

Universidad Nacional  
“José Faustino Sánchez Carrión”



“Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica”

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**DIAGNÓSTICO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CIANURACIÓN,  
PARA FIJAR LOS PARAMETROS DE CONTROL DE LAS  
OPERACIONES DE LA MINERA VICUS S.A.C.**

“TESIS”

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
METALURGICO**

**Autor:**

CORNELIO LA ROSA, Andres Jhonatan

**Asesor:**

Ing. NATIVIDAD HUASUPOMA, Delicias Eufemia

CIP: 85351 DNU: 300

**Huacho - Perú**

**2017**

## **DEDICATORIA**

Con cariño y aprecio a mis padres y hermanos, que a ellos les debo cuanto soy, por su incondicional y fiel apoyo para lograr nuestro objeto por ello cada una de las letras de este trabajo son por Ustedes.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme vivir día a día y haber hecho realidad mi Vocación Profesional.

Mi Agradecimiento a todos los docentes de la UNJFSC EAP, Ing. Metalúrgica por sus consejos y recomendaciones.

## **PENSAMIENTO**

“El conocimiento se enorgullece de haber aprendido tanto; la sabiduría siente la humildad de no saber más.”

(William Cowper.)

## INDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	2
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	3
<b>PENSAMIENTO</b> .....	4
<b>INDICE GENERAL</b> .....	5
<b>ÍNDICE DE FIGURA</b> .....	8
<b>ÍNDICE DE TABLA</b> .....	9
<b>ÍNDICE DE ANEXO</b> .....	10
<b>GLOSARIO DE ABREVIATURA</b> .....	11
<b>RESUMEN</b> .....	12
<b>ABSTRACT</b> .....	13
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	14
<b>CAPÍTULO I</b> .....	15
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	15
<b>1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.</b> .....	15
<b>1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.</b> .....	16
<b>1.2.1. Problema General.</b> .....	16
<b>1.2.2. Problemas Específicos.</b> .....	16
<b>1.3 OBJETIVOS.</b> .....	16
<b>1.3.1. Objetivo General.</b> .....	16
<b>1.3.2. Objetivo Específico.</b> .....	17
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN.</b> .....	17
<b>1.5 DELIMITACIONES DEL ESTUDIO.</b> .....	18
<b>15.1. Delimitación Temporal.</b> .....	18
<b>15.2. Delimitación Espacial.</b> .....	18
<b>1.6 VIABILIDAD DEL ESTUDIO.</b> .....	18

<b>CAPITULO II</b> .....	19
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	19
<b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.</b> .....	19
<b>2.1.1. Investigación Relacionada con el Estudio.</b> .....	19
<b>2.2. BASES TEÓRICAS.</b> .....	25
<b>2.2.1. MOLIENDA.</b> .....	25
<b>2.2.2. COMPUESTOS CIANURADOS.</b> .....	31
<b>2.2.3. LIXIVIACIÓN DINÁMICA.</b> .....	32
<b>2.2.4. CINÉTICA DE LA LIXIVIACIÓN</b> .....	34
<b>2.2.5. EL CIANURO EN SOLUCIÓN.</b> .....	35
<b>2.2.6. CIANURO LIBRE.</b> .....	35
<b>2.2.7. PROCESO DE CIANURACIÓN.</b> .....	38
<b>2.2.8. TERMODINÁMICA DE LA CIANURACIÓN.</b> .....	39
<b>2.2.9. CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DEL ORO.</b> .....	40
<b>2.2.10. FACTORES QUE AFECTAN LA DISOLUCIÓN DE ORO.</b> .....	40
<b>2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.</b> .....	44
<b>2.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.</b> .....	48
<b>2.4.1. Hipótesis General.</b> .....	48
<b>2.4.2. Hipótesis Específicas.</b> .....	48
<b>CAPITULO III</b> .....	49
<b>METODOLOGÍA</b> .....	49
<b>3.1. DISEÑO METODOLÓGICO.</b> .....	49
<b>3.1.1. Tipo de Investigación.</b> .....	49
<b>3.1.2. Enfoque de la Investigación.</b> .....	49
<b>3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.</b> .....	50
<b>3.2.1. Población.</b> .....	50
<b>3.2.2. Muestra.</b> .....	50
<b>3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES.</b> .....	51
<b>3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b> .....	52
<b>3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.</b> .....	53

<b>CAPITULO IV</b> .....	<b>54</b>
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>54</b>
<b>4.1. DATOS RECOPIADOS PARA LA INVESTIGACIÓN.</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2. RESULTADOS VARIABLE INDEPENDIENTE.</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2.1. Primera variable independiente, densidad de pulpa.</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2.2. Segunda variable independiente, densidad de pulpa en la molienda.</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2.3. Tercera variable independiente, fuerza del cianuro de sodio.</b> .....	<b>60</b>
<b>4.3. RESULTADOS VARIABLE DEPENDIENTE.</b> .....	<b>61</b>
<b>4.3.1. Primera variable dependiente carga circulante.</b> .....	<b>61</b>
<b>4.3.2. Segunda variable dependiente %-200m.</b> .....	<b>63</b>
<b>4.3.3. Tercera variable dependiente recuperación de extracción de oro.</b> .....	<b>64</b>
<b>CAPITULO V</b> .....	<b>66</b>
<b>DISCUSIÓN CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>66</b>
<b>5.1. DISCUSIÓN.</b> .....	<b>66</b>
<b>5.2. CONCLUSIONES.</b> .....	<b>68</b>
<b>5.3. RECOMENDACIONES.</b> .....	<b>69</b>
<b>CAPITULO VI</b> .....	<b>70</b>
<b>FUENTE DE INFORMACION</b> .....	<b>70</b>
<b>6.1. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.</b> .....	<b>70</b>

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Control de densidad de pulpa alimento al hidrociclón .....	56
Figura 2. Control de densidad de pulpa en el rebose del hidrociclón .....	57
Figura 3. Control de densidad de pulpa arenas del hidrociclón .....	58
Figura 4. Control de densidad de pulpa descarga del molino .....	59
Figura 5. Control de carga circulante .....	61
Figura 6. Carga circulante en función a la densidad de alimentación y rebose del hidrociclón .....	62
Figura 7. Carga circulante en función a la densidad de alimentación y arena del hidrociclón	62
Figura 8. Control de %-200m.....	63
Figura 9. Control de recuperación de oro.....	64

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1: Proceso de fragmentación de acuerdo a su granulometría. ....	26
Tabla 2: Porcentaje de molturantes según el mineral.....	31
Tabla 3. Operacionalización de variables.....	51
Tabla 4. Datos obtenidos de planta densidades y fuerza de cianuro de sodio.....	54
Tabla 5. Datos obtenidos de planta carga circulante, %-200m y recuperación de oro .....	55
Tabla 6. Control de densidad y carga circulante .....	66

## ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 1. Matriz Consistencia General.....	74
Anexo 2. Matriz Consistencia Especifico .....	75
Anexo 3. Balance de carga en circuito de molienda .....	76
Anexo 4. Datos recopilados de proceso de molienda y cianuración .....	77
Anexo 5. Histograma de carga circulante .....	78
Anexo 6. Índice de capacidad de carga circulante .....	78
Anexo 7. Recuperación de oro en función de la liberación y fuerza de cianuro de sodio .....	80

## **GLOSARIO DE ABREVIATURA**

%	:	Porcentaje
%-200m	:	Porcentaje pasante a malla 200
Ag	:	Plata
CIP	:	Cianuración en carbón en pulpa
d50	:	Punto de corte en la clasificación
g/L	:	Gramos por litros
g/TMS	:	Gramos por toneladas metricas
Kg /TN	:	Kilo gramos por toneladas cortas
kg/dm <sup>3</sup>	:	Kilogramo por decímetros cúbicos
mg	:	Miligramos
N°	:	Número
RM	:	Rango móvil
S.A.C	:	Sociedad anónima cerrada
TMS	:	Toneladas métricas
TMS/día	:	Toneladas métricas por día
kw-Hr/tc	:	Kilowatt por hora por toneladas cortas

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación ha sido realizado con la intención de fomentar y divulgar los diferentes conocimientos que existen con respecto a la extracción de oro mediante la cianuración a nivel industrial, en particular en la industria minera. El estudio de investigación se realizó en la planta minera VICUS S.A.C en donde se evaluaron los parámetros de operación durante un periodo de 25 días.

El principal objetivo del presente estudio es Diagnosticar el circuito de molienda y cianuración, para fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera VICUS S.A.C.; el cual fue llevado a cabo el proceso mediante programas estadísticos, y el tipo de estudio es correlacional aplicada, generador de resultados.

En el control de operación para una carga circulante menor a 0.9 se obtuvieron con una densidad de pulpa alimentada al hidrociclón de 1388 g/L a 1391 g/L y la densidad de rebose esta de 1317.5 g/L a 1321 g/L y con una densidad de pulpa alimentada al hidrociclón es de 1389 g/L a 1390 g/L y la densidad de las arenas de 1521 g/L a 1539g/L, el control de las operaciones con una densidad de pulpa de alimentación al hidrociclón entre 1382.61 g/L a 1417.63 g/L, y una densidad en el rebose de 1300.73 g/L a 1330.87 g/L, para las arenas entre 1506.97 g/L a 1548.63g/L, con un control de la carga circulante de 0.6763 g/L a 1.5628 g/L.

Con un control de la densidad de pulpa en la molienda entre 1726.2 g/L a 1783.16 g/L, se obtiene una liberación pasante a malla 200m de 71.736% g/L a 77.948%.

El control de la recuperación de oro se tiene con un control de fuerza de cianuro de 1.2178g/L a 1.3486g/L y un control de la recuperación en la extracción de oro 88.873% a 90.825%.

**Palabra clave:** Molienda y cianuración, liberación clasificación lixiviación con cianuro, molienda y cianuración de oro y plata.

## ABSTRACT

The present research work has been carried out with the intention of promoting and disseminating the different knowledge that exists with respect to the extraction of gold through cyanidation at the industrial level, particularly in the mining industry. The research study was conducted at the VICUS S.A.C mining plant where the operation parameters were evaluated during a period of 25 days.

The main objective of the present study is to diagnose the grinding and cyanidation circuit, to set the control parameters of the operations of the mining company VICUS S.A.C .; which was carried out the process through statistical programs, and the type of study is applied correlational, generator of results.

In the control of operation for a circulating load less than 0.9 were obtained with a density of pulp fed to the hydrocyclone from 1388 g / L to 1391 g / L and the overflow density is from 1317.5 g / L to 1321 g / L and with a density of pulp fed to the hydrocyclone is from 1389 g / L to 1390 g / L and the density of the sands from 1521 g / L to 1539 g / L, the control of operations with a density of feed pulp to the hydrocyclone between 1382.61 g / L at 1417.63 g / L, and a density in the overflow from 1300.73 g / L to 1330.87 g / L, for the sands between 1506.97 g / L at 1548.63g / L, with a control of the circulating load of 0.6763 g / L at 1.5628 g / L.

With a control of pulp density in the grind between 1726.2 g / L to 1783.16 g / L, a 200m mesh through-release is obtained from 71.736% g / L to 77.948%.

The control of gold recovery is with a cyanide strength control of 1.2178g / L to 1.3486g / L and a recovery control in gold extraction 88.873% to 90.825%.

**Keyword:** Milling and cyanidation, release classification, leaching with cyanide, grinding and cyanidation of gold and silver.

## INTRODUCCIÓN

La extracción de oro a partir de minerales auríferos en el mundo cada día es más debido a los precios internacional favorables por ello en el Perú debido a las reservas que existen y aprovechando la coyuntura se forman pequeñas empresas y se están dedicado a la extracción de sus recursos en beneficios de la sociedad.

En el proceso de la producción se debe controlar las variables que interviene para minimizar los costos y aumentar la producción, por ello es necesario su control en la molienda y cianuración. En la " molienda " se debe controlar la carga circulante, para ellos las densidades de molienda para la liberación y minimizar el retorno de mineral liberado la densidad de pulpa en la alimentación, rebose y arenas que retornan a la molienda.

La finalidad del proceso en el circuito la molienda y cianuración son la obtención de productos que satisfagan las condiciones y especificaciones sobre márgenes de control máximo y mínimo, para producir materiales que cumplan determinados requisitos de la liberación de mineral, y extracción de oro para deben tener un control de operación con un límite superior e inferior donde puedan oscilar y cumplir con los objetivos.

En la actualidad, el uso de la tecnología moderna, el proceso de molienda y cianuración se realiza bajo un estricto control instrumental, desde salas de control centralizado con monitoreo de alarmas a través de controladores lógicos programables, control de variables y parámetros de proceso, estrategias computacionales que tienden a sistemas expertos de control.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.

La Compañía Minera Vicus S.A.C. inicia sus actividades en el año 2000 en la Provincia de Barranca como un proyecto familiar, enfocados en la extracción de minerales metalíferos no ferrosos y en el desarrollo del bienestar de las comunidades aledañas. Actualmente cuenta con 60 trabajadores, que están comprometidos con el propósito de la organización, como es la responsabilidad con la calidad, el medio ambiente, la seguridad y salud ocupacional. Está clasificada en el régimen de pequeña minería en la concesión minera Capacho de Oro – I, con código N° 01 03700 – 97.

La unidad minera explota 400 TMS por mes aproximadamente, cuenta con una planta de beneficio o denominada también planta CIP debido al proceso del carbón en pulpa que se realiza con una capacidad de 15 TMS/día con una ley de corte o ley mínima explotable de 13 g/TMS de oro en promedio.

La planta de beneficio no tiene estandarizado el proceso en todo el proceso desde que ingresa el mineral pasando por el circuito de chancado, molienda, clasificación y cianuración por ello es necesario realiza una evaluación y establecer los parámetros de control operacional para ello se desea establecer una evaluación del circuito de molienda y cianuración porque es el punto más crítico para nuestras operaciones. En virtud a ello se plantea el problema que se describe en el planteamiento del problema para el presente estudio.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

### **1.2.1. Problema General.**

¿En qué medida el diagnóstico del circuito de molienda y cianuración, nos permitirá fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.?

### **1.2.2. Problemas Específicos.**

- ¿En qué manera la densidad de pulpa optima, nos permitirá establecer los parámetros de control de la carga circulante?
- ¿En qué medida la molienda de los minerales, nos permitirá establecer los parámetros de control del %-200m?
- ¿En qué medida la fuerza de cianuro, nos permitirá establecer los parámetros de control de la extracción de oro?

## **1.3 OBJETIVOS.**

### **1.3.1. Objetivo General.**

Diagnosticar el circuito molienda y cianuración, para fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.

### **1.3.2. Objetivo Específico.**

- Evaluar la densidad de pulpa óptima, para establecer los parámetros de control de la carga circulante.
- Evaluar el circuito de molienda de los minerales, para establecer los parámetros de control del %-200m.
- Evaluar la fuerza de cianuro, para establecer los parámetros de control de la extracción de oro.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN.**

Al realizar el presente trabajo de investigación sobre evaluación del circuito molienda y cianuración, para establecer los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C., Nos brindara obtener información para establecer los parámetros de control de circuito de molienda y cianuración y mejoramiento de su recuperación de oro.

Los Métodos, procedimientos y técnicas e instrumentos que se aplican en la presente demostrarán que se pueden desarrollar futuros trabajos de investigación.

## **1.5 DELIMITACIONES DEL ESTUDIO.**

### **15.1. Delimitación Temporal.**

La investigación a realizar corresponde al periodo 2017.

### **15.2. Delimitación Espacial.**

La investigación se realizará en Empresa Minera Vicus S.A.C.

## **1.6 VIABILIDAD DEL ESTUDIO.**

La realización de la presente investigación es viable, por cuanto se tiene los conocimientos teóricos, los medios técnicos y los recursos económicos necesarios. Así mismo, está asegurado el acceso a lugares de las fuentes de la información requeridas; también se cuenta con la autorización correspondiente del jefe de la Minera Vicus S.A.C., a efectos de llevar a cabo el correspondiente trabajo de campo.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.**

Todos los trabajos de investigación que se mencionan a continuación serán utilizados como antecedentes para la realización del proyecto de tesis evaluación del circuito de molienda y cianuración, para establecer los parámetros de control de las operaciones de la Minera Vicus S.A.C.

##### **2.1.1. Investigación Relacionada con el Estudio.**

En su trabajo de investigación sobre optimización de los procesos y operaciones metalúrgicos en la Compañía Caraveli S.A.C. (Polomino, 2005) llego a las siguientes conclusiones:

(...) La optimización de nuestro proceso metalúrgico es de mucha importancia para definir el performance metalúrgico del mineral de tratamiento, siendo este un punto importante en el crecimiento de nuestro tratamiento.

Las prioridades de la suscripción de la política, lineamientos generales respecto al cuidado del medio ambiente y la optimización de los procesos es de suma importancia.

La molienda optima de cianuración para el mineral oxidado es de 75%- m200.

La formulación matemática (multiplicadores de Lagrange) para el ajuste de mallas en los diferentes circuitos aplicados, la determinación de parámetros metalúrgicos nos definió el performance metalúrgico de nuestra planta.

Por la mineralización cambiante de los óxidos hacia los sulfuros se están desarrollando pruebas metalúrgicas que determine un tratamiento alternativo económico de minerales sulfurados que es de gran expectativa para la continuidad de nuestras operaciones.

El 90% de oro ésta asociado en los sulfuros (veta ESPERANZA 1760), siendo su molienda optima de flotación de 55-60%-m200.

La cianuración de mineral sulfurado (vetya esperanza 1730) la granulometría de liberación no tiene influencia en la mejora de disolución del oro como:

20 horas CN	%Disolución	Consumo Kg NaCN/TN	pH
75%-200M	90.34	7.7	10.85
100%-200M	90.9	7.72	10.65

En el trabajo de investigación sobre, Modelo “Cebaco” aplicado al control de procesos en el circuito de Molienda-Clasificación en una planta concentradora de minerales mediante el software LabVIEW (Basurto, 2011, págs. 224-225). Llego a las siguientes conclusiones:

El control de las variables operativas en el circuito de molienda clasificación realizadas con la metodología propuesta “CEBACO” es eficiente hasta en un 90 % con un nivel de significancia de 0.08 y económicamente rentable en 11.53 dólares americanos por tonelada de mineral tratado.

El tamaño de partición llamado d50 calculado por el método tradicional es de 81.31 micrones y por el método propuesto es de 83.56 micrones siendo la variación de tan solamente 2.7 %.

La eficiencia de clasificación calculada por la metodología tradicional es de 57.93 % y por la metodología propuesta es de 53.18 %, siendo la variación solamente del 8% y con un nivel de significancia del 0.08.

Los resultados más óptimos que se obtuvieron fue donde el tamaño de corte (d50)

calculado con la metodología “Cebaco” es de 85.2559 micrones y el d50 calculado con los datos del análisis granulométrico realizado por la metodología tradicional es de 88.3061 micrones casi son similares siendo la diferencia de tan solamente 3.45%, la eficiencia de clasificación calculada por la metodología “Cebaco” es de 51.6255% y haciendo los cálculos con la metodología tradicional da que la eficiencia de clasificación es de 51.8102 % los resultados son similares siendo la diferencia de tan solamente el 0.36%, y la razón de la carga circulante calculada por la metodología “Cebaco” es de 1.887 y la razón de carga circulante calculada por la metodología tradicional es de 1.903, existiendo una diferencia de tan solamente 0.84%, valores que están muy cercanos.

El tiempo que se demora para realizar el control de las variables operativas con el método tradicional es de aproximadamente 4 horas y con el método propuesto el tiempo es de tan solamente 5 minutos, existiendo una diferencia considerable.

El modelo matemático que tienen mayor ajuste y se acerca más a lo real, para el análisis de distribución granulométrica de partículas mineralizadas es la de Rosin – Rammler.

En el trabajo de investigación sobre la Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales de Au - Ag en la compañía minera Ares Castilla- Arequipa (Gomez & Morales, 2012)

Llegaron a las siguientes conclusiones:

La composición mineralógica en el yacimiento de la Compañía Minera Ares es relativamente sencilla. Los minerales de ganga ocupan un 98.77% del total del mineral principalmente están compuestas de cuarzo, adularia e illita, mientras que los sulfuros más comunes son pirita, arsenopirita, marcasita, sulfuros y sulfosales de plata (acantita y pirargirita), tetraedrita, galena, esfalerita, calcopirita, electrum, el oro se encuentra en mayor parte libre. Del análisis realizado en laboratorio la composición química de este

mineral es: Au 6.00 (g/TM), Ag 156.00 (g/TM), Zn (0.0092%), Cu (0.0028%), Fe (1.55%) y Pb (0.0053%).

Según las pruebas experimentales preliminares que se realizaron se obtuvieron los parámetros operativos para realizar el presente trabajo de investigación, estas fueron: tiempo de molienda 27'51" minutos, tamaño de partícula de 74% -270 mallas y las pruebas de cinética establecieron un tiempo de lixiviación de 72 horas. 3. Las variables identificadas para lograr la optimización del proceso fueron la concentración de NaCN (0.2% - 0.3%), Nitrato de Plomo (170g/TM - 190g/TM) y el pH de la solución (10 - 11), la variación de cada una de estas permitió un mayor porcentaje de extracción de valores de oro y plata en el proceso. Los mejores resultados de un total de 11 pruebas de cianuración a nivel laboratorio se obtuvieron en la prueba número ocho, con los siguientes resultados: Ley de cabeza (Au) = 6.06g/TM, Extracción (Au) = 97.60%, Ley de ripio (Au) = 0.14g/TM, Para la plata, Ley de cabeza (Ag) = 156.95g/TM, Extracción (Ag) = 88.63%, Ley de ripio (Ag) = 17.85g/TM.

Mediante la evaluación de los resultados por el diseño experimental se determinó que las variables más influyentes en el proceso de lixiviación para este mineral son: la concentración de NaCN y de Nitrato de Plomo; puesto que la variación en estas presenta una seria influencia sobre el porcentaje de extracción. Los efectos producidos por la variación de estas variables son los siguientes:

- Los efectos de la variable Concentración de NaCN(%), al aumentar de 0.2 a 0.3% ( $X_2$ ), son de 0.79 en Au y 0.815 en Ag; lo que produce un incremento en su extracción.
- Los efectos de la variable Concentración de  $Pb(NO_3)_2$  (g/TM) al aumentar de 170 a 190 ( $X_1$ ), son de 0.57 en Au y 0.575 en Ag; lo que produce un incremento en su extracción.

De acuerdo a los resultados obtenidos por el diseño experimental se determinaron los siguientes modelos matemáticos:

Para el oro:  $Y_0 = 89.615 + 0.0285Z_1 + 7.9Z_2$

Para la plata:  $Y_0 = 80,51 + 0,02875Z_1 + 8,15Z_2$

Los cuales permitieron establecer los siguientes parámetros operativos:

- Concentración de NaCN = 0.30%.
- Concentración de Nitrato de Plomo = 190 g/TM.
- pH de la solución = 10.5.

Evaluación de circuitos industriales de molienda y clasificación

En la Evaluación de circuitos industriales de molienda y clasificación (Alvarez M., 1996) llego a la siguientes Conclusiones:

La evaluación técnica nos permite obtener datos de un circuito en operación, realizando calculas numéricos con esta data determinamos los niveles de eficiencia de las principales variables que afectan al proceso, de los equipos que se encuentran involucrados, nos hace ver en qué condiciones están operando. Al analizar los resultados obtenidos determinamos si estos son los adecuados. Si no son los adecuados seleccionamos las variables de mayor influencia para su posterior optimización utilizando una técnica adecuada.

En un circuito de molienda - clasificación, generalmente estandarizar las variables de operación significa tener las densidades de pulpa estables. Para ello la alimentación del mineral debe ser constante (con características físicas y químicas similares), la dosis de agua adecuada según el requerimiento normal, el equipo en buen estado y el renuevo de bolas en cantidad y calidad adecuada. Pero las características del mineral alimentado al circuito no simple son constantes, esto hace que los demás parámetros

varíen.

La eficiencia de la molienda - clasificación depende en gran medida de: La distribución de tamaño en la alimentación, Volumen de carga moledora y su distribución en tamaño, Cambios en las características del mineral, Distribución de tamaño de los productos del molino y Eficiencia de la clasificación.

El objetivo de la operación de clasificación en el circuito cerrado es hacer más eficiente el proceso de molienda y asegurar que el producto de la operación este bajo un determinado tamaño recirculando hacia el molino las partículas de mayor tamaño.

## **2.2. BASES TEÓRICAS.**

### **2.2.1. MOLIENDA.**

#### **2.2.1.1. Grados de Liberación.**

La molienda es el último escalón de la fragmentación industrial, sigue a la trituración normalmente, y se caracteriza por el tamaño de salida de los productos que puede estar entre algunos mm y algunas pm (Wills & Napier-Munn, 2006).

Se persigue, normalmente, la liberación de unas especies mineralógicas con otras hasta aquel tamaño que permita una concentración diferenciada o bien llegar al tamaño de grano exigido por el método posterior de utilización del producto obtenido.

Se realiza mediante equipos denominados molinos y estos pueden trabajar en seco o en húmedo. La diferencia entre ambos medios se suele caracterizar por una humedad en torno al 8% (este valor produce en los productos una cierta adherencia y marca un límite en la tendencia del comportamiento dentro de los equipos de molienda). Por debajo se considera humedad superficial y el trabajo de los equipos es en seco, siendo deseable que esta humedad no rebase el 3%-4% (Drzymala, 2007).

El trabajo en húmedo se caracteriza por unos rangos de humedad elevados, del 40% al 70% de agua en volumen lo que representa para la mayoría de los minerales unos valores de Sp (relación de sólidos en peso) entre 55% y 80%.

Para una humedad entre el 5% y el 10% se produce una pasta pegajosa y el rendimiento decae de forma importante y para valores mayores, ya un trabajo en húmedo, se recupera un valor de rendimiento útil y que se mantiene hasta que la dilución es tan elevada (Sp inferior al 50%) que se impide o dificulta el choque de las bolas con los granos.

Se diferencia en la tabla las denominaciones correspondientes a proceso, etapa y escalón.

*Tabla 1: Proceso de fragmentación de acuerdo a su granulometría.*

<b>Proceso</b>	<b>Etapa</b>	<b>Escalón</b>	<b>Humedad</b>	<b>Tipo de quipo</b>
Fragmentación (Reducción de un bloque a tamaños menores)	Trituración (Etapa de la fragm. para tamaños gruesos)	Primaria  Secundaria  Terciaria	Seco o  Húmedo	Trituradoras (Mandíbulas, conos, rodillos, martillos, etc.)
	Molienda (Etapa de la fragm. para tamaños finos)	Gruesa  Media  Fina  Ultrafina	Seco o  Húmedo	Molinos (Barras, bolas, SAG, autógenos y de guijarros)

### **2.2.1.2. Sistemas de Instalaciones y Equipos.**

Los equipos de fragmentación tienen mecanismos o técnicas para hacer frente a los problemas inherentes al efecto de fragmentar, dentro de estas necesidades se puede indicar los siguientes:

- a. Sistema o técnica antidesgaste. Los productos y la operación a realizar obligan al contacto entre materia y equipo, más la necesidad de aplicar fuerzas de contacto. Esto produce un efecto mayor o menor de desgaste según la cualidad abrasiva del material, en el equipo, y es función de la característica del material y del tipo de proceso. Los elementos para disminuir este efecto, protecciones recambiables normalmente, se denominan sistema antidesgaste y se caracteriza por su disposición, resistencia y facilidad para ser restituido o cambiado en una operación de mantenimiento.
- b. Sistema de regulación de la granulometría. Las instalaciones deben ser capaces de dar un producto de salida que tenga ciertas variaciones y tener cierta capacidad de adaptarse a diferentes alimentaciones dando un producto de salida determinado, disponer de mecanismos de regulación de la granulometría en función de parámetros manejables por el operador.
- c. Sistema o mecanismo antiintritables. Estos sistemas deben garantizar la integridad del equipo ante elementos intritables (constituidos normalmente por piezas metálicas procedentes de roturas o procedentes del frente como barrenas, tornillos, etc.) o del transporte.

Además de poner medios de identificación y retirada de intritables como imanes u otros, los equipos que representan fuertes inversiones (son caros) y donde las paradas constituyen pérdidas en reparación y por lucro cesante o pérdida de producción, deben tener en su diseño sistemas para paliar o evitar los efectos de la entrada no deseada de intritables a la máquina.

- En general, todos los equipos de trituración y molienda disponen de los sistemas anteriormente mencionados. Antidesgaste, Regulación, Antiintritables.

- Sistemas o barreras de seguridad. Disposición de elementos de protección para evitar caídas, atrapamientos, y en general accidentes por el acceso no previsto o deseado a partes móviles del equipo. son máquinas de velocidad lenta por lo que se genera en su entorno una falsa sensación de control.

### **2.2.1.3. Zonas del Interior de un Molino.**

Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su eje y en su interior existe una mezcla del material a moler junto con cuerpos moledores. Según sea la característica de estos cuerpos molturadores, cilindros metálicos (barras metálicas con una longitud muy superior al diámetro), bolas metálicas o de fundición, trozos gruesos del propio mineral a moler, compuestos de sílice o mezcla de componentes, así se puede denominar el molino.

La acción principal en el interior de un molino es la abrasión o atrición que se produce porque al girar el cilindro, la masa que está en su interior se desplaza sobre si misma produciendo un gran roce entre las partículas y de estas con los elementos molturadores. No es despreciable el efecto de impacto, función de la velocidad de rotación, de los cuerpos cuando son lanzados o por su caída en cascada o catarata por el efecto de giro y desplazamiento de masas.

En general para producir partículas finas prepondera el efecto abrasivo y para tamaños mayores, el impacto empieza a tener relevancia, en función del tamaño de los cuerpos moledores.

Los molinos pueden trabajar de forma discontinua, cerrando el equipo y haciéndolo girar por un tiempo determinado para después vaciar el contenido y separar el material molido de los cuerpos molturadores (bolas, guijarros, etc.), pero en minería y canteras el trabajo es, de forma general, en continuo. Esta forma de trabajo, en continuo, hace que la granulometría producida

siga un proceso estadístico donde el tiempo de residencia dentro del molino afecta a la granulometría.

El cilindro gira sobre ejes o extremos huecos. Por el lado de la alimentación, y a través del espacio hueco del eje, se introduce el material a moler, agua si hay que ajustar el contenido de sólidos en peso o volumen, y la reposición de los cuerpos moledores y por el otro extremo (según el tipo de vertido: de rebose, lateral, central, otro) se produce una salida continua de material molido, normalmente arrastrado por una corriente de agua (molienda en húmedo) o de aire (molienda en seco).

El tiempo de residencia viene afectado por el tamaño del cilindro, volumen útil, y el caudal circulado por lo que la variación del caudal es una forma de regulación granulométrica y de adaptación del molino a necesidades cambiantes.

Dentro de un molino, tanto de barras como de bolas, se pueden definir diferentes zonas según el grado de llenado y la velocidad de rotación que son dos elementos fundamentales en la operación de molienda. Junto con las anteriores variables, adquiere una importancia relevante el grado de humedad del material a moler que condiciona el tipo de molienda y los resultados de la misma.

Se considera elementos característicos principales de funcionamiento de un molino los factores siguientes:

- Grado de llenado del molino.
- Velocidad de giro del molino.

- Humedad de los productos a moler (relación agua/sólido en los productos de la alimentación).

El núcleo representa una zona de nula o baja actividad de molienda, y por el contrario, el pie de carga corresponde a la zona más activa del molino, la de mayor capacidad de fragmentación.

El esquema muestra las bolas (cuerpos moledores) de diámetro uniforme cuando en la realidad del interior de un molino en funcionamiento los diámetros muestran toda una gama de dimensiones, desde el menor posible, hasta el nominal que se introduce en la reposición.

#### **2.2.1.4. Grado de Llenado.**

El grado de llenado, es decir la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga, conjunto de mena a moler y elementos molturadores, es un factor que afecta directamente al rendimiento del molino.

Representando la variación de la potencia consumida por el molino en función del grado de llenado se observa que tiene un máximo en el entorno del 50-55% de utilización del volumen interno. A partir de este valor disminuye la potencia demandada por el molino hasta hacerse nula para un grado de llenado del 100%.

A partir del 50-55% de carga del molino, los sucesivos incrementos de llenado aportan una masa que se opone al movimiento, cuadrante de 0 a 90°, y una cantidad de masa mayor, en el lado opuesto del eje de simetría vertical, que favorece el movimiento, cuadrante 90 a 180°, y esta diferencia aumenta hasta el llenado total del molino en el que la molienda se hace nula.

Esto es coincidente con los valores de la experiencia de Birebent cuya gráfica se adjunta. Este grado de llenado, en la práctica está comprendido entre el 40% y el 55%, habitualmente el 45%, y lo forman bolas o barras (elementos molturadores) y el propio mineral a moler.

El volumen ocupado, lo producen normalmente los elementos molturadores y entre estos se introduce el material a moler, siendo estos huecos entre las barras o las bolas el concepto utilizado para obtener el peso del material molturador. Se considera por geometría que los huecos entre barras representan el 20% del volumen y entre las bolas el 40% del volumen y así se tiene:

*Tabla 2: Porcentaje de molturantes según el mineral*

Elemento	% huecos	Peso de los elementos molturadores	Observaciones
Bolas	40	$P_{bolas} = V_{mol} 0,45 0,6 \rho_b$	$\rho_b$ : Densidad de las bolas, material molturador, para el acero $7,85 \text{ kg/dm}^3$
Barras	20	$P_{barras} = V_{mol} 0,45 0,8 \rho_b$	$\rho_b$ : Densidad de las barras
Carga del molino	0%	$P_{carga} = V_{mol} 0,45 (0,6 \rho_b + 0,4 \rho_m) = V_{mol} 0,45 (0,8 \rho_b + 0,2 \rho_m)$	Molino de bolas Molino de barras $\rho_m$ : Densidad del mineral

### **2.2.2. COMPUESTOS CIANURADOS.**

Una de las razones para el alto valor adjudicado al oro es su resistencia al ataque de la mayoría de los agentes químicos. Una excepción es el cianuro o, más específicamente, una solución que

contiene cianuro y que disuelve el metal precioso.

Como se apuntaba en la introducción, el término “cianuro” sirve para designar a una familia de compuestos químicos inorgánicos que se caracterizan por la presencia de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple. Algunos autores han descrito al cianuro como un pseudo-halógeno (Chatwin, 1990). Sin embargo, esta analogía no es siempre adecuada, especialmente en términos de formación de complejos metálicos (Havlík, 2008).

Debido a sus propiedades químicas, el cianuro es importante tanto para la industria como para el medio ambiente. Su interés industrial deriva de que es un fuerte agente “ligante” en forma iónica, capaz de formar compuestos metálicos estables con casi cualquier metal pesado en bajas concentraciones (Gupta & Krishnamurthy, 2005).

### **2.2.3. LIXIVIACIÓN DINÁMICA.**

Uno de los métodos de disolución de oro más utilizado en el mundo, es la cianuración por agitación o lixiviación contracorriente, debido a la elevada velocidad de reacción, las altas recuperaciones de oro obtenidas y porque funciona para una amplia variedad de minerales. En contraposición tiene costos más altos de instalación y operación respecto de los métodos en pilas, por lo que se aplica solo a menas que poseen leyes económicas. La elevada cinética de lixiviación de oro se debe primordialmente a la mejor liberación del oro, producto de una reducción de tamaño mayor (Llorente, 1991).

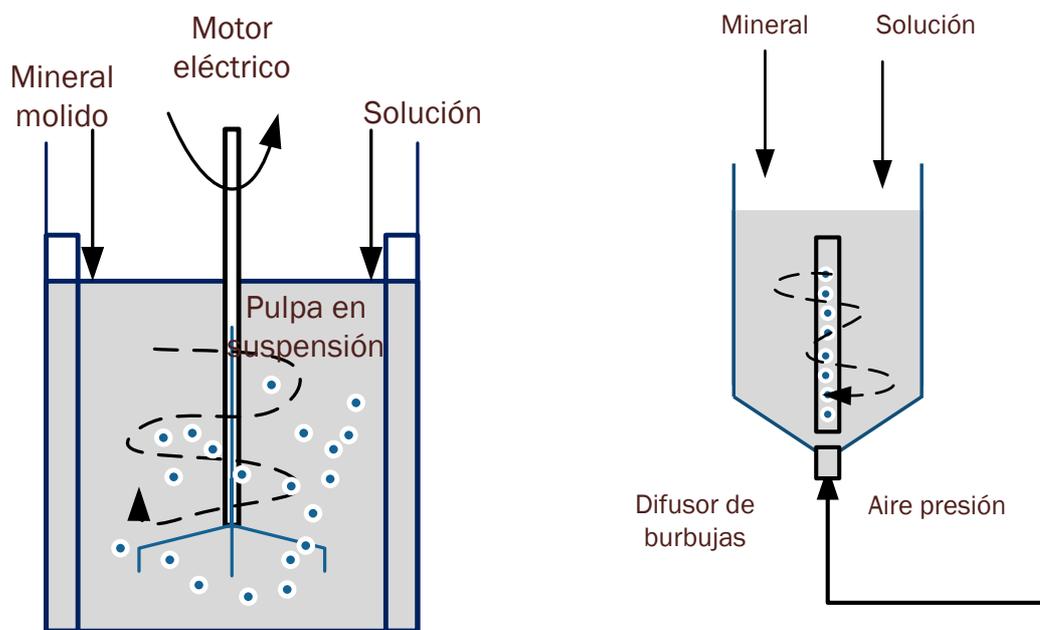
El proceso de agitación funciona muy bien para minerales con tamaños inferiores a 150  $\mu\text{m}$ , existiendo operaciones que trabajan con minerales a  $d_{80}$  inferiores a 45  $\mu\text{m}$ . Tamaños mayores

incrementan el desgaste de las paletas de agitación por efecto de la abrasión y existe mayor dificultad de mantenerlos en suspensión (Pino, 2014).

La densidad de pulpa utilizada varía entre 35–50% de sólidos, dependiendo del tamaño de las partículas, la gravedad específica y la presencia de minerales que incrementan la viscosidad de la pulpa, como las arcillas. El proceso de cianuración se inicia con la regulación del pH de trabajo entre 9,5 – 11,5, mediante la adición de la cal, previa a la adición de cianuro. Estas adiciones pueden realizarse en el tanque de cianuración o previamente en el molino (Llorente, 1991).

La variante de lixiviación dinámica puede realizarse de manera discontinua esto se prefiere en el caso de tener altos valores metálicos en pequeños tonelajes, mientras que se busca la operación continua a gran escala (Reyes, 1997).

*Fig. N° 1. Equipo de Lixiviación dinámica por agitación mecánica y neumática*

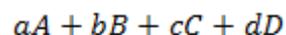


## 2.2.4. CINÉTICA DE LA LIXIVIACIÓN

La velocidad con que se llega al estado de equilibrio de una fase, involucrada en un proceso de un determinado elemento se denomina cinética. En cinética se acostumbra a distinguir a dos tipos de reacciones; homogéneas y heterogéneas. El primer término se refiere a reacciones que ocurren dentro de una sola fase, es decir, entre las moléculas de un gas o en una solución. Una reacción se denomina heterogénea si hay más de una fase involucrada. Por ejemplo, la corrosión de un metal, disolución de un mineral o precipitación de un metal con hidrogeno puede incluir difusión en una solución (Vargas, 1990).

En un sistema cinético complejo el progreso de la reacción puede seguirse ya sea midiendo la velocidad de desaparición de reactivos o la velocidad de aparición de productos. La cantidad de cada uno dependerá de la estequiometría global de la reacción. Esto se puede expresar mejor en términos de la velocidad racional que es la velocidad de aparición o desaparición de un componente dado dividido por su coeficiente estequiométrico (Misari, 2010).

Reacción general:



$$r_r = \frac{dn_A}{a} = \frac{dn_B}{b} = \frac{dn_C}{c} = \frac{dn_D}{d}$$

En general, para reacciones heterogéneas la etapa controlante de la velocidad puede ser una sola o una combinación de las siguientes etapas:

- a Difusión de reactivos desde el seno de la solución a la superficie del sólido.

- b Reacción de los reactivos en o con la superficie sólida.
- c Difusión de productos desde la superficie al seno de la solución.
- d Si la reacción produce un sólido o deja un residuo sólido poroso hay dos etapas adicionales que son:
  - Difusión de reactivos a través de la capa de producto sólido.
  - Difusión de productos a través de la capa de producto sólido.

### **2.2.5. EL CIANURO EN SOLUCIÓN**

Después de haber extraído el oro por medio de procesos hidrometalúrgicos, pueden estar presentes cuatro tipos principales de compuestos de cianuro en los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos: cianuro libre, cianuro WAD, cianuro SAD y formas cianuradas insolubles. Juntos, los cuatro tipos de compuestos constituyen el denominado “cianuro total”. El conocimiento de sus propiedades físico-químicas y de su comportamiento en solución será clave para comprender su importancia respecto de la seguridad y el medioambiente. Los compuestos cianurados existen a temperatura estándar (25°C) en fase sólida, líquida y/o gaseosa, y bajo diferentes formas moleculares e iónicas (Varga, 2016).

### **2.2.6. CIANURO LIBRE.**

“Cianuro libre” es el término utilizado para describir tanto al ión cianuro ( $\text{CN}^-$ ) que se disuelve en el agua del proceso, como al ácido cianhídrico (HCN) que se forma en la solución. En los procesos de cianuración mineros, las briquetas sólidas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el anión de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y el ión cianuro ( $\text{CN}^-$ ). El ión cianuro se puede

combinar luego con el ión hidrógeno para formar HCN molecular, según la reacción (Varga, 2016):



En solución acuosa, sería más acertado considerar el siguiente equilibrio:



La medida en que esta reacción se desplace a uno u otro lado depende casi exclusivamente del pH de la solución. Si el pH no es muy elevado, la concentración de protones ( $\text{H}^+$ ) en el agua será importante y la reacción (1) se encontrará desplazada a la derecha y de acuerdo con el principio de Le Chatelier. Así, a valores de pH bajos, predominará el ácido cianhídrico (fase estable) sobre el ión cianuro. En cambio, si el pH es elevado, la concentración de protones será pequeña y la reacción (1) estará desplazada hacia la izquierda, predominando entonces la forma iónica. En condiciones normales de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y  $\text{CN}^-$  son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9,4. Las proporciones relativas de ambos compuestos en función del pH quedan reflejadas en la siguiente gráfica (modificada de Scott y Engles, 1981):

Fig. N° 2. Equilibrio HCN/CN<sup>-</sup> en función del pH.

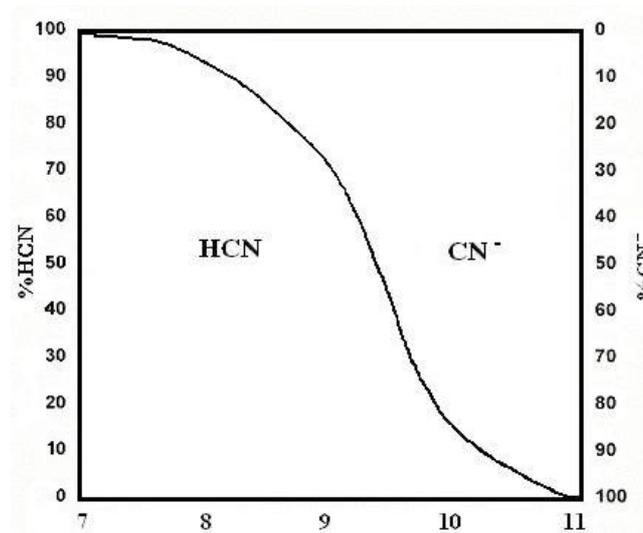
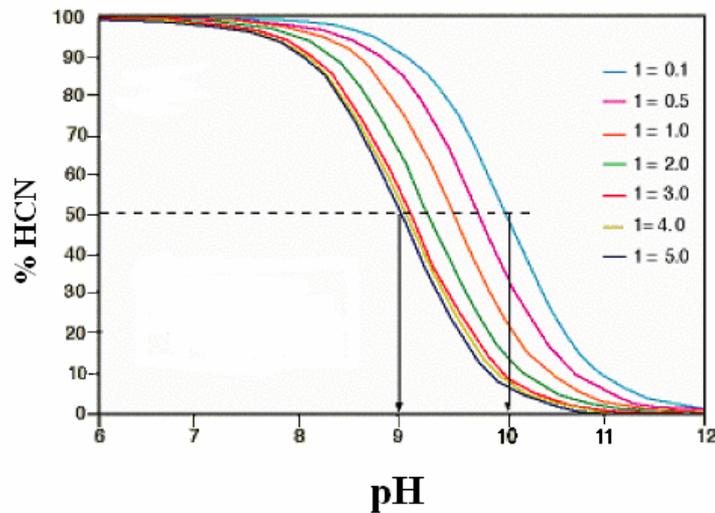


Fig. N° 3. Variación del balance HCN/CN<sup>-</sup> con la salinidad.



Sólo el CN<sup>-</sup> forma complejos con metales y únicamente el HCN es volátil a partir de soluciones acuosas, razón ésta por la que los procesos de cianuración deben operar a valores de pH elevados; de otra forma, su reactivo ligante (CN<sup>-</sup>) se perdería por volatilización, ya que el punto de ebullición del ácido cianhídrico es de 25,7°C y posee una elevada presión de vapor (100 KPa a 25°C) (Meehan, 2001). Así, con el fin de retener el cianuro en la solución y controlar las

emisiones de ácido cianhídrico en el lugar de trabajo, se agrega cal para que reaccione con los posibles protones que pueda haber en solución.

En la planta de extracción de oro, los operadores mantienen el pH de la solución a valores cercanos a 10,5 con el fin de impedir la volatilización. Esto preserva el cianuro en el sistema de extracción de oro, donde es necesario y, al mismo tiempo, limita el riesgo de inhalación por parte de los trabajadores de altas concentraciones de HCN gaseoso en un espacio cerrado (Fajardo, Burbano, Burbano, Apraz, & Moreno, 2010).

### 2.2.7. PROCESO DE CIANURACIÓN.

El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. La reacción enunciada por Elsher en su Journal Prakchen (1946), es la siguiente:



La química involucrada en la disolución de oro y plata en el proceso de cianuración en pilas es la misma aplicada en los procesos de cianuración por agitación.

El oxígeno, esencial para la disolución del oro y plata, es introducido en la solución de cianuro mediante la inyección directa de aire al tanque solución de cabeza, por irrigación en forma de lluvia y por bombeo de la solución recirculante.

La velocidad de disolución de los metales preciosos en soluciones de cianuro depende del área superficial del metal en contacto con la fase líquida, lo que hace que el proceso de disolución sea un proceso heterogéneo; la velocidad de disolución depende también de la velocidad de agitación lo que indica que el proceso sufre la presión de un fenómeno físico (Misari, Metalurgia del Oro , 1993).

### **2.2.8. TERMODINÁMICA DE LA CIANURACIÓN.**

Los diagramas de Pourbaix que relacionan el potencial de óxido-reducción (Eh) del metal con el PH del Medio muestran que compuestos como:  $\text{Au(OH)}$  ;  $\text{AuO}_2$  ;  $(\text{HAuO}_3)^{-2}$  y también el ión  $(\text{Au})^{+3}$  requieren elevados potenciales Redox (superiores al de la descomposición del oxígeno) para formarse. La lixiviación del oro metálico es, por lo tanto, muy difícil a causa de la gran estabilidad de este último.

En el diagrama Au-H<sub>2</sub>O-CN, no obstante, la reacción:  $\text{Au (CN)}_2 + e \leftrightarrow \text{Au} + 2 \text{CN}$ , se lleva a cabo dentro de los límites de estabilidad del agua. El campo de estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente muestra una pendiente pronunciada (efecto hidrólisis del cianuro a pH menor a 9) tornándose luego casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico, hecho que a su vez permite que se haga efectiva la reacción de lixiviación por formación de aurocianuros. En el mismo gráfico se puede observar que los compuestos  $\text{Au(OH)}_3$ ,  $\text{Au}^{+3}$  y  $(\text{HAuO}_3)^{-2}$  son reducidos por la introducción del cianuro (Chavez, 2014).

### **2.2.9. CINÉTICA DE DISOLUCIÓN DEL ORO.**

Una reacción fisicoquímica en el cual se hallan involucradas una fase sólida y otra líquida se consume en las cinco etapas siguientes (Misari, 2010):

- 1) Difusión de los reactantes desde la solución hasta la interfase sólido-líquido.
- 2) Adsorción de los reactantes en la superficie del sólido.
- 3) Reacción en la superficie.
- 4) Desorción de los productos de la reacción de la superficie del sólido.
- 5) Difusión de estos productos de la interfase sólido-líquido a la solución.

### **2.2.10. FACTORES QUE AFECTAN LA DISOLUCIÓN DE ORO.**

Los principales factores que se deben tener en cuenta en el proceso de cianuración son (Reyes, 1997):

#### **a) Concentración de cianuro.**

La razón de disolución del oro en soluciones cianuradas aumenta linealmente con la concentración de cianuro, hasta que se alcanza o se produce un máximo, más allá del cual un incremento en la concentración de cianuro no aumenta la cantidad de oro disuelto, sino por el contrario tiene un ligero efecto retardante.

#### **b) Concentración de oxígeno.**

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar, no así la del

oxígeno, debido a su escasa solubilidad en agua bajo condiciones atmosféricas, a nivel del mar y 25 °C se puede tener en solución 8,2 mg O<sub>2</sub>/litro (0.082 g/litro).

Por esta razón se dice que la cianuración está controlada por fenómenos de transporte. El cianuro es fácil de adicionar, pero el oxígeno es difícil de controlar en solución.

Se ha determinado, con valores experimentales y prácticos, que es adecuado tener una relación [CN<sup>-</sup>]/ [O<sub>2</sub>] cercana a 6, para tener la máxima velocidad de disolución de oro.

La máxima concentración de oxígeno en la solución podrá ser de 8 mg/l, entonces la máxima razón de disolución del oro sobre condiciones ideales de agitación y aireación pueden tener lugar en soluciones que contengan 0,0098% NaCN (0,098 g/l).

**c) Temperatura.**

La velocidad de disolución de los metales en una solución de NaCN aumenta con el incremento de la temperatura, hasta 85°C arriba de esta temperatura; las pérdidas por descomposición del cianuro es un serio problema.

**d) pH y alcalinidad**

Para prevenir pérdidas excesivas de cianuro por hidrólisis, el proceso de cianuración se lleva a cabo con valores de pH superiores a 9.4. El efecto del pH en la disolución

de oro en valores mayores a 9,5 depende de los minerales que se encuentren como constituyentes de la mena, así como también del álcali empleado para su regulación. En algunos casos, la velocidad de disolución del oro puede disminuir con el incremento del pH, ya que se aumenta la velocidad de las reacciones que interfieren en el proceso. El valor óptimo de pH en el que se debe trabajar deberá ser determinado de acuerdo a las características de cada mineral en particular.

En el proceso de cianuración es muy importante considerar que, para la disolución del oro, se requiere tener en solución, el ion  $\text{CN}^-$ . Si se opera a un valor de pH menor que 10, el cianuro libre estará en mayor proporción como HCN, que es muy volátil a temperatura ambiente, y genera problemas de salud por inhalación, ya que este es un gas venenoso. En la práctica se debe trabajar con valores de pH superiores a 10.5 para evitar la formación de HCN y favorecer la presencia del ion  $\text{CN}^-$ .

**e) Área superficial y tamaño del oro.**

La velocidad de disolución del oro es proporcional a la superficie expuesta del oro, la misma que dependen del tamaño de la partícula mineral y del grado de liberación del metal precioso. En general, la velocidad de disolución aumenta con el menor tamaño de partícula (mayor liberación de oro).

Sin embargo, al decrecer el tamaño de la partícula, se incrementan también las reacciones de competencia de otros elementos, por tanto, se debe encontrar un compromiso entre el tamaño de la partícula, el porcentaje de extracción del oro y el consumo de cianuro.

**f) Efecto de la agitación.**

La disolución de oro está usualmente controlada por el transporte de masa y depende del espesor de la capa de difusión, por esto si se incrementa la agitación, aumenta la velocidad de disolución, hasta un máximo sobre el cual este efecto ya no tendrá mayores beneficios.

**g) Constituyentes de la mena o procedentes de otros procesos.**

Ciertos constituyentes de la mena o reactivos de operaciones anteriores, pueden ejercer un efecto positivo o negativo sobre las reacciones de cianuración. Así, los reactivos de flotación ejercen un efecto inhibitor sobre dichas reacciones.

Los compuestos minerales de la mena, donde se incluyen algunas especies de cobre, hierro, zinc, plomo, arsénico, antimonio, entre otros, consumen cianuro y oxígeno, por consiguiente, se requiere mayor concentración en solución para lograr tasas aceptables de extracción.

Las sustancias carbonáceas adsorben el oro disuelto, lo que disminuye la extracción del metal precioso y el material arcilloso genera problemas de recuperación si el oro está asociado directamente a las arcillas en tamaños similares al de ellas, como se ha señalado anteriormente.

### **2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.**

- a. Concentradora: Instalación donde se concentra o recupera minerales sulfurados, óxidos, etc. con valor económico.
- b. Conminución: Proceso a través del cual se produce una de reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración y/o molienda.
- c. Cabeza: Es el mineral proveniente de mina que se alimenta a una planta.
- d. Cancha: Espacio en el cual se acumula el mineral proveniente de mina.
- e. Chaqueta: Nombre de los recubrimientos internos del molino, fabricados de acero al cromo o manganeso.
- f. Densidad aparente: Este término relaciona el peso del mineral de diversos tamaños respecto a un volumen que ocupa.
- g. Granulometría: Término que se usa en el tamaño de partículas.
- h. Ley: Es el contenido de un elemento valioso en una unidad de peso de la roca obtenido en los laboratorios metalúrgicos.
- i. Incremento: Es una cantidad de material a tomar del universo o parte de éste, mediante un aparato de muestreo, con el propósito de determinar su calidad.
- j. Menas complejas: son aquellas que contienen cantidades aprovechables de más de un mineral valioso (Au - Cu - Ag - Pb).
- k. Menas nativas: el metal está presente en forma elemental.
- l. Menas oxidadas: el mineral valioso puede estar presente como óxido, sulfato, silicato, carbonato o alguna forma hidratada de los mismos (crisocola)
- m. Menas sulfuradas: contienen el metal en forma de sulfuro (Mo - Fe - CuS - Cu<sub>2</sub>S - pirita - etc.)
- n. Mineral: Sustancia inorgánica que se halla en la superficie o en las diversas capas de la corteza del globo, y principalmente aquella cuya explotación ofrece interés. Parte útil de

una explotación minera.

- o. Mineralogía: Ciencia que se ocupa de la descripción y análisis de los minerales, sus propiedades físicas y químicas, forma, composición, origen, yacimientos, asimismo las leyes que determinan dichas características.
- p. Molino de bolas: Cilindro de acero, provisto de carga moledora, en este caso bolas de acero. Su función es la de triturar el mineral hasta un tamaño óptimo para el siguiente proceso.
- q. Molienda: término empleado muy frecuentemente para determinar el conjunto de técnicas relativas a la reducción volumétrica de cuerpos sólidos.
- r. Muestreo: Se denomina así a la obtención de una posible fracción pequeña, lo más representativa posible de un total de mineral que interesa analizar.
- s. Optimización: Es el proceso de modificación de un sistema para mejorar su eficiencia o también el uso de los recursos disponibles.
- t. pH: Es una medida de acidez o basicidad de la pulpa mineral. El pH depende de la naturaleza del mineral, de las sustancias disueltas en el agua, de la composición y cantidad de reactivos.
- u. Planta: Instalación industrial. Figura que forman sobre el terreno los cimientos de un edificio o la sección horizontal de las paredes en cada uno de los diferentes pisos.
- v. Peso neto seco: Es el peso del mineral de cabeza, concentrado y relave, sin humedad.
- w. Pirita: ( $\text{Fe}_2\text{S}$ ) sulfuro de mineral de hierro muy común, de color amarillo y brillante.
- x. Proceso: Conjunto de las fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial.
- y. Razón de concentración: Es la relación del peso de la alimentación al peso de concentrado.
- z. Razón de Enriquecimiento: Es la relación del grado del concentrado al grado de las cabezas y además está relacionada con la eficiencia del proceso.
- aa. Recuperación en Peso: Razón del peso del concentrado al peso de alimentación.
- bb. Recuperación Metalúrgica: Se refiere al porcentaje de metal total contenido en la mena que

se recupera en el concentrado

- cc. Work Index: Es el trabajo requerido para producir un mineral de tamaño óptimo expresado en kw-Hr/tc.
- dd. Cianuración. Un método de extracción de oro o plata expuestos de mena terrosa o molida disolviéndola en una solución débil de cianuro de sodio o calcio. Puede ser llevada a cabo en tanques dentro del molino o en pilas de mena en el exterior.
- ee. Cianuro disociable en ácido débil o cianuro WAD (*Weak Acid Dissociable*): es un término analítico utilizado para designar a los compuestos de cianuro que se disocian bajo reflujo con un ácido débil, normalmente a pH 4,5.
- ff. Cianuro disociable en ácido fuerte o cianuro SAD (*Strong Acid Dissociable*): es otro término analítico utilizado para designar a compuestos cianurados que resisten el ataque de un ácido débil, pero se disocian en presencia de un ácido fuerte a bajo pH (en torno a 2).
- gg. Cianuro Total (TCN): se denomina así a todos los compuestos de cianuro (disueltos o no) existentes en una solución acuosa.
- hh. Cianuro. Es un término general que se aplica a un grupo de sustancias químicas que contienen carbono y nitrógeno. Los compuestos de cianuro contienen sustancias químicas (antropogénicas) que se encuentran presentes en la naturaleza o que han sido producidas por el hombre. Las principales formas de cianuro producidas por el hombre son el cianuro de hidrógeno gaseoso y el cianuro sólido de sodio y de potasio. Debido a sus propiedades únicas, el cianuro se utiliza en la fabricación de partes metálicas y en numerosos productos orgánicos comunes como los plásticos, las telas sintéticas, los fertilizantes, los herbicidas, los tintes y los productos farmacéuticos.
- ii. Compuestos complejos de cianuro: son compuestos iónicos que se disocian directamente en el agua liberando un catión y un anión que contiene al ión cianuro. El anión, denominado

“complejo”, puede seguir disociándose, produciendo en última instancia un catión y varios aniones cianuro (por ejemplo, el  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ ).

jj. Compuestos derivados del cianuro (“*cyanide related compounds*”): son compuestos esencialmente no tóxicos que proceden de las transformaciones de compuestos cianurados. Los más importantes son el tiocianato ( $\text{SCN}^-$ ), el cianato ( $\text{CNO}^-$ ), los iones nitrato ( $\text{NO}_3^{2-}$ ) y nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

kk. Compuestos simples de cianuro: son compuestos iónicos que se disocian directamente en el agua liberando un catión y un ión cianuro. Son las sales que provienen de reacciones ácido-base como, por ejemplo, el cianuro de sodio ( $\text{NaCN}$ ).

## **2.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.**

### **2.4.1. Hipótesis General.**

Realizando un diagnóstico del circuito molienda y cianuración, nos permitirá fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.

### **2.4.2. Hipótesis Específicas.**

- En el circuito de molienda se evalúa la densidad de pulpa optima, con ello se establecerá los parámetros de control de la carga circulante.
- En el circuito de molienda de los minerales se evalúa la liberación, con ello se establecerá los parámetros de control del %-200m.
- La dosificación y control de la fuerza de cianuro en el circuito de cianuración, nos permitirá establecer los parámetros de control de la extracción de oro.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. DISEÑO METODOLÓGICO.**

##### **3.1.1. Tipo de Investigación.**

De acuerdo a su naturaleza: correlacional.

De acuerdo al propósito o utilización: Investigación aplicada.

Se realiza la investigación correlacional y aplicada, en base a los parámetros y variables que afectan la sección molienda y cianuración de acuerdo a los objetivos de la investigación, para posteriormente aplicar en el proceso de control.

##### **3.1.2. Enfoque de la Investigación.**

Es una investigación cuantitativa porque se cuantificará la carga circulante, densidad, %-200m, fuerza de cianuro de sodio, calidad y granulometría del mineral al final de cada etapa molienda y cianuración.

De acuerdo su característica: Análisis de causa - efecto.

De acuerdo su proceso: Probatorio.

De acuerdo a sus bondades: Generalización de resultados.

## **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.**

### **3.2.1. Población.**

La población está representada por todo el mineral que forman parte del proceso de la Minera Vicus S.A.C.

### **3.2.2. Muestra.**

La muestra para el trabajo de investigación se obtendrá al inicio y al término de cada operación del circuito de molienda y cianuración en base a esto se realiza la evaluación y las mejoras necesarias para el proceso en la Mina Vicus S.A.C.

### 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES.

Tabla 3. Operacionalización de variables

Variables	Concepto	Dimensión	Indicadores
Variable Independiente			
Diagnóstico del circuito de molienda y cianuración	Es el análisis que se realiza a los factores que intervienen en el circuito de molienda y cianuración para determinar los controles de operación.	Medida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad de pulpa.</li> <li>• Molienda</li> <li>• Fuerza de cianuro.</li> </ul>
Variables Dependiente			
Parámetro de control	Son los márgenes mínimos y máximos establecidos de los factores controlables de operación	Control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga circulante.</li> <li>• %-200m.</li> <li>• Recuperación.</li> </ul>
Variables Controlados			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño de mineral</li> <li>• Abertura de tamiz.</li> <li>• Carga de bolas.</li> <li>• Tamaño de bolas.</li> </ul>

### **3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.4.1 Técnicas a Emplear.**

**a. Observación Sistemática Directa.**

Se empleará esta técnica para observar el proceso de investigación en el momento que se está desarrollando el proceso.

**b. Observación Sistemática Indirecta.**

Mediante esta técnica se podrá analizar y estudiar los diversos documentos que contiene información sobre el tema de investigación a desarrollar.

**c. Observación experimental.**

Con esta técnica será posible conocer la forma como se desarrollan las actividades en el desarrollo para luego extraer datos con el fin de procesar posteriormente con mayor eficiencia.

**d. Otras Técnicas.**

Técnica de cuestionario.

#### **3.4.2 Descripción de los Instrumentos.**

- Ficha de observación.
- Lista de cotejo.
- Escalas libreta de notas.

- Filmadora, cámara fotográfica y grabadora.

### **3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.**

Se usará el análisis estadístico, usando programas de cálculo como Excel, Minitab 17, etc., para luego mostrar la información, mediante tablas, registros, figuras, promedios y otros.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. DATOS RECOPIADOS PARA LA INVESTIGACIÓN.

- a. Los datos recopilados en planta son durante un periodo de 25 días en los que se de acuerdo los objetivos planteado como: densidad de pulpa en descarga del molino, alimentación, rebose, arenas del hidrociclón y la fuerza del cianuro, como datos independientes.

*Tabla 4. Datos obtenidos de planta densidades y fuerza de cianuro de sodio.*

N°	Overflow(g/L)	Underflow(g/L)	Aliment(g/L)	Discharged(g/L)	F <sub>NaCN</sub> (g/L)
1.	1313	1516	1402	1752	1.23
2.	1320	1526	1412	1765	1.31
3.	1321	1524	1389	1734	1.30
4.	1318	1514	1401	1762	1.28
5.	1304	1527	1405	1745	1.27
6.	1312	1521	1409	1762	1.31
7.	1320	1523	1406	1732	1.28
8.	1309	1521	1407	1746	1.32
9.	1321	1524	1399	1762	1.29
10.	1308	1521	1397	1762	1.25
11.	1318	1523	1401	1756	1.27
12.	1314	1521	1389	1756	1.25
13.	1315	1524	1397	1764	1.26
14.	1318	1523	1402	1752	1.28
15.	1308	1529	1401	1753	1.31
16.	1314	1532	1396	1756	1.29
17.	1316	1561	1395	1757	1.31
18.	1319	1534	1389	1754	1.28
19.	1317	1535	1401	1762	1.27
20.	1316	1525	1403	1753	1.29
21.	1320	1523	1405	1748	1.26
22.	1321	1532	1406	1762	1.27
23.	1317	1526	1398	1752	1.29
24.	1315	1528	1389	1761	1.31
25.	1321	1562	1404	1759	1.30

- b. Los datos recopilados en planta son durante un periodo de 25 días en los que se de acuerdo los objetivos planteado como: carga circulante, %-200m, recuperación de oro como datos dependientes.

*Tabla 5. Datos obtenidos de planta carga circulante, %-200m y recuperación de oro*

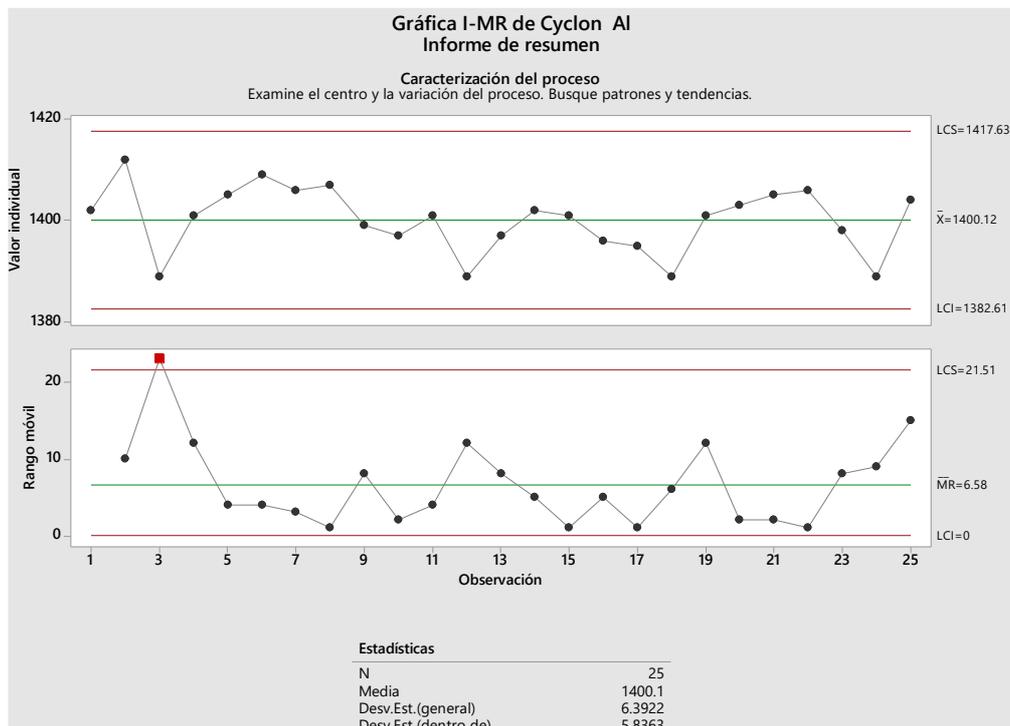
N°	cc	%-200m	Rec. Au
1.	1.29	75.72	89.57
2.	1.33	74.69	90.02
3.	0.82	74.45	89.47
4.	1.19	75.47	90.50
5.	1.44	75.00	89.70
6.	1.45	74.36	90.01
7.	1.20	74.69	90.11
8.	1.45	74.76	89.54
9.	1.02	74.77	89.79
10.	1.21	74.03	89.68
11.	1.12	75.16	89.78
12.	0.94	71.97	90.12
13.	1.07	77.46	89.45
14.	1.14	73.90	89.76
15.	1.25	73.38	90.21
16.	1.02	74.20	89.89
17.	0.84	75.95	90.05
18.	0.81	75.55	89.84
19.	1.06	74.13	90.04
20.	1.18	76.27	89.64
21.	1.18	76.25	89.99
22.	1.12	74.45	89.67

## 4.2. RESULTADOS VARIABLE INDEPENDIENTE.

### 4.2.1. Primera variable independiente, densidad de pulpa.

#### a. Densidad alimentación al hidrociclón.

Figura 1. Control de densidad de pulpa alimento al hidrociclón

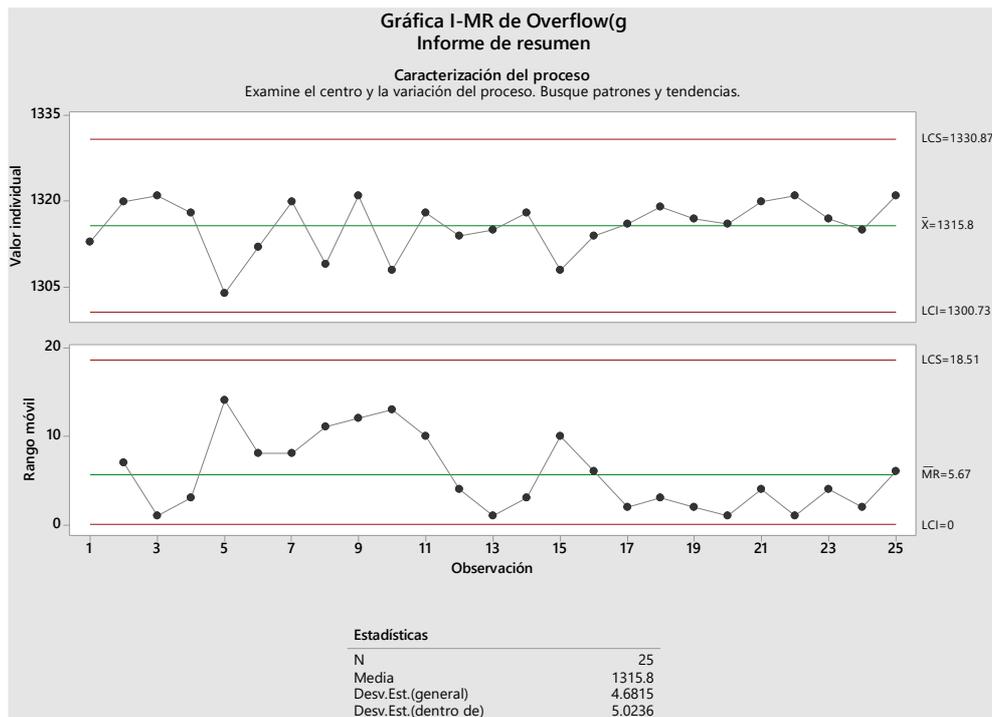


Del gráfico de control los datos provienen de una distribución normal tiene una media igual a 1400.12 g/L, con control de superior de 1417.63g/L, con un control inferior de 1382.61g/L y una desviación estándar igual a 5.8363. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 6.58 límite superior de 21.5. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que uno está fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 1 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 0.000674763 si los datos

proviene de la distribución, se puede declarar que el proceso está fuera de control con un nivel de confianza del 95%.

**b. Densidad rebose del hidrociclón.**

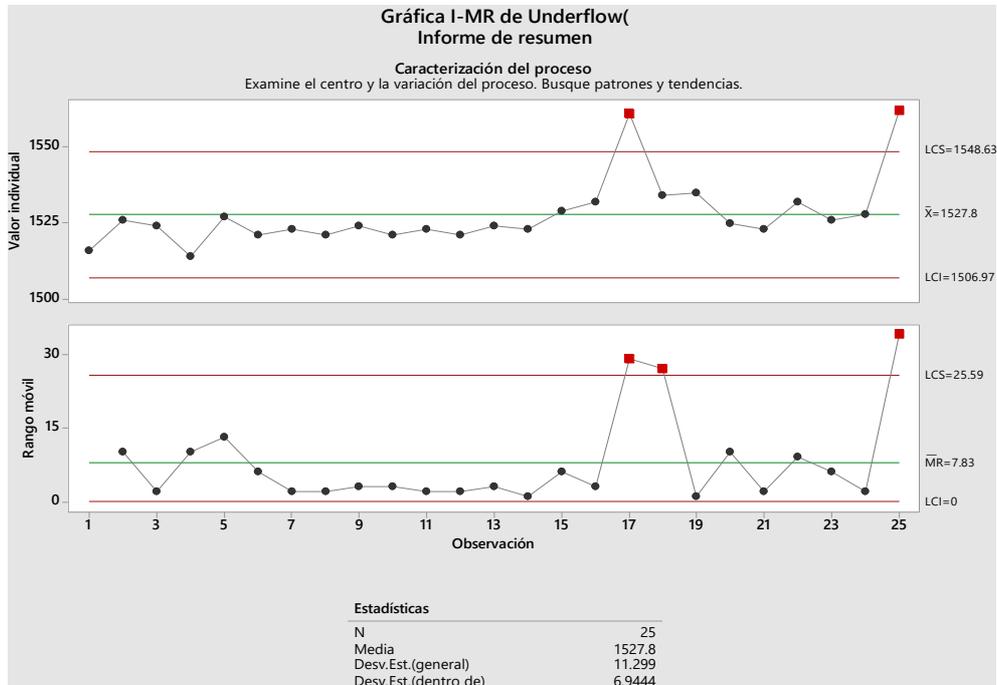
*Figura 2. Control de densidad de pulpa en el rebose del hidrociclón*



Del gráfico de control los datos provienen de una distribución normal tiene una media igual a 1315.8 g/L, con control de superior de 1330.87g/L, con un control inferior de 1300.73g/L y una desviación estándar igual a 5.0236. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 567 límite superior de 1851. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que uno está fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 0 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 1.0 si los datos provienen de la distribución, no se puede rechazar la hipótesis de que el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza del 95%.

c. Densidad arena del hidrociclón.

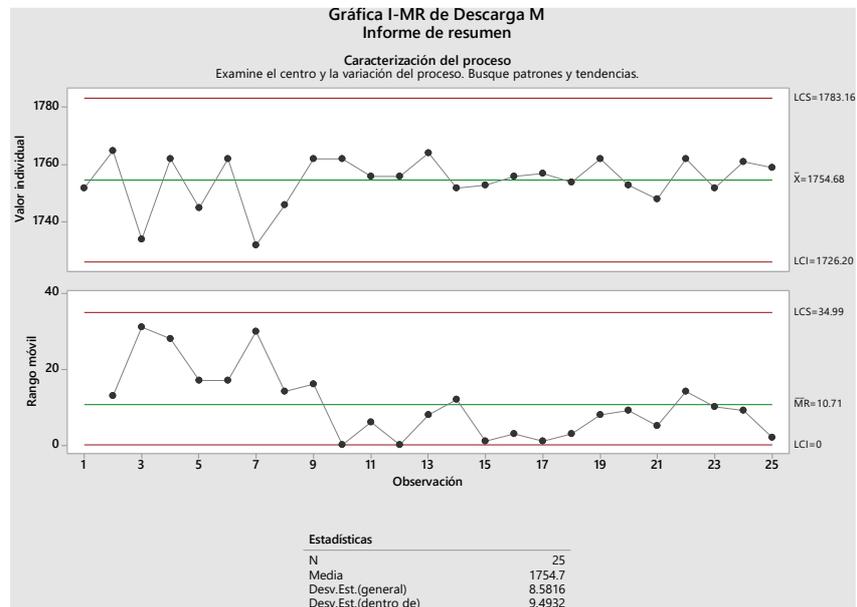
Figura 3. Control de densidad de pulpa arenas del hidrociclón



En la figura de control los datos provienen de una distribución normal tiene una media igual a 1527.8 g/L, con control de superior de 1548.63g/L, con un control inferior de 1506.97g/L y una desviación estándar igual a 6.9444. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 7.83 límite superior de 25.59. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 2 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que 3 están fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 2 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 0.0000002186 si los datos provienen de la distribución, se puede declarar que el proceso está fuera de control con un nivel de confianza del 95%.

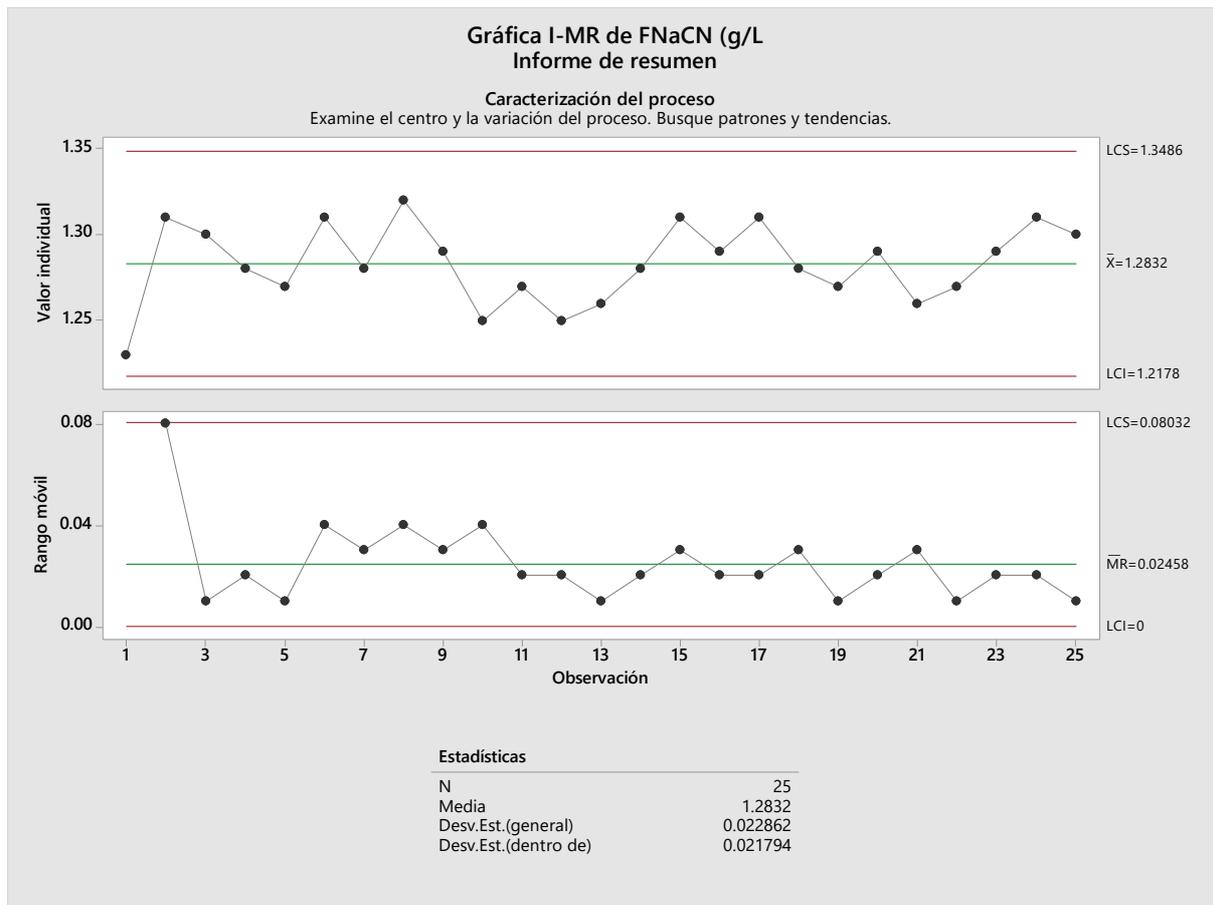
#### 4.2.2. Segunda variable independiente, densidad de pulpa en la molienda.

Figura 4. Control de densidad de pulpa descarga del molino



En la figura de control los datos provienen de una distribución normal tiene una densidad media igual a 1754.68 g/L, con control de superior de 1783.16g/L, con un control inferior de 1726.2g/L y una desviación estándar igual a 9.4932. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 10.71 límite superior de 34.99. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que 0 están fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 0 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 1.0 si los datos provienen de la distribución, no se puede rechazar la hipótesis de que el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza del 95%.

### 4.2.3. Tercera variable independiente, fuerza del cianuro de sodio.

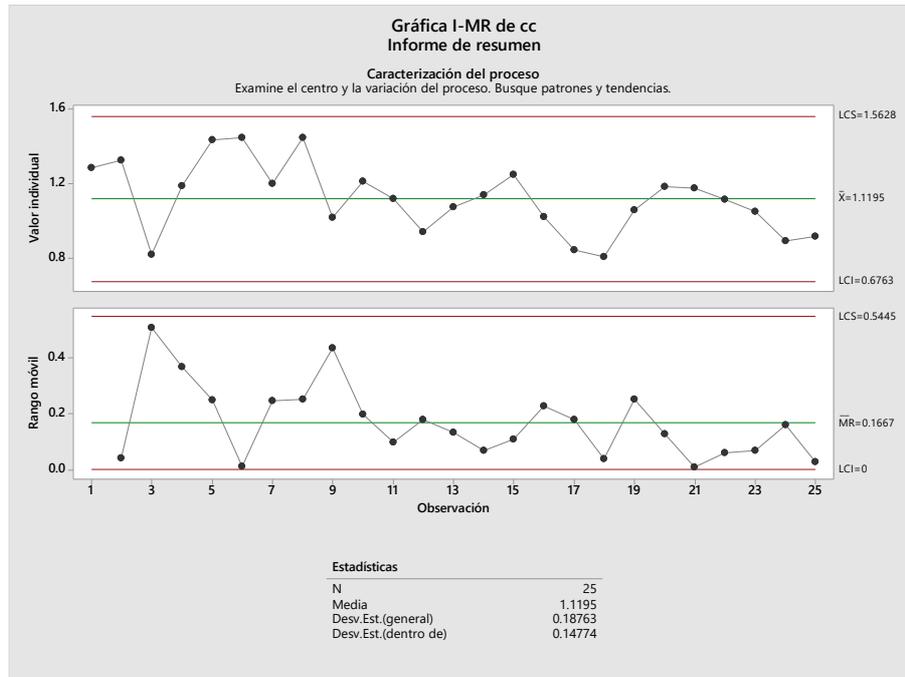


En la figura de control los datos provienen de una distribución normal tiene una fuerza de cianuro de sodio promedio a 1.2832 g/L, con control de superior de 1.3486g/L, con un control inferior de 1.2178g/L y una desviación estándar igual a 0.021794. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 0.02458 límite superior de 0.08032. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que 0 están fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 0 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 1.0 si los datos provienen de la distribución, no se puede rechazar la hipótesis de que el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza del 95%.

### 4.3. RESULTADOS VARIABLE DEPENDIENTE.

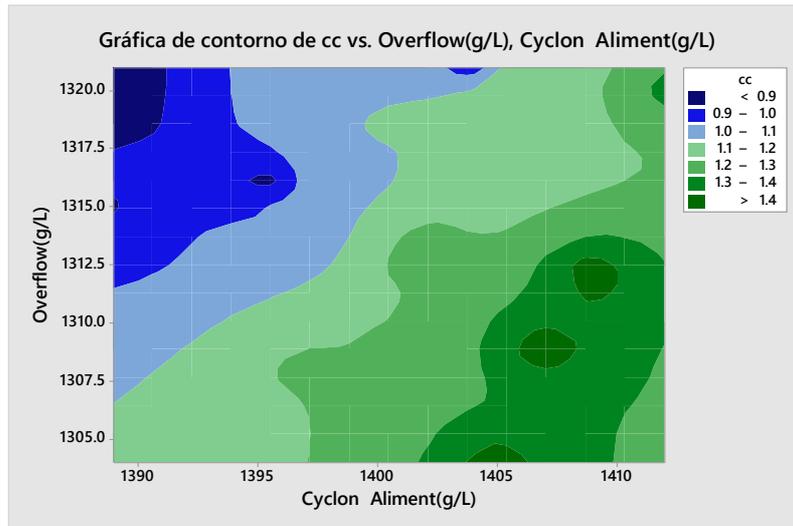
#### 4.3.1. Primera variable dependiente carga circulante.

Figura 5. Control de carga circulante



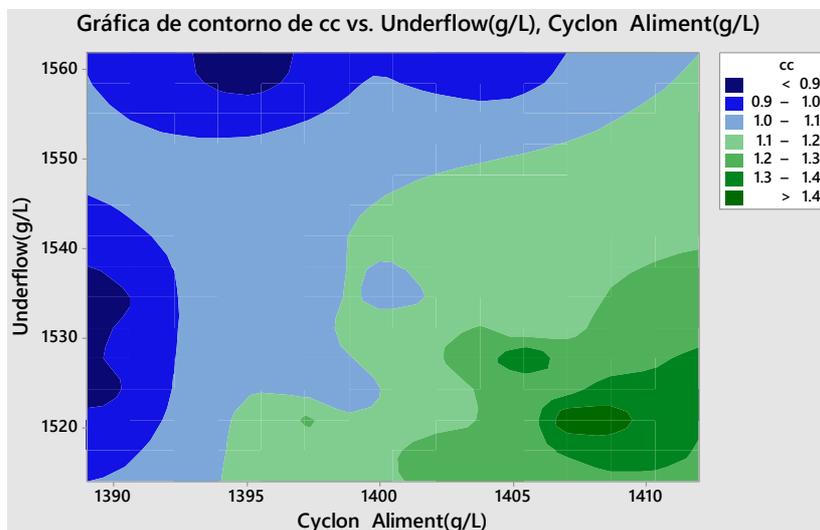
En la figura de control los datos provienen de una distribución normal tiene una media igual a 1.1195, con control de superior de 1.5628, con un control inferior de 0.6763 y una desviación estándar igual a 0.14774. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 0.1667 límite superior de 0.5445. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que 0 están fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 0 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, si 1.0 de los datos provienen de la distribución, no se puede rechazar la hipótesis de que el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza del 95%.

Figura 6. Carga circulante en función a la densidad de alimentación y rebose del hidrociclón



De acuerdo de la gráfica la menor carga circulante es cuando la densidad de pulpa alimentada al hidrociclón es de 1388 g/L a 1391 g/L y la densidad de rebose esta de 1317.5 g/L a 1321 g/L la carga circulante es menor que 0.9, mientras que a una densidad de pulpa 1388 g/L a 1397.5 g/L en el alimento y en el rebose de 1311.5 g/L a 1321 g/L la carga circulante esta entre 0.9 a 1.0, a medida que aumenta la densidad de pulpa en la alimentación mayor que 1397.5 g/L la carga circulante aumenta.

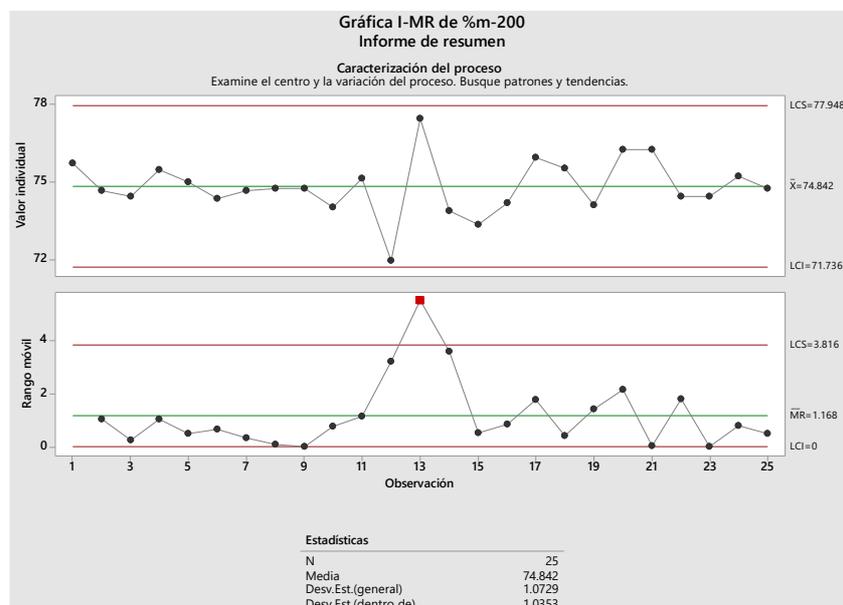
Figura 7. Carga circulante en función a la densidad de alimentación y arena del hidrociclón



De acuerdo de la gráfica la menor carga circulante, es cuando la densidad de pulpa alimentada al hidrociclón es de 1389 g/L a 1390 g/L y la densidad de las arenas esta de 1521 g/L a 1539g/L la carga circulante es menor que 0.9, mientras que a una densidad de pulpa 1389 g/L a 1393g/L en el alimento y en el arenas de 1510 g/L a 1546 g/L la carga circulante esta entre 0.9 a 1.0, por otra parte cuando la densidad de alimentación esta entre 1393.5g/L a 1396.5 g/L carga circulante es menor que 0.9 y a una densidad de pulpa de alimentación esta entre 1389 g/L a 1407 g/L con una densidad de arenas entre 1559 g/L a 1561 g/L la carga circulante esta entre 0.1 a 1.00. Si la densidad de pulpa en la alimentación es de 1393 g/L a 1420 g/L con una densidad de pula de las arenas de 1510 g/L a 1550 g/L la carga circulante es de mayor que 1.00 aumenta progresivamente.

#### 4.3.2. Segunda variable dependiente %-200m.

Figura 8. Control de %-200m

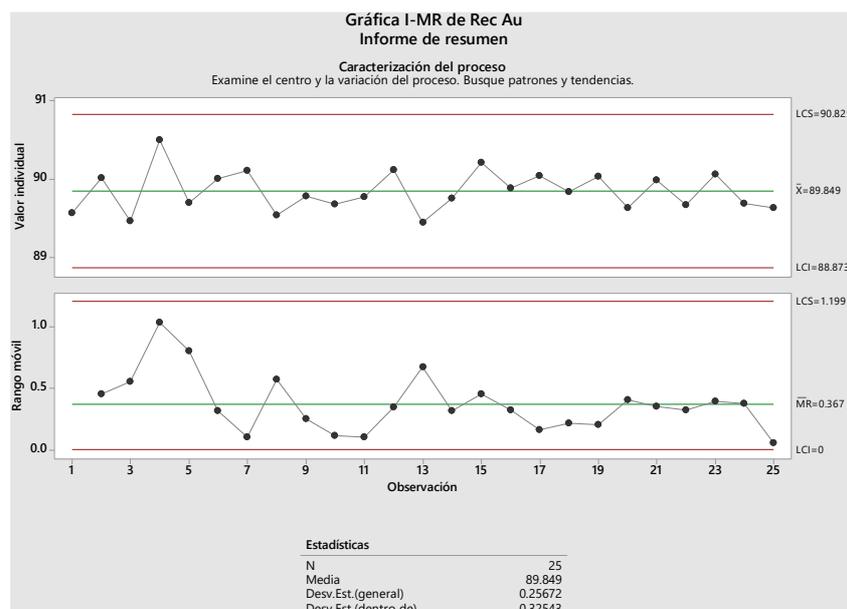


En la figura de control los datos provienen de una distribución normal se tiene pasante a malla 200m un promedio de igual a 74.842%, con control de superior de 77.948%, con un control

inferior de 71.736% y una desviación estándar igual a 1.0353. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 1.168 límite superior de 3.816. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que 1 están fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que aparezcan 1 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 0.000674763 si los datos provienen de la distribución, se puede declarar que el proceso está fuera de control con un nivel de confianza del 95%.

#### 4.3.3. Tercera variable dependiente recuperación de extracción de oro.

Figura 9. Control de recuperación de oro



En la figura de control los datos provienen de una distribución normal se tiene una recuperación media igual a 89.849%, con control de superior de 90.825%, con un control inferior de 88.873% y una desviación estándar igual a 0.32543. En el segundo grafico rango móvil promedio es de 0.367 límite superior de 1.199. Estos parámetros fueron estimados a partir de los 25 puntos no excluidos mostrados en el gráfico, 0 se encuentran fuera de los límites de control en el primer gráfico, mientras que 0 están fuera de límites en la segunda. Puesto que la probabilidad de que

aparezcan 0 ó más puntos fuera de límites, sólo por azar, es 1.0 si los datos provienen de la distribución, no se puede rechazar la hipótesis de que el proceso se encuentra en estado de control estadístico con un nivel de confianza del 95%.

## CAPITULO V

### DISCUSIÓN CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. DISCUSIÓN.

El control de los procesos del circuito de molienda y cianuración de acuerdo los objetivos planteados las densidades de pulpa tiene un promedio de 1755 g/L en la descarga del mineral, 1400 g/L alimentación al hidrociclón, 1528 g/L para las arenas y 1316 g/L del rebose del hidrociclón; la fuerza del cianuro es de 1.28 g/L. Mientras que la carga circulante tiene en promedio de 1.12, el porcentaje pasante a la malla 200(-200m) es de 74.84%, la recuperación en promedio es de 89.85%.

Respecto al primer objetivo los límites de control de las densidades de pulpa en la alimentación rebose y descarga del hidrociclón se tiene.

*Tabla 6. Control de densidad y carga circulante*

	Variables	Límite superior	Promedio	Límite inferior	Desviación estándar
	Densidad alimentación (g/L)	1417.63	1400.12	1382.61	5.8363
Causa	Densidad rebose (g/L)	1330.87	1315.80	1300.73	5.0236
	Densidad arena (g/L)	1548.63	1527.80	1506.97	6.9444
Efecto	Carga circulante	1.5628	1.1195	0.6763	0.1477

Para obtener un mejor control de las operaciones se debe operar con una densidad de pulpa alimentada al hidrociclón es de 1388 g/L a 1391 g/L y la densidad de rebose esta de 1317.5 g/L

a 1321 g/L para tener una carga circulante es menor que 0.9. Por otra parte, con una densidad de pulpa alimentada al hidrociclón es de 1389 g/L a 1390 g/L y la densidad de las arenas de 1521 g/L a 1539g/L para tener una carga circulante es menor que 0.9.

Con respecto a la segunda variable de molienda con una densidad de molienda y la liberación controlado pasante a la malla 200m. Se tiene una densidad de pulpa que descarga el molino medio de 1754.68 g/L, con control de superior de 1783.16g/L, con un control inferior de 1726.2g/L y una desviación estándar igual a 9.4932. Produciendo una liberación pasante a malla 200m un promedio de igual a 74.842%, con control de superior de 77.948%, con un control inferior de 71.736% y una desviación estándar igual a 1.0353.

Para el tercer objetivo con una fuerza de cianuro de sodio promedio a 1.2832 g/L, con control de superior de 1.3486g/L, con un control inferior de 1.2178g/L y una desviación estándar igual a 0.021794. Produciendo una recuperación media igual a 89.849%, con control de superior de 90.825%, con un control inferior de 88.873% y una desviación estándar igual a 0.32543.

En su investigación (Polomino, 2005) con una liberación pasante el 75% -200m se recuperó el 90.34% con un consumo de cianuro de sodio 7.7 kg/TN de mineral, mientras que con un pasante el 100% -200m se recuperó el 90.90% con un consumo de cianuro de sodio 7.72 kg/TN de mineral.

Por otra parte (Gomez & Morales, 2012) con una liberación pasante el 74% -270 mallas con un tiempo de lixiviación de 72 horas. Con una concentración de NaCN (0.2% - 0.3%), Nitrato de Plomo (170g/TM - 190g/TM) y el pH de la solución (10 - 11), con una Ley de cabeza (Au) = 6.06g/TM, su extracción de Au fue de 97.60%.

## 5.2. CONCLUSIONES.

En el estudio realizado sobre, Diagnóstico del circuito de molienda y cianuración para fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera VICUS S.A.C., se llegaron a las siguientes conclusiones:

El control de operación para una carga circulante menor a 0.9 se obtuvieron con una densidad de pulpa alimentada al hidrociclón de 1388 g/L a 1391 g/L y la densidad de rebose esta de 1317.5 g/L a 1321 g/L y con una densidad de pulpa alimentada al hidrociclón es de 1389 g/L a 1390 g/L y la densidad de las arenas de 1521 g/L a 1539g/L, con una densidad mayor de alimentación aumentara la carga circulante. para un control de las operaciones se debe tener un control de densidad de pulpa de alimentación al hidrociclón entre 1382.61 g/L a 1417.63 g/L con un promedio de 1400.12 g/L con una desviación estándar de 5.8363, en el rebose 1300.73 g/L a 1330.87 g/L con un promedio de 1315.80 g/L con una desviación estándar de 5.0236, mientras que para las arenas entre 1506.97 g/L a 1548.63 g/L con un promedio de 1527.80 g/L con una desviación estándar de 6.944 la densidad de las arenas tiende a salir de la línea de control para ello se debe tener un control adecuado, con un control de la carga circulante de 0.6763 g/L a 1.5628 g/L con un promedio de 1.1195 g/L con una desviación estándar de 0.1477. Con un control de la densidad de pulpa en la molienda entre 1726.2 g/L a 1783.16 g/L con un promedio de 1754.68 g/L con una desviación estándar de 9.4932, se obtiene una liberación pasante a malla 200m de 71.736% g/L a 77.948% con un promedio de 74.842% con una desviación estándar de 1.0353, pero se debe tener un control estricto tiene salir de salir e los parámetros de control.

El control de la recuperación de oro se tiene con un control de fuerza de cianuro de 1.2178g/L

a 1.3486g/L con un promedio de 1.2832 g/L con una desviación estándar de 0.021794, se obtiene un control de la recuperación en la extracción de oro 88.873% a 90.825% con un promedio de 89.849 con una desviación estándar de 0.32543.

Con estos resultados se contrasta los objetivos planteados en estudio para un control de las operaciones en la minera VICUS SAC.

### **5.3. RECOMENDACIONES.**

Dentro del contexto de estudio realizado se puede recomendar que los controles de los parámetros para una adecuada operación deben estar dentro los rangos establecidos de lo contrario no se tendrá un adecuado resultado.

Para mejorar la recuperación del oro se debe realizar un estudio microscópico para ver el resto de oro no recuperable como se encuentra.

Realizar una prueba de lixiviación con mayor liberación para ver en que malla tiene una mayor recuperación para realizar un estudio económico.

Realizar un control de la carga de bola y carga de mineral para establecer los parámetros de control de la liberación óptima y relacionar con ello la recuperación.

El control de la adición de carbón activado en la recuperación de oro con diferentes dosificaciones y granulometría para evitar posibles el desplazamiento de oro en solución al relave.

## CAPITULO VI

### FUENTE DE INFORMACION

#### 6.1. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.

Alvarez M. (1996). *Evaluación de circuitos industriales de molienda y clasificación*.

Basurto, C. (2011). *Modelo “Cebaco” aplicado al control de procesos en el circuito de Molienda-Clasificación en una planta concentradora de minerales mediante el software LabVIEW*. Lima.

Chavez, P. (2014). *Determinación de la dosificación óptima de cianuro para lograr la mayor recuperación de oro y plata en el proceso de lixiviación intensiva de concentrados*.

Obtenido de Repositorio Institucional Digital UNSA:  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3954/IQchflpo040.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chica, L., Ospina, M., & Bustamante, O. (2004). *Optimización de circuitos de molienda húmeda de suspensiones poliminerale: retos en el análisis de variables, simulación y control de proceso*.

Drzymala, J. (2007). *Mineral Processing*. Wroclaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

Fajardo, J., Burbano, D., Burbano, E., Apraz, N., & Moreno, N. (2010). *Estudio de métodos químicos de remoción de cianuro presente en residuos de cianuración provenientes del proceso de extracción de oro de veta en el departamento de Nariño*. Obtenido de Sistema de Información Científica Redalyc Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal:  
<http://www.redalyc.org/html/3217/321727233002/>

- Gomez, J., & Morales, M. (2012). *Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales de Au - Ag en la compañía minera Ares Castilla- Arequipa*. Cusco. Recuperado el 09 de 09 de 2017, de <http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/UNSAAC/875/253T20120070.pdf?sequence=1>
- Gupta C. Mukherjee T. (1990). *Hidrometalurgia en Proceso de Extraacción*. Bostom: CRC Press.
- Gupta, C., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. New York: CRC PRESS.
- Havlík, T. (2008). *Hydrometallurgy*. Washington: CRC Press.
- Llorente, E. (1991). *Minería química*. Madrid: Instituto tecnológico geominero.
- Mineral Processing Technology*. (s.f.).
- Misari, F. (1993). *Metalurgia del Oro* . Lima: CEPECT.
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del oro*. Lima: San Marcos.
- Pino, J. (2014). *Estudio de la cianuración en tanques de la minera antapite*. Arequipa: UNSA. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2720/IMPimaj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Polomino, N. (2005). *Optimización de los procesos y operaciones metalúrgicos en la Compañía Caraveli S.A.C*. Lima.
- Reyes, I. (1997). *Metalurgia del Oro y Medio Ambiente*. Trujillo: UNT.
- Sepulvera, J., & Castillo, M. (1998). *Eficiencia de caracterización en un Harnero piloto*. Lima.
- Varga, J. (2016). *Determinación de la mejor práctica industrial en el tratamiento de aguas*. Obtenido de Repositorio Institucional UPB: <https://repository.upb.edu.co/.../T.G.%20Jorge%20Enrique%20Vargas%20Ospina>.

Vargas, J. (1990). *Metalurgia del Oro y Plata*. Lima: San Marcos.

Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology*. Queensland: Elsevier  
Science & Technology Books.

# ANEXO

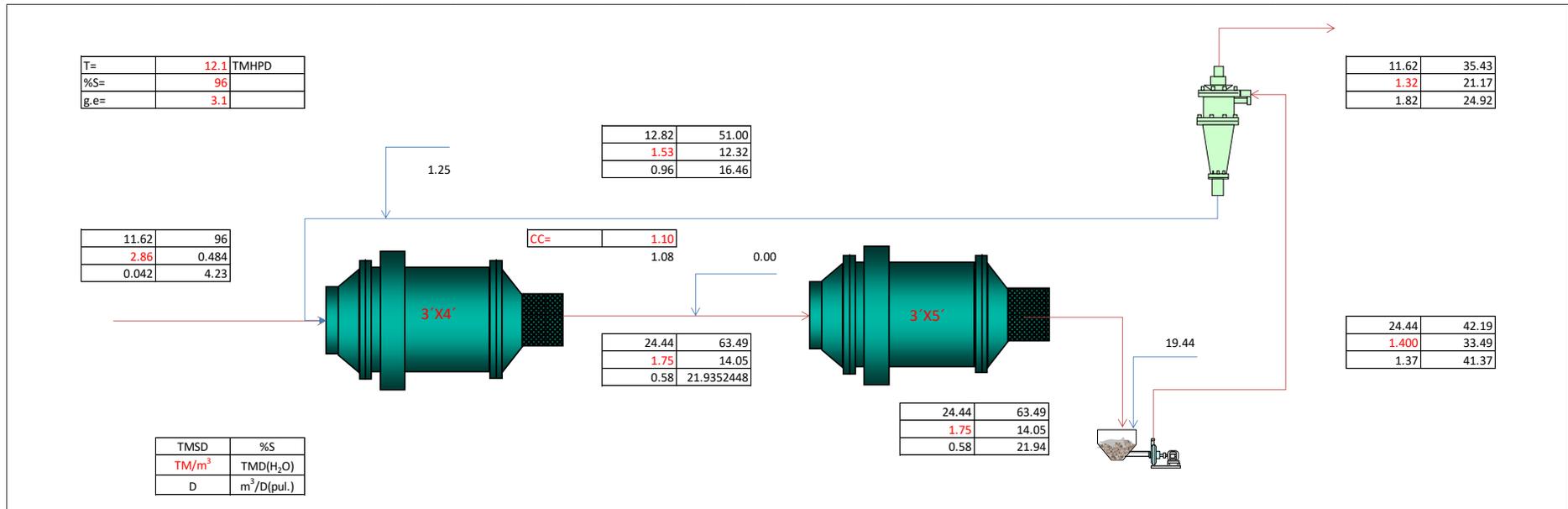
Anexo 1. Matriz Consistencia General

TITULO	PROBLEMA GENERAL	OBJETVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES INDEPENDIENTE	INDICADORES
<p style="text-align: center;">DIAGNOSTICO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CIANURACIÓN, PARA FIJAR LOS PARAMETROS DE CONTROL DE LAS OPERACIONES DE LA MINERA</p>	<p>¿En qué medida el diagnóstico del circuito molienda y cianuración, nos permitirá fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.?</p>	<p>Diagnosticar el circuito de molienda y cianuración, para establecer los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.</p>	<p>Realizando un diagnóstico del circuito molienda y cianuración, nos permitirá fijar los parámetros de control de las operaciones de la minera Vicus S.A.C.</p>	<p>Evaluación del circuito de molienda y cianuración</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad de pulpa.</li> <li>• Molienda</li> <li>• Fuerza de cianuro.</li> </ul>

Anexo 2. Matriz Consistencia Especifico

TITULO	PROBLEMA ESPECIFICO	OBJETVO ESPECIFICO	HIPOTESIS ESPECIFICO	VARIABLES DEPENDIENTE	INDICADORES
<p>DIAGNÓSTICO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CIANURACIÓN, PARA FIJAR LOS PARAMETROS DE CONTROL DE LAS OPERACIONES DE LA MINERA VICUS S.A.C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿En qué manera la densidad de pulpa optima, nos permitirá establecer los parámetros de control de la carga circulante?</li> <li>• ¿En qué medida la molienda de los minerales, nos permitirá establecer los parámetros de control del punto de corte D50?</li> <li>• ¿En qué medida la fuerza de cianuro, nos permitirá establecer los parámetros de control de la extracción de oro?</li> <li>• ¿En qué medida la dosificación de carbón activado, nos permitirá establecer los parámetros de control de la recuperación de oro?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la densidad de pulpa optima, para establecer los parámetros de control de la carga circulante.</li> <li>• Evaluar el circuito de molienda de los minerales, para establecer los parámetros de control del punto de corte D50.</li> <li>• Evaluar la fuerza de cianuro, para establecer los parámetros de control de la extracción de oro.</li> <li>• Evaluar la dosificación de carbón activado, para establecer los parámetros de control de la recuperación de oro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En el circuito de molienda se evalúa la densidad de pulpa optima, con ello se establecerá los parámetros de control de la carga circulante.</li> <li>• En el circuito de molienda de los minerales se evalúa la liberación, con ello se establecerá los parámetros de control del punto de corte D50.</li> <li>• La dosificación y control de la fuerza de cianuro en el circuito de cianuración, nos permitirá establecer los parámetros de control de la extracción de oro.</li> <li>• Con una dosificación de carbón activado adecuado en el los tanques carboneros, nos permitirá establecer los parámetros de control de la recuperación de oro.</li> </ul>	<p>Parámetro de control</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga circulante.</li> <li>• Punto de corte D50.</li> <li>• Extracción. Recuperación.</li> </ul>

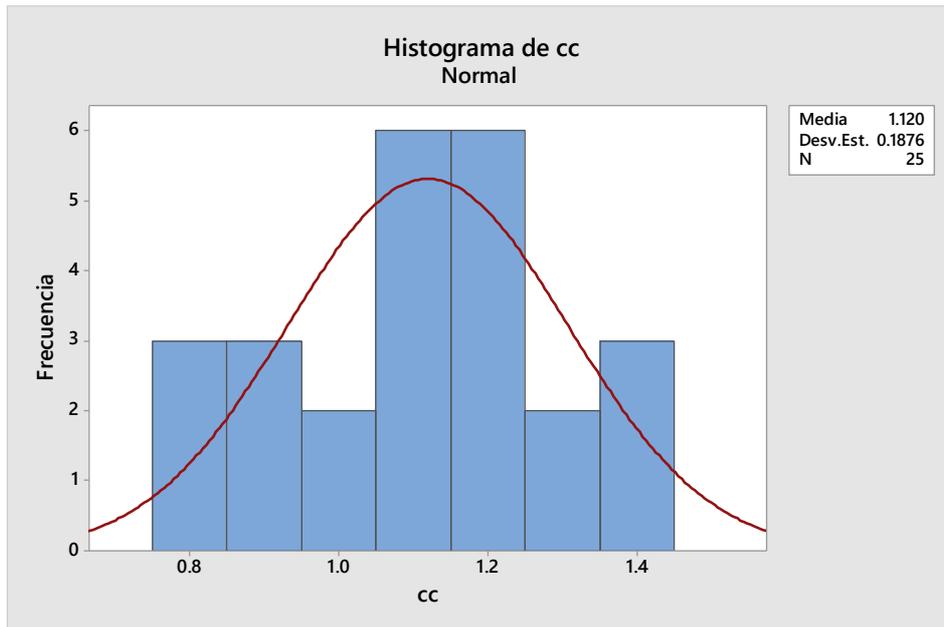
### Anexo 3. Balance de carga en circuito de molienda



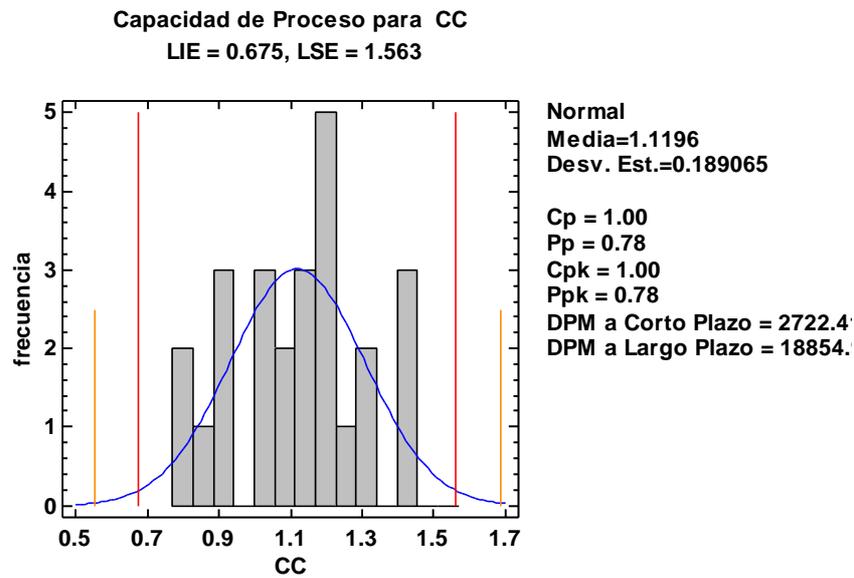
Anexo 4. Datos recopilados de proceso de molienda y cianuración

	Overflow	Underflow	yclon	Alime	Discharged	Lab Mol	Lab Over	% SOLIDO				DILUCIÓN			cc	Malla % m-200		FNaCN (g/L)	Carbón (g/L)	Rec Au
	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	O	U	F		O	U	F	cc	Discharged	Overflow			
03/01/2018	1313	1516	1402	1752	1058	1076	35.08	50.09	42.20	63.17	8.07	1.85	1.00	1.37	1.29	92.29	75.72	1.23	25.00	89.57
04/01/2018	1320	1526	1412	1765	1057	1081	35.68	50.73	42.94	63.79	7.94	1.80	0.97	1.33	1.33	92.55	74.69	1.31	24.50	90.02
05/01/2018	1321	1524	1389	1734	1056	1082	35.76	50.60	41.22	62.30	7.80	1.80	0.98	1.43	0.82	92.37	74.45	1.30	24.80	89.47
06/01/2018	1318	1514	1401	1762	1061	1078	35.51	49.96	42.12	63.65	8.46	1.82	1.00	1.37	1.19	91.99	75.47	1.28	25.20	90.50
07/01/2018	1304	1527	1405	1745	1059	1076	34.31	50.79	42.42	62.83	8.20	1.91	0.97	1.36	1.44	92.08	75.00	1.27	24.80	89.70
08/01/2018	1312	1521	1409	1762	1052	1080	35.00	50.41	42.72	63.65	7.27	1.86	0.98	1.34	1.45	93.18	74.36	1.31	25.10	90.01
09/01/2018	1320	1523	1406	1732	1061	1081	35.68	50.54	42.50	62.20	8.46	1.80	0.98	1.35	1.20	91.67	74.69	1.28	24.80	90.11
10/01/2018	1309	1521	1407	1746	1053	1078	34.74	50.41	42.57	62.88	7.41	1.88	0.98	1.35	1.45	92.90	74.76	1.32	24.80	89.54
11/01/2018	1321	1524	1399	1762	1059	1081	35.76	50.60	41.97	63.65	8.20	1.80	0.98	1.38	1.02	92.26	74.77	1.29	25.20	89.79
12/01/2018	1308	1521	1397	1762	1061	1080	34.65	50.41	41.82	63.65	8.46	1.89	0.98	1.39	1.21	91.99	74.03	1.25	25.03	89.68
13/01/2018	1318	1523	1401	1756	1063	1079	35.51	50.54	42.12	63.36	8.72	1.82	0.98	1.37	1.12	91.67	75.16	1.27	24.87	89.78
14/01/2018	1314	1521	1389	1756	1058	1088	35.17	50.41	41.22	63.36	8.07	1.84	0.98	1.43	0.94	92.33	71.97	1.25	25.04	90.12
15/01/2018	1315	1524	1397	1764	1057	1071	35.25	50.60	41.82	63.74	7.94	1.84	0.98	1.39	1.07	92.54	77.46	1.26	25.07	89.45
16/01/2018	1318	1523	1402	1752	1061	1083	35.51	50.54	42.20	63.17	8.46	1.82	0.98	1.37	1.14	91.89	73.90	1.28	24.98	89.76
17/01/2018	1308	1529	1401	1753	1058	1082	34.65	50.92	42.12	63.22	8.07	1.89	0.96	1.37	1.25	92.30	73.38	1.31	24.69	90.21
18/01/2018	1314	1532	1396	1756	1057	1081	35.17	51.11	41.75	63.36	7.94	1.84	0.96	1.40	1.02	92.46	74.20	1.29	24.98	89.89
19/01/2018	1316	1561	1395	1757	1054	1076	35.34	52.89	41.67	63.41	7.54	1.83	0.89	1.40	0.84	92.87	75.95	1.31	24.88	90.05
20/01/2018	1319	1534	1389	1754	1056	1078	35.59	51.23	41.22	63.26	7.80	1.81	0.95	1.43	0.81	92.57	75.55	1.28	25.01	89.84
21/01/2018	1317	1535	1401	1762	1061	1082	35.42	51.29	42.12	63.65	8.46	1.82	0.95	1.37	1.06	91.99	74.13	1.27	24.87	90.04
22/01/2018	1316	1525	1403	1753	1054	1075	35.34	50.67	42.27	63.22	7.54	1.83	0.97	1.37	1.18	92.83	76.27	1.29	24.69	89.64
23/01/2018	1320	1523	1405	1748	1059	1076	35.68	50.54	42.42	62.98	8.20	1.80	0.98	1.36	1.18	92.11	76.25	1.26	25.02	89.99
24/01/2018	1321	1532	1406	1762	1056	1082	35.76	51.11	42.50	63.65	7.80	1.80	0.96	1.35	1.12	92.65	74.45	1.27	25.09	89.67
25/01/2018	1317	1526	1398	1752	1061	1081	35.42	50.73	41.90	63.17	8.46	1.82	0.97	1.39	1.05	91.89	74.45	1.29	24.99	90.06
26/01/2018	1315	1528	1389	1761	1057	1078	35.25	50.85	41.22	63.60	7.94	1.84	0.97	1.43	0.89	92.51	75.24	1.31	24.88	89.69
27/01/2018	1321	1562	1404	1759	1058	1081	35.76	52.95	42.35	63.50	8.07	1.80	0.89	1.36	0.92	92.36	74.77	1.30	24.87	89.64
Promed.	1316	1528	1400	1755	1058	1079	35.32	50.84	42.06	63.30	8.05	1.83	0.97	1.38	1.12	92.33	74.84	1.28	24.93	89.85

### Anexo 5. Histograma de carga circulante



### Anexo 6. Índice de capacidad de carga circulante



### Índices de Capacidad para CC

Especificaciones

LSE = 1.563

LIE = 0.675

	<i>Capacidad</i>	<i>Desempeño</i>
	<i>Corto Plazo</i>	<i>Largo Plazo</i>
Sigma	0.148124	0.189065
Cp/Pp	0.999166	0.782799
Cpk/Ppk	0.997816	0.781741
DPM	2722.41	18855.0

Con base en límites 6.0 sigma. La sigma de corto plazo se estimó a partir del rango móvil promedio.

#### **Intervalos de confianza del 95.0%**

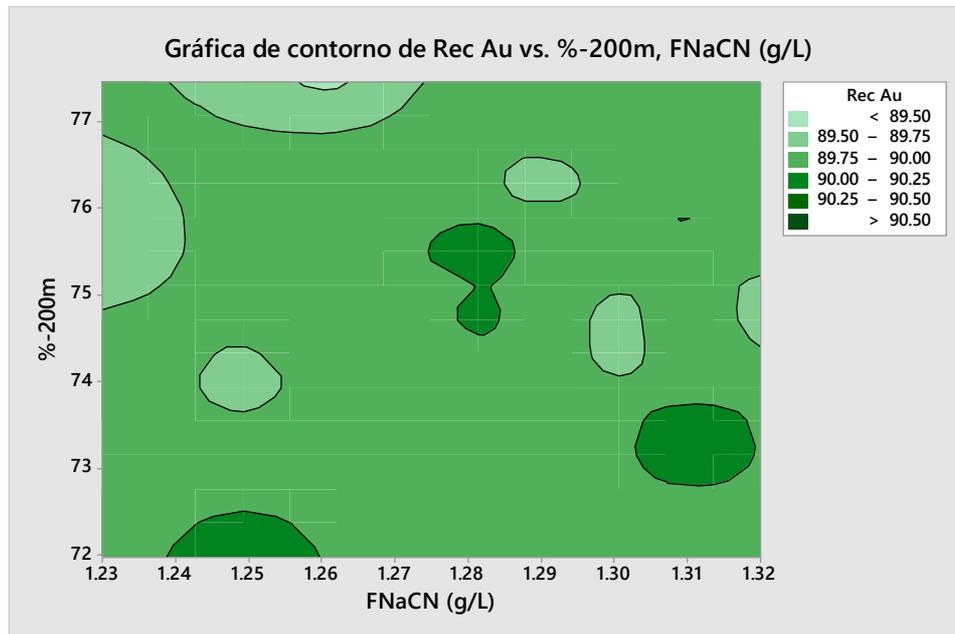
<i>Índice</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Cp	0.718229	1.27962
Pp	0.562698	1.00252
Cpk	0.686762	1.30887
Ppk	0.524872	1.03861

#### **El StatAdvisor**

Se han calculado diversos índices de capacidad para resumir la comparación entre la distribución ajustada y las especificaciones. Un índice común es el Pp, que, en el caso de una distribución normal, es igual a la distancia entre el los límites de especificación dividida entre 6 veces la desviación estándar. En este caso, el Pp es igual a 0.782799, el cual generalmente no se considera bueno. Ppk es un índice de capacidad unilateral, el cual, en el caso de una distribución normal, divide la distancia de la media al límite de especificación más cercano, entre 3 veces la desviación estándar. En este caso, el Ppk es igual a 0.781741.

Puesto que los índices de capacidad son estadísticos, variarán de una muestra de datos a otra. Los intervalos de confianza del 95.0% muestran que tanto pueden variar estos estadísticos de los valores verdaderos dado el hecho de que solamente se tomaron 25 observaciones.

*Anexo 7. Recuperación de oro en función de la liberación y fuerza de cianuro de sodio*





Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA y METALÚRGICA

COMISION DE GRADOS Y TITULOS

BODAS DE ORO 1967-2017

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

En Huacho, el día 21 de agosto de 2018, siendo las 3:00 pm., en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales, los miembros del Jurado Evaluador integrado por:

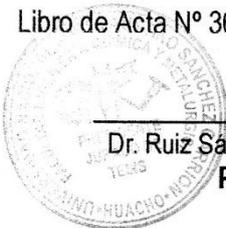
Presidente : Dr. Ruiz Sánchez, Berardo Beder DNI N° 31602007
Secretario : M(o) Rodríguez Espinoza, Ronald Fernando DNI N° 18222946
Vocal : Ing. Abarca Rodríguez, Joaquín José DNI N° 15740291

El (a) postulante al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico: Cornelio La Rosa, Andrés Jhonatan; Identificado(a) con D.N.I. N° 43431960; procedió a la Sustentación de la Tesis: DIAGNOSTICO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA Y CIANURACIÓN PARA FIJAR LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE LAS OPERACIONES DE LA MINERA VICUS S.A.C, autorizado mediante Resolución de Decanato N° 0645-2018-D-FIQyM de fecha 20 de agosto del 2018 de conformidad con las disposiciones del Reglamento de Grados Académicos de Bachiller y Títulos Profesionales vigentes, sí absolvió las interrogantes que le formularon los Señores Miembros del Jurado.

Concluida la Sustentación de la Tesis, se procedió a la votación correspondiente resultando el candidato aprobado por unanimidad. Con la nota:

Table with 4 columns: CALIFICACIÓN, NUMERO, LETRAS, EQUIVALENCIA, CONDICIÓN. Row 1: 18, Dieciocho, Excelente, Aprobado

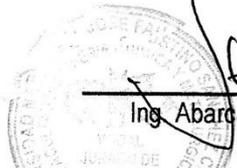
Siendo las 4:00 m. del 21 de Agosto del dos mil Dieciocho, se dio por concluido el Acto de Sustentación, firmando el Jurado Evaluador las Actas de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de INGENIERO METALÚRGICO, correspondiente al folio del Libro de Acta N° 369



Dr. Ruiz Sánchez, Berardo Beder PRESIDENTE



M(o) Rodríguez Espinoza, Ronald Fernando SECRETARIO



Ing. Abarca Rodríguez, Joaquín José VOCAL