Informe de Ensayo N°ABR1115.R18

Nota: Cabe resaltar que el análisis de toxicidad fue comparado con parte de los parámetros ECA-3, concluyéndose que los nitritos, nitratos y amoníaco se encuentran por encima de dichos parámetros siendo este efluente tóxico.

También cabe resaltar que, respecto al parámetro amoníaco se observa una remoción de 34,72% comparado a la cabeza descartando la posibilidad de influencia del exceso de peróxido de hidrógeno en la Etapa de Oxidación, en cuanto al parámetro sulfato se observa una remoción de 66,72% posibilitando la dosificación de ácido sulfúrico en la Etapa de Acidificación.

Tabla N° 4.10: % de remoción del amoníaco y sulfatos.

Código de Muestra	pH	NH ₃	SO ₄ ⁼	% de Remoción	
		mg /L	mg /L	NH ₃	SO ₄ ⁼
Eca-3	6,5-8,5	0,125	1.000,00		
Cabeza-T00-R1	10,15	42,95	616,00		
HLC-TF	7,20	26,75	205,00	34,72	66,72

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Así mismo respecto a la evaluación según parte del objetivo propuesto, los resultados de remoción están por debajo de los LMP según D.S. N°010-2010 MINAM.

Tabla N° 4.11: % de Remoción de los principales metales de alto contenido en ppm.

Código de Muestra	pH	CN _T	As	Cu	Hg	% de Remoción			
			mg /L	mg /L	mg /L	CN _T	As	Cu	Hg
LMP	6-9	1,00	0,100	0,500	0,0020				
Cabeza-T00-R1	10,15	16,050	4,638	9,447	1,1819				
HLC-TF	7,20	0,360	0,097	0,081	0,0012	97,76	97,91	99,14	99,90

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Comentarios: Según los resultados obtenidos se logra una eficiente remoción los cuales llegaron a un 97,76% de CN total, 97,91% de As, 99,14% de Cu y 99,90% de Hg total, estando el contenido de estos metales y pH, por debajo de los LMP según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM.

4.1.3. Presentación de Resultados a Nivel Industrial

Resultados de Tratamiento de Efluentes:

- Se trató un total de 27.053 m³ de solución barren conteniendo 20 ppm CN total. Se llegó un porcentaje de remoción de 98,50% y se logró un contenido de cianuro total igual a 0,30 ppm.
- El cianuro Wad medido fue de 0,004 ppm.
- La solución barren a tratar contenía 1,304 ppm de Hg, lográndose un % de remoción de 99,94% lo cual se precipitó a 0,0008 ppm de Hg; 7,395 ppm de Cu, lográndose un % de remoción de 98,85% lo cual se precipitó

a 0,085 ppm de Cu; 3,951 ppm de As, lográndose un % de remoción de 97,39% lo cual se precipitó a 0,103 ppm de As.

- Los ratios de consumo de reactivos fueron: $\text{H}_2\text{O}_2 = 400$ ppm; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 200$ gr/m³; Cal = 132 gr/m³; NaSH = 50 ppm, $\text{FeCl}_3 = 71,5$ ppm; Floculante = 1 gr/m³.
- El consumo de energía fue de 3625,13 Kw – hr.

Consumo de reactivos:

- El consumo total de H_2O_2 fue de 10.824 kg.
- El consumo total de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ fue de 5.414 kg.
- El consumo total de Cal fue de 3.569 kg.
- El consumo total de NaSH fue de 1.357 kg.
- El consumo total de FeCl_3 fue de 1.952 kg.
- El consumo total de floculante MT 42-85 fue de 27,01 kg.
- El consumo total de ácido sulfúrico fue de 2.160 kg.

Costo de Tratamiento a Nivel Industrial:

Durante los 10 días de agosto del 2018 se trató en total 2.7053 m³ de solución barren, se gastó \$29.139,51 en reactivos y energía. Considerando sólo los costos de reactivos, se tiene un costo de \$0,96/m³ de solución tratada. El costo de energía en total fue de \$3161,28 / Kw – hr.

Tabla N° 4.12: Costos de reactivos y energía eléctrica en la PTE.

CAMPAÑA	m ³	\$ REACTIVOS	\$ ENERGÍA	\$/m ³
3ra	27.053	26.544,31	3.625,13	1,08

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETRACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se detalla los costos de los reactivos a nivel industrial que son los más influyentes, tanto según criterio de diseño (determinación del problema), según problema no optimizado e investigación aplicada:

Tabla N° 4.13: Costos de reactivos según criterio de diseño.

Reactivo	Consumo	Precio	Costo
	gr/m ³	\$/kg	\$/m ³
[H ₂ O ₂]	2.000,00	0,72	1,440
[CuSO ₄ .5H ₂ O]	0,00	2,69	0,000
[NaSH]	100,00	1,15	0,115
[FeCl ₃]	80,00	2,54	0,203
[Floculante]	2,00	4,50	0,009
		TOTAL	1,767

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Tabla N° 4.14: Costos de reactivos según problema no optimizado.

Reactivo	Consumo	Precio	Costo
	gr/m ³	\$/kg	\$/m ³
[H ₂ O ₂]	788,97	0,72	0,568
[CuSO ₄ .5H ₂ O]	12,75	2,69	0,034
[NaSH]	50,00	1,15	0,058
[FeCl ₃]	93,00	2,54	0,236
[Floculante]	0,132	4,50	0,001
[NaCN]	50,00	3,189	0,159
		TOTAL	1,056

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Tabla N° 4.15: Costos de reactivos según investigación aplicada.

Reactivo	Consumo	Precio	Costo
	gr/m ³	\$/kg	\$/m ³
[H ₂ O ₂]	400,00	0,72	0,288
[CuSO ₄ .5H ₂ O]	200,00	2,20	0,440
[Cal]	132,00	0,05	0,007
[NaSH]	50,00	1,15	0,058
[FeCl ₃]	71,50	2,25	0,161
[Floculante]	1,00	4,50	0,005
[H ₂ SO ₄]	80,00	0,01	0,001
		TOTAL	0,958

Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Se procede a comparar los costos siendo estos resultados:

- ✓ Determinación del problema Vs Investigación aplicada se logró un ahorro de 0,809 \$/m³ en cuanto a reactivos.
- ✓ El problema no optimizado Vs Investigación aplicada se logró un ahorro de 0,098 \$/m³ en cuanto a reactivos.

4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

En la Planta de Tratamiento de Efluentes de La Arena S.A. se trata un promedio de 47.273 m³ con un costo de 1,220 \$/m³, siendo el costo X=\$57.673 según determinación del problema. Según investigación aplicada se llega a un costo de 0,958 \$/m³ siendo el promedio X=\$45.288, con una desviación estándar de s=6.192,5. Aun alfa del 5%. Se concluye que:

1) Planteamiento de hipótesis

$$H_0: \mu=57.673$$

$$H_a: \mu \neq 57.673$$

2) Determinar estadístico de la prueba t

$$t_c = 47.273 - 57.673 / (6.192,5 / \sqrt{10}) = -10.400 / 1.958,24 = -5,311$$

3) Determinar el valor de t en tablas de acuerdo al valor de alfa y los grados de libertad

$$gl = n-1 = 10-1 = 9 \text{ para un alfa} / 2 \text{ de } 0.05/2 = 0.025$$

$$t_t \text{ de tablas para } 0.025 \text{ con } 9 \text{ gl} = 2.262 \quad \text{con } = \text{distr.t.inv}(0.05,9) = 2.262$$

4) Interpretación y conclusiones

Dado que $t_c = -5,311$ es menor que $t_t = -2.262$ la H_0 se rechaza a un nivel alfa del 5%.

El costo de reactivos es de \$45.288

5) Intervalo de confianza

$$IC = \text{Media} \pm T_{\alpha/2} * S / \text{raiz}(n)$$

$$IC = 47.273 \pm 2,262 * 6.192,5 / \text{raiz}(10) = (42.843,46., 51.702,54)$$

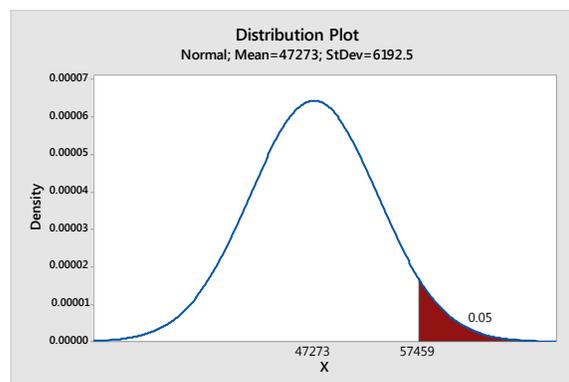
La media de la hipótesis se encuentra en el intervalo de confianza, SI se rechaza H_0 .

6) Valor P del estadístico de prueba

$$P = \text{distr.t}(T_c, gl, colas) = \text{distr.t}(5.311, 9, 2) = 0,995$$

Como el valor P es menor r a $\alpha/2$ entonces SI se rechaza H_0 , El costo de reactivos es de \$45.288

Figura N° 4.3: Distribución Probabilística.



Fuente: Minitab, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO

Según la revisión bibliográfica y operativa de Plantas de Tratamiento de Efluentes en otras unidades mineras se planea realizar modificaciones en el orden de dosificación de reactivos, así mismo debido a que el sulfato de cobre es uno de los reactivos de mayor costo, se pretende prescindir de la dosificación de este reactivo y aprovechar el cobre disuelto en la solución barren a tratar, sin embargo por tema de precaución se tendría en stock para su uso si la concentración de cobre disuelto disminuye.

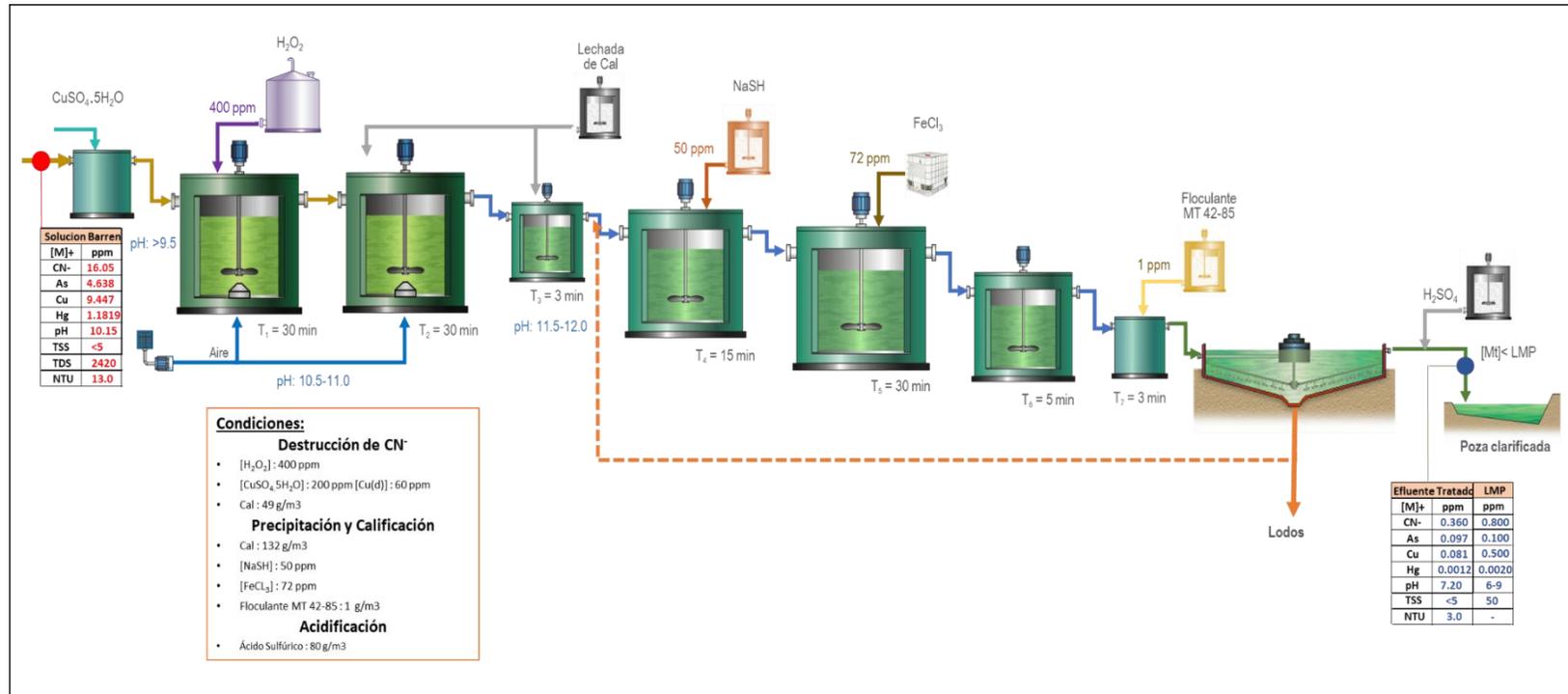
La aplicación de sulfato de cobre pentahidratado en el proceso de detoxificación de cianuro y precipitación de metales; aumenta considerablemente el consumo de peróxido, debido que el peróxido tiene que competir con el cobre en la cinética de reacción, esto debido a que el cobre se encuentra como complejo cianurado. El cobre reacciona con el cianuro, formando complejos débiles de cianuro wad. El peróxido tendría que oxidar el cobre remanente, y también detoxificar el cianuro remanente formado por los complejos débiles.

La aplicación de cloruro férrico, en el diseño original de la planta, es para precipitar metales pesados, pero los hace como coadyudante a la coagulación y formación de complejos de base ferrosa. Es por ello que se recomienda cuando los metales se encuentren oxidados o reducidos.

Por teoría el peróxido también estaría reaccionando con los metales pesados, y son estos son los que consumen más oxidante. Esto confirma que el peróxido está oxidando los metales como por ejemplo el arsénico, llevándolo de arsenito a

arsenato, para su precipitación. De igual manera con el cobre, hierro y mercurio. Las variaciones cuantitativas de estos elementos en la solución barren van a definir el consumo próximo de la base química del tratamiento.

Figura N° 4.4: Alternativa de dosificación óptima aplicada.



Fuente: Elaboración propia, 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

CONCLUSIONES

1. Se concluye que trabajando con la investigación aplicada nos representa un ahorro de costos de 1,08 \$ / m³ solución tratada.

- Costo de reactivo según determinación del problema:

Según criterio de diseño = 1,77 \$ / m³ solución tratada.

Según problema no optimizado = 1,22 \$ / m³ solución tratada.

- Diferencia de costos de reactivos considerando criterio de diseño:

$$1,77 - 1,08 = 0,69 \text{ \$ / m}^3 \text{ solución tratada.}$$

- Diferencia de costos de reactivos considerando problema no optimizado:

$$1,22 - 1,08 = 0,14 \text{ \$ / m}^3 \text{ solución tratada.}$$

Es decir si se trata por campaña 100.000,00 m³ de solución se obtiene un ahorro de \$14.000,00; y \$69.000,00 considerando un ahorro respecto al criterio de diseño.

2. El costo de tratamiento es mucho mejor y relevante debido a la disminución del consumo de reactivos en el proceso, logrando así determinar la dosificación óptima (adecuada) en la planta de tratamiento de fluentes de la Unida Minera La Arena y sobre todo estar por debajo de los Límites Máximos Permisibles según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM.

RECOMENDACIONES

1. No se puede realizar labores específicas si no se tiene previamente una capacitación.
2. Usar equipos de protección personal (respiradores, guantes, lentes, protectores de oídos, etc.), como barrera de protección ante cualquier accidente.
3. Tener cuidado a la hora de manipular los reactivos, ya que algunos pueden ser nocivos (verificar hojas MSDS).
4. Realizar pruebas de detoxificación validando las mejores pruebas planteadas partiendo de una nueva solución barren a tratar.
5. Realizar pruebas de estabilidad de lodos a partir de la prueba óptima.
6. Realizar la gravedad específica del lodo precipitado.
7. Realizar pruebas a mayor escala (prueba en campo), simulando el flujo y condiciones críticas.

BILIOGRAFÍA

Reyes López, Iván (1998), *Metalurgia del Oro y medio ambiente*. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo.

GARCIA, VICTOR; 2004. “Para despejar dudas Uso de cianuro en la minería del oro”, Diario El Zonda, victorgarcia@diarioelzonda.com.ar

GONZÁLEZ, SILVIA.; 2004. “El Cianuro es Tóxico y Letal”. Por La Séptima Digital Tuesday July 27, 2004 at 01:09 AM. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

<http://argentina.indymedia.org/news/2004/07/212476.php>

HRUSCHKA, F.; 1998. “Manejo Ambiental en la Pequeña Minería”. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, Bolivia.

BACHILLER BLANCO D.; RENDUELES DE LA VEGA M., 2001. Reducción del impacto ambiental en el desarrollo de nuevos proyectos de minería de oro. Áreas Técnicas.

<http://www.unizar.es/aeipro/finder/MEDIO%20AMBIENTE>

LOGSDON M. J; HAGELSTEIN K.; y MUDDER T. I.; 2004. El manejo del Cianuro en la Extracción de Oro. Traducido de la publicación en inglés titulada *The Management of Cyanide in Gold Extraction*. CONSEJO INTERNACIONAL DE METALES Y MEDIO AMBIENTE – ICME

GOLD INSTITUTE, 1996. “Cyanide” [Cianuro]. En *Gold Issues Briefing Book* [Libro informativo sobre temas relacionados con el oro], Capítulo 4, pp. 1–12.

HABASHI, F., 1987. "One Hundred Years of Cyanidation" [Cien años de cianuración]. C.I.M. Bulletin, 80: 108–114.

SCOTT, J. S. Y J. INGLES, 1991. "Remoción del cianuro de los efluentes de molinos de oro". Canadian Mineral Processors Thirteenth Annual Meeting, Ottawa.

Tecsup. *Hidrometalurgia del oro*. Programa de capacitación continua. Lima.

ANEXOS

(Panel Fotográfico – Observación)

Fotografía N° 1: Recepción de muestras de solución y hojas MSDS.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 2: Homogenización y formación de un compuesto representativo.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 3: Toma de alícuotas para análisis químico.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 4: Análisis de cianuro libre In Situ – Solución Cabeza.



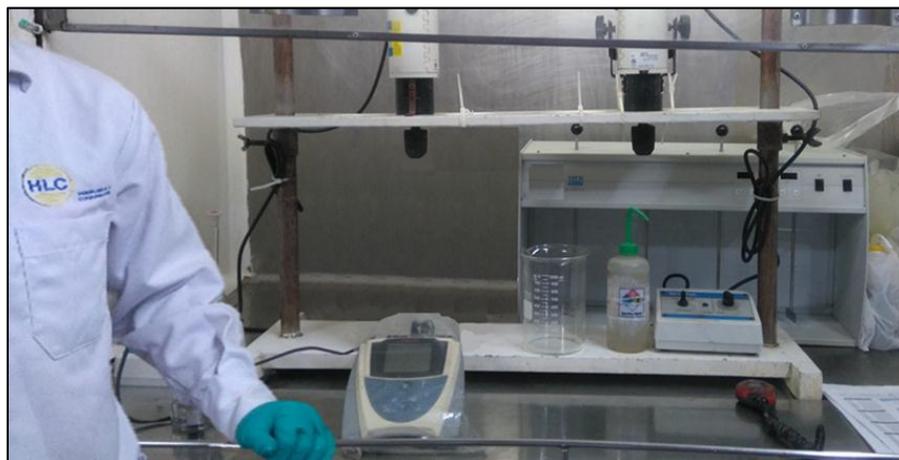
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 5: Medición de pH y turbidez (NTU's).



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 6: Acondicionamiento de equipos y área de trabajo.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 7: Preparación de lechada de cal al 10%.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 8: Preparación de NaOH, NaSH y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al 10 %.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 9: Reactivo ácido sulfúrico diluido al 10% y peróxido de hidrógeno al 50%.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 10: Control de parámetros en destrucción del cianuro.



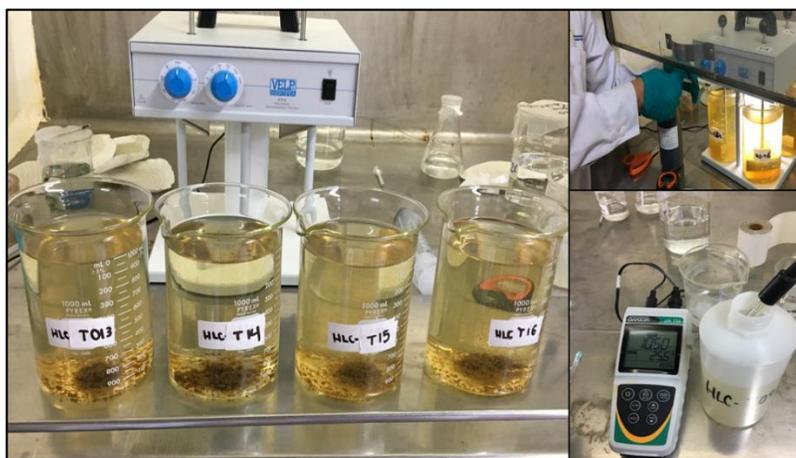
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 11: Control de parámetros en la etapa de precipitación.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 12: Control de parámetros en etapa de coagulación y clarificación.



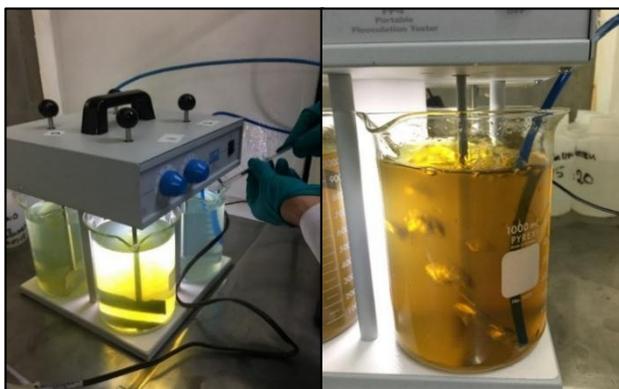
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 13: Medición de cianuro libre por titulación – In Situ.



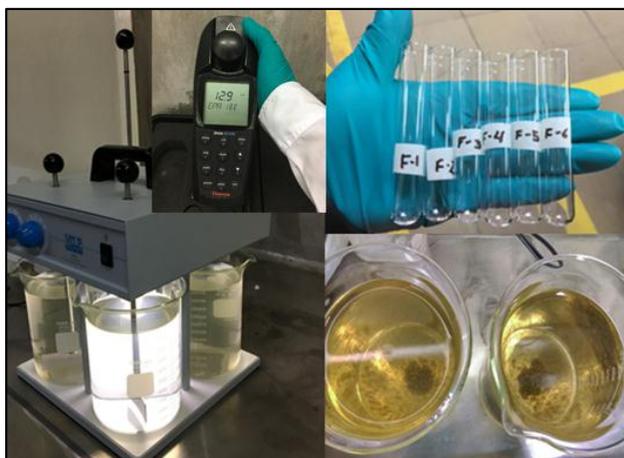
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 14: Dosificación de reactivos e inyección de aire.



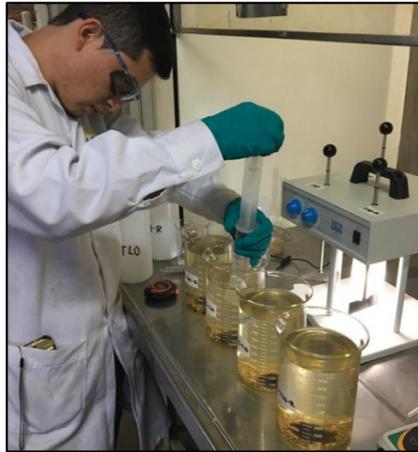
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 15: Evaluación de floculantes y medición de turbidez.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 16: Toma de alícuota clarificada para análisis químico.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 17: Filtración de muestras tratadas.



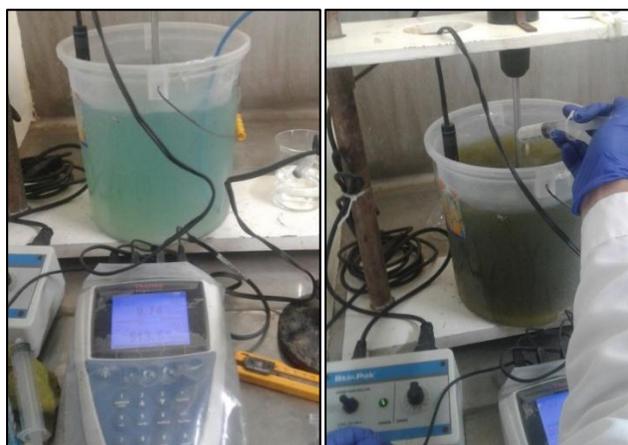
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 18: Preparación de muestras para envío a análisis químico.



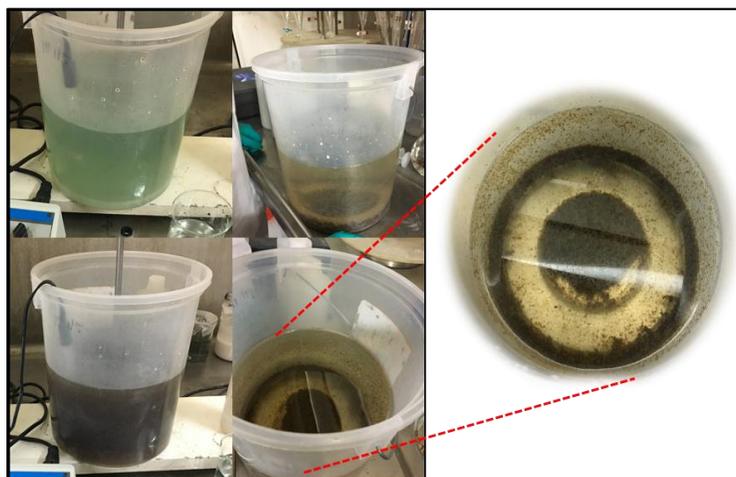
Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 19: Acondicionamiento para las pruebas en continuo.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 20: Desarrollo de las pruebas en continuo y obtención del precipitado final.



Fuente: Laboratorio Metalúrgico 2018, HLC Ingeniería y Construcción S.A.C.

Fotografía N° 21: Carné de Identificación de La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.

Fotografía N° 22: Trabajos en laboratorio metalúrgico.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.

Fotografía N° 23: Pilotaje a Nivel Industrial en la PTE.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.

Fotografía N° 24: Sustentación del Pilotaje a Nivel Industrial en La Arena S.A.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.

Fotografía N° 25: Incentivo parte del Superintendente Ing. R. Velásquez.



Fuente: Planta ADR, 2018, La Arena S.A.