

Optimización en la Recuperación de Zinc de minerales polimetálicos mediante el proceso de flotación en la empresa Mines and Metals Trading Perú - Huancavelica

AROLDO INGA PAUCAR¹
VIDAL ARAMBURÚ ROJAS²
ROSA MARÍA TIBURCIO ALVA³

RECIBIDO: 05/11/2019 ACEPTADO: 21/09/2020 PUBLICADO: 31/12/2020

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal optimizar la recuperación de zinc en la segunda etapa de flotación de minerales polimetálicos de la empresa Mines and Metals Trading Perú donde su recuperación promedio anual de Zinc es de 82%. En la planta concentradora se realizaron dos muestreos la primera de mineral fresco en la faja N°01 que alimenta a la molienda primaria y las de pulpa se obtuvieron de las colas de flotación bulk Pb/Ag. Durante el estudio se realizó pruebas preliminares de flotación con la finalidad de seleccionar las variables independientes más influyentes en la variable dependiente haciendo uso del programa estadístico MINITAB. Se realizaron pruebas de flotación variando la dosificación de sulfato de cobre(g/TM) y tiempo de remolienda(minutos). Con los resultados obtenidos se realiza la optimización con el Diseño Hexagonal, obteniendo valores máximos de sulfato de cobre de 351.06 gr/TM y tiempo de remolienda de 5.06 minutos. Con estos resultados se obtiene una recuperación teórica de 95.54%.

Palabras clave: Recuperación; Flotación; Minitab.

OPTIMIZATION IN THE RECOVERY OF ZINC OF POLYMETHALIC MINERALS THROUGH THE FLOTATION PROCESS IN THE COMPANY MINES AND METALS TRADING PERÚ - HUANCVELICA

ABSTRACT

The main objective of this research work was to optimize the recovery of zinc in the second stage of flotation of polymetallic minerals of the company Mines and Metals Trading Peru where its average annual recovery of zinc is 82%. At the concentrator plant, two samplings were carried out, the first one of fresh mineral in the belt No. 01 that feeds the primary grinding and the pulp were obtained from the bulk Pb / Ag flotation tails. During the study, preliminary flotation tests were carried out in order to select the most influential independent variables in the dependent variable using the MINITAB statistical program. Flotation tests were performed varying the dosage of copper sulfate (g / TM) and regrind time (minutes). With the results obtained, the optimization with the Hexagonal Design is carried out, obtaining maximum values of copper sulfate of 351.06 gr / TM and regrinding time of 5.06 minutes. With these results a theoretical recovery of 95.54% is obtained.

Keywords: Recovery; Flotation; Minitab.

I. INTRODUCCIÓN

En metalurgia extractiva la optimización con diseños experimentales, que consiste en la planificación de experiencias a realizarse con la finalidad de obtener la máxima cantidad de información con pocas pruebas. El tiempo y los costos son reducidos considerablemente por el uso de estos métodos estadísticos que son aplicados en la investigación industrial (Castro, 2005). En la metalurgia extractiva actualmente el proceso de flotación es muy importante y es el principal responsable del nivel de producción de concentrados hoy en día (Novoa & Vargas, 2013).

El presente trabajo de investigación consiste en optimizar la recuperación de Zinc, en la segunda etapa de flotación de minerales en la empresa Mines and Metals Trading Perú, haciendo uso de variables más influyentes como dosificación de sulfato de cobre y tiempo de remolienda.

En un proceso de optimización primero se tiene que definir correctamente un criterio de optimización; en conclusión, determinar lo que se va a optimizar (Valverde, 1992). Para lograr podrá definir que la flotación de minerales es un proceso de concentración de minerales donde se separa el mineral valioso de la ganga(estéril), la separación se logra con un tratamiento físico-químico que modifica la tensión superficial del mineral (Tecsup, 2006). La tensión superficial disminuye, y en consecuencia se facilita la formación de espuma, así como se la hace más estable. La espuma está formada por un conjunto de burbujas de aire, que se forman más fácilmente cuanto menor es la tensión superficial del medio en que se intenta crear (Otero, 1976).

La adherencia selectiva de burbujas es el factor esencial del proceso de flotación y, una vez que se ha conseguido, la fuerza de la gravedad permite efectuar la separación con gran sencillez.

- 1 Metals Trading Perú Sac., Superintendente de Planta Concentradora, Huancavelica-Perú
E-mail: aroldoinga@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-9369>
- 2 Doctor en Gestión de empresas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Docente, Lima-Perú
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>
E-mail: vidal_aramburu@hotmail.com
- 3 Ingeniero Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Docente, Lima-Perú
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2129-1623>
E-mail: rosa_tiburcioalva@yahoo.es

Las burbujas que interesan para la flotación son huecos macroscópicos en el seno de la pulpa, llenos de gas (Taggart, 1966). El método efectivo de prueba es relativamente directo y normalmente se realiza en una máquina de laboratorio, de operación intermitente. Después de hacer flotar un número dado de muestras con diferentes niveles de reactivos, los productos de la flotación y los productos residuales se analizan por los elementos de interés (Kelly, 1990).

Las pruebas de flotación permiten optimizar la recuperación de zinc (Bueno, 2003). Para dichas pruebas se envían las muestras para el ensayo de leyes a laboratorio químico, en seguida se programa una serie de pruebas con las variables independientes significativas para la optimización de zinc. Estas variables son obtenidas con t-student y la optimización con la aplicación de modelos cuadráticos (Manzaneda, 2004).

En la Escuela de Ing. Metalúrgica de la UNMSM se realizó una investigación para la empresa Minera Milpo, donde participaron un grupo de estudiantes realizando prácticas en laboratorio de concentración y flotación de minerales como parte experimental del desarrollo de los cursos en el campo de metalurgia extractiva. Como principal objetivo fue demostrar a los alumnos la manera de optimizar las variables de la flotación, mediante ajustes por mínimos cuadrados y el software estadístico MINITAB, que ayudó eficazmente en esta tarea (Chia, y otros, 2013).

En la compañía Minera Yauliyacu se realizó el estudio de Optimización el proceso de flotación de concentrado de zinc logrando reducir el consumo de Sulfato de cobre (CuSO_4) (Chirio, 2018).

La investigación básica en el campo de la flotación comprende hoy en día el estudio de los fenómenos de adsorción, intercambio iónico, potenciales eléctricos, procesos de difusión y otros que se producen en las superficies minerales y sus interfaces con agua y aire (Sutulov, 1963).

Los estudios de caracterización mineralógica nos permiten obtener resultados importantes que nos ayuda a interpretar los fenómenos específicos que ocurren dentro del curso del proceso metalúrgico (Quiñonez, Gagliutti, & Campian, 2013).

OBJETIVOS

Objetivo general

Optimizar la recuperación de zinc mediante el tiempo de remolienda y dosificación de sulfato de cobre

en el proceso de flotación en la segunda etapa de minerales sulfurados polimetálicos en la planta concentradora "Recuperada" de la empresa Mines and Metals Trading Perú.

Objetivos específicos

- Determinar el tiempo de remolienda adecuado en la etapa cleaner para optimizar la recuperación de Zn.
- Determinar la dosificación adecuada de sulfato de cobre en el acondicionador para mejorar la recuperación de Zn.

HIPÓTESIS

Hipótesis general

La optimización del tiempo de remolienda en la etapa cleaner y la dosificación de sulfato de cobre en el proceso de flotación mejorara la recuperación de zinc en la empresa Mines and Metals Trading Perú.

Hipótesis específicas

- La determinación del tiempo de remolienda en la etapa cleaner de zinc permitirá optimizar la recuperación.
- La determinación adecuada de la dosificación de sulfato de cobre en el acondicionador permitirá mejorar la recuperación de Zn.

JUSTIFICACIÓN

Teórica

La flotación de minerales es un proceso fisicoquímico usado para la separación de sólidos finamente divididos, donde para obtener resultados óptimos de recuperación y calidad que generen un margen de utilidad positivo intervienen parámetros y variables, en donde la flotación de minerales depende de las distintas etapas de conminución (Currie, 1984)

Práctica

En unidades mineras tanto pequeñas y medianas se continúan trabajando con el método antiguo donde consistía en concentrar los minerales con altas leyes para posterior comercialización, durante el proceso de flotación no se tenía un control adecuado en cuanto a las variables operacionales, esta práctica generó problemas en la recuperación y grado de concentrado cuando las leyes de cabeza de mineral decayeron en las minas. En tal sentido se realiza estudio de investigación en el circuito de flotación de zinc para optimizar las recuperaciones

de zinc que decayeron al bajar las leyes de cabeza. Para lograr optimizar las recuperaciones de zinc por el proceso de flotación diferencial, se hace indispensable aplicar técnicas modernas en la investigación teórica y experimental.

Economica

Actualmente el negocio de los concentrados polimetálicos de plomo y zinc no son tan alentadores por la baja cotización en el mercado internacional lo cual incentiva buscar métodos de optimización mediante la investigación metalúrgica para lograr incrementar la recuperación de sus concentrados y poder generar un margen de utilidades rentables. Por tales motivos las pruebas experimentales que se realizaron son de suma importancia y nos ayuda a buscar las distintas formas de minimizar los costos de producción y generar mayor rentabilidad.

Social

En el aspecto social las nuevas tecnologías para procesar minerales con leyes marginales benefician a las comunidades de influencia directa e indirecta por garantizar el empleo local y ampliar el tiempo de vida de la mina. También garantizan el desarrollo de la comunidad para las futuras generaciones.

II. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo cuantitativo y experimental, mediante la ayuda de las pruebas metalúrgicas de flotación y remolienda se buscará conjugar las variables independientes y obtener resultados en los variables dependientes. Las pruebas experimentales requerirán de información de caracterización del tipo de mineral de estudio para poder buscar optimizar la recuperación de zinc tomando como base las teorías y antecedentes de estudio en el procesamiento de minerales mediante flotación por espumas, las pruebas preliminares se realizaron con las condiciones operativas de la planta concentradora.

III. RESULTADOS

Selección de variables independientes

Para la selección de las variables independientes se realizaron pruebas de flotación empleado el diseño factorial; para lo cual se considera los valores máximos, centro y mínimos. Se detalla en la tabla 1.

En la tabla 2 se muestra la plantilla de diseño factorial y las recuperaciones obtenidas.

Tabla 1. Valores máximos y mínimos de variables

	Variable	Mínimo	Centro	Máximo
X ₁	Sulfato de cobre (g/TM)	100	200	300
X ₂	Xantato Isopropílico de sodio	10	15	20
X ₃	pH	10	11	12
X ₄	Tiempo de remolienda(minutos)	0	6	12
X ₅	T. Acondicionamiento	5	7.5	10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Diseño factorial de las variables independientes y dependiente

Prueba	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y
1	-1	-1	-1	-1	-1	64.87
2	1	-1	-1	1	-1	87.23
3	-1	-1	1	-1	1	69.86
4	1	-1	1	1	1	87.65
5	1	1	-1	-1	1	73.67
6	-1	1	-1	1	1	80.86
7	1	1	1	-1	-1	76.83
8	-1	1	1	1	-1	80.00

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar la regresión lineal se obtiene el cuadro de coeficientes de variables y la distribución de probabilidad t student que se muestra en la tabla 3.

Constante = 77.621 R- cuadrado = 97.93%

Se procede a eliminar en la tabla 4 todos los valores absolutos menores al "t" de tabla que para las 8 pruebas es 1.86 al 95% dando como resultado la tabla 5.

La interpretación de t student es como sigue:

1. Sulfato de cobre.

Es muy importante por tener influencia positiva en la recuperación de zinc (+4.89), esto indica que se tiene que tener en cuenta en la activación de Zn en la etapa de acondicionamiento.

2. Tiempo de remolienda.

En la recuperación de Zinc tiene influencia (+8.30), por lo que es importante la granulometría en las etapas de limpieza para incrementar la recuperación y el grado de concentrado de zinc de acuerdo a las condiciones de comercialización.

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE FLOTACIÓN Y REMOLIENDA

Se realizaron en total nueve pruebas metalúrgicas con muestras de las colas de flotación bulk provenientes de la planta concentradora Recuperada de Mines and Metals Trading Perú.

Las pruebas se realizaron con las muestras de las colas de flotación bulk Pb/Ag con una granulometría de 70% -200M, con leyes de 0.4 oz/tc Ag, 0.1% Pb, 2.3% Zn y 5.1% Fe. El estudio se inicia con tres pruebas metalúrgicas para determinar el tiempo de acondicionamiento con respecto a la recuperación de Zn en el Concentrado Rougher, determinando que el tiempo de acondicionamiento es de 10 minutos.

Las variables independientes constantes que se utilizaron son: sulfato de cobre (300 g/TM), Z-11(15 g/TM), pH (11) y MIBC (18 g/TM).

En la tabla 6 se indican los resultados:

En la prueba 2 se obtiene un mejor resultado de recuperación de zinc de 97.67%.

Tabla 3. Coeficientes de las variables

Variable	Coefficiente	EE del Coef.	T Student
CuSO4	3.724	0.761	4.89
Xantato Isopropilico.	0.219	0.761	0.29
Ph	0.964	0.761	1.27
Tiempo de remolienda	6.314	0.761	8.30
T Acondicionamiento	0.389	0.761	0.51

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. T-student

Rpta	CuSO4	Z-11	pH	Tiempo de remolienda	T. Acond.
Rec. Zn	4.89	0.29	1.27	8.30	0.51

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Descarte de valores menores a t de tabla 1.86.

Rpta	CuSO4	Z-11	pH	Tiempo de remolienda	T. Acond.
Rec. Zn	4.89			8.30	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Recuperación de concentrado rougher vs tiempo de acondicionamiento.

Prueba N°	Tiempo Ac.	R.C	Conc.rougher Zn		Recuperación (%)	
			Zn%	Fe%	Zn	Fe
1	5	3.58	7.85	11.76	95.07	66.26
2	10	4.44	9.95	14.20	97.67	64.74
3	20	5.95	11.81	10.65	86.47	35.87

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas de Flotación Variando Sulfato de Cobre

Se realizaron dos pruebas en circuito abierto variando la dosificación de CuSO_4 vs recuperación de zinc. La granulometría de la muestra es de 70%-200M, las variables constantes es el tiempo de acondicionamiento (10min), Z-11(15 g/TM) y pH (11).

En la tabla 7 se muestra los resultados:

En la prueba 2 se obtiene un mejor resultado de recuperación con 300 g/TM de CuSO_4 .

Pruebas de Flotación de Zinc Variando Tiempo de Remolienda en la Etapa Cleaner

Se programa cuatro pruebas de flotación con el concentrado rougher homogéneo, variando la granulometría en los límites de tiempo de 0 a 10 minutos de remolienda.

Las variables constantes en las pruebas es el CuSO_4 (100 g/TM), Z-11(15 g/TM), pH (11) y silicato

de sodio (150 g/TM), los resultados obtenidos se indican en la tabla 8.

En la prueba 9 se obtiene un mejor resultado de recuperación de 91.66%.

Pruebas de Flotación para aplicación del Diseño Hexagonal

En total se efectuaron seis pruebas y se agregaron tres pruebas al centro con el fin de obtener el "error experimental", con los resultados obtenidos se aplica el diseño hexagonal con las variables definidas, las pruebas se desarrollaron con la muestra de colas de circuito de flotación bulk Pb/Ag con el objetivo de optimizar las 2 variables independientes principales que son; sulfato de cobre (g/TM) y tiempo de remolienda (minutos) con el objetivo de optimizar teóricamente la variable dependiente que es la recuperación de zinc. Se adjunta en la tabla 9 los resultados de los balances metalúrgicos obtenidas de las pruebas realizadas.

Tabla 7. Recuperación de Zn en concentrado rougher vs dosificación de CuSO_4

Prueba N°	CuSo4(g/TM)	R.C	Conc.rougher Zn		Recuperación (%)	
			Zn(%)	Fe	Zn	Fe
2	300	4.44	9.95	12.40	97.67	64.74
4	200	4.37	6.20	11.30	95.19	53.01
5	100	3.39	6.00	9.60	71.64	57.22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Recuperación de Zn en concentrado rougher vs. Tiempo de remolienda.

Prueba N°	Tiempo de rémol (min)	R.C	Conc.cleaner Zn (III)		Recuperación (%)	
			Zn (%)	Fe (%)	Zn	Fe
*7	0	26.48	55.05	5.20	92.94	4.10
8	2	30.57	62.00	1.60	91.13	1.07
9	5	30.20	62.30	1.20	91.66	0.81
10	10	31.93	61.55	1.20	86.14	0.75

Fuente: Elaboración propia *Prueba sin remolienda.

Tabla 9. Balances metalúrgicos de pruebas realizadas de colas de flotación bulk Pb/Ag.

Pruebas	Producto	Ensayes		Contenido, gr		Recuperación	
		Zn (%)	Fe (%)	Zn	Fe	Zn	Fe
Prueba 1	Conc. Zinc	56.00	5.60	21.47	2.16	85.35	4.33
Prueba 2	Conc. Zinc	57.10	7.50	19.91	2.62	85.28	5.05
Prueba 3	Conc. Zinc	62.00	1.20	18.76	0.36	81.77	0.73
Prueba 4	Conc. Zinc	63.20	1.80	15.17	0.43	68.35	0.86
Prueba 5	Conc. Zinc	59.51	2.00	17.86	0.60	69.56	1.24
Prueba 6	Conc. Zinc	55.05	5.20	17.49	1.65	85.00	3.37
Prueba 7	Conc. Zinc	62.00	1.60	20.28	0.52	84.53	1.07
Prueba 8	Conc. Zinc	62.30	1.20	20.63	0.40	85.60	0.81
Prueba 9	Conc. Zinc	61.55	1.20	19.28	0.38	86.14	0.75

Fuente: Elaboración propia.

OPTIMIZACIÓN MEDIANTE DISEÑO HEXAGONAL

La aplicación del diseño hexagonal es para obtener las condiciones óptimas de dosificación de sulfato de cobre y el tiempo de remolienda (minutos), este último para obtener P80 igual a 20 micras que nos permite obtener la recuperación máxima de zinc.

Las variables independientes de estudio son:

- Sulfato de cobre (X_1) los límites de dosificación fueron de 200 a 400 g/TM.
- Tiempo de remolienda (X_2) con límites de tiempo de 0 a 10 minutos.
- En la tabla 10 se muestra los valores reales de las variables estudiadas con la finalidad de obtener los coeficientes de regresión en unidades reales, mostrado en la tabla 11.

Al aplicar la regresión lineal con el estadístico MINITAB se obtiene los siguientes resultados:

Análisis de regresión:

R cuadrado = 0.809987 N° de observaciones = 8
Grado de libertad residual = 2

La tabla 12 muestra la comparación entre la recuperación del Zn observado y la recuperación del zinc obtenido con el programa Minitab.

PRUEBA DE HIPÓTESIS

La prueba de hipótesis consiste en contrastar la consistencia de la optimización del tiempo de remolienda en la etapa cleaner y la dosificación del sulfato de cobre en el proceso de flotación mejorará la recuperación de zinc en la empresa Mines and Metals Trading Perú.

Tabla 10. Diseño hexagonal conformado con valores reales.

Prueba	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1X_2	Recuperación (%)
1	400	5.00	160000	25.00	2000	85.35
2	350	9.33	122500	87.05	3265.50	85.28
3	250	9.33	62500	87.05	2332.50	81.77
4	200	5.00	40000	25.00	1000	68.35
5	250	0.67	62500	0.45	167.50	69.56
6	350	0.67	122500	0.45	234.50	85.00
7	300	5.00	90000	25.00	1500	84.53
8	300	5.00	90000	25.00	1500	85.60
9	300	5.00	90000	25.00	1500	86.14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Coeficientes de regresión.

	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1X_2
X coeff	0.6714	6.389	-0.000857	-0.1534	-0.01378
St.Errf	0.0456	0.641	0.000074	0.0296	0.00187

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Valores observados y predichos de recuperación de zinc según la regresión.

Prueba	Rec.Zn (observado)	Rec. Zn. (predicho)
1	85.35	85.68
2	85.28	84.95
3	81.77	82.09
4	68.35	68.02
5	69.56	69.88
6	85.00	84.68
7	84.53	85.42
8	85.60	85.42
9	86.14	85.42

Fuente: Elaboración propia.

Planteamiento

Hipótesis

Hipótesis nula (H₀)

H₀: La optimización del tiempo de remolienda en la etapa cleaner y la dosificación de sulfato de cobre en el proceso de flotación no mejorara la recuperación de zinc en la empresa Mines and Metals Trading Perú.

Hipótesis alternativa(H₁)

H₁: La optimización del tiempo de remolienda en la etapa cleaner y la dosificación de sulfato de cobre en el proceso de flotación mejorara la recuperación de zinc en la empresa Mines and Metals Trading Perú.

Nivel de Significancia : 0.05

Nivel de Confianza (%): (1-0.05) x 100 = 95%

Prueba de Fisher:

Prueba de significación estadística recomendado para muestras pequeñas, se hace uso del programa estadístico Minitab. En la tabla 13 se observa los resultados.

A continuación, se extrae datos de análisis de regresión para la recuperación de zinc de la tabla 13.

- **F de la Regresión:** 122.55
- **F de Tabla** : 9.01

Se adjunta la tabla de distribución Fisher de nivel de significancia 0.05, que se requiere para realizar la comparación.

TABLA DE DISTRIBUCIÓN FISHER (0.05)

Tabla 13. Análisis de Varianza

Fuente	GI	SC ajuste	MC ajuste	Valor F	Valor p
Regresión	5	402.005	80.401	122.55	0.001
X ₁	1	142.369	142.369	217.00	0.01
X ₂	1	65.131	65.131	99.27	0.002
X ₁ ²	1	88.170	88.170	134.39	0.001
X ₂ ²	1	17.651	17.651	26.90	0.014
X ₁ X ₂	1	35.595	35.595	54.25	0.005
Error	3	1.968	0.656		
Falta de ajuste	1	0.632	0.632	0.95	0.433
Error puro	2	1.336	0.668		
Total	8	403.973			

Fuente: Elaboración propia.

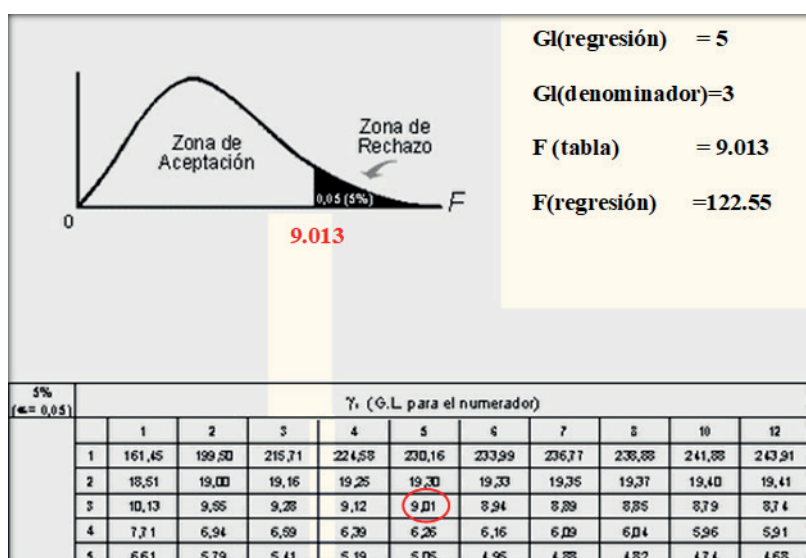


Figura 1. Tabla distribución F

Fuente Pedro Díaz B., Pág. 48.

- **F de falta de ajuste** : 0.95
- **F de falta de ajuste de tabla** : 19

Interpretación:

Con el análisis anterior queda demostrada la consistencia del modelo de estudio. El F de regresión del modelo es 122.55 es mucho mayor que el F de tabla esto demuestra la consistencia del estudio.

$$F_{\text{tabla regresión}} > F_{\text{tabla (5,3)}}$$

$$F_{\text{falta de ajuste}} < F_{\text{tabla (1,2)}}$$

- **Función de regresión obtenido:**

Aplicando derivadas parciales al modelo se obtiene la máxima respuesta para los valores de X_1 (sulfato de cobre) y X_2 (tiempo de remolienda).

$$\% \text{ Recup. Zn} = -46.3 + 0.6714 X_1 + 6.389 X_2 - 0.000857 X_1^2 - 0.1534 X_2^2 - 0.01378 X_1 X_2$$

- **Decisión:**

Como se puede apreciar los resultados en la Tabla 13, y de realizar la prueba de Fisher se puede confirmar que el modelo obtenido logra optimizar la recuperación de zinc. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis del investigador que indica que las variables tiempo de remolienda y dosificación de sulfato de cobre se relacionan significativamente con la recuperación de zinc en la empresa Minera Mines and Metals Trading Perú.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En general los resultados obtenidos mediante el estudio de investigación realizado nos permitieron lograr optimizar la recuperación de zinc a 95.54% en comparación del resultado promedio de planta de 82%; lo cual demuestra una mejora de 13.54%.

En esta investigación se ha utilizado el diseño hexagonal y el programa estadístico MINITAB como se indica en la tabla 10.

Al iniciar las pruebas de flotación se estandarizo el tiempo de acondicionamiento, donde la mejor recuperación rougher de Zn se obtiene con 10 minutos de acondicionamiento (ver tabla 7) y con la adición de reactivos principales como sulfato de cobre (300 g/TM), xantato z-11(15 g/TM), MIBC(18 g/TM) y pH 11 se logró recuperar el 97.70% del zinc contenido en las colas del circuito de Pb/Ag con alto contenido de fierro de 14.2%. Enseguida se realizó 3 pruebas de flotación variando la dosificación de sulfato de cobre donde podemos observar que con 300 g/TM de sulfato de cobre se recupera el Zn al 97.70% en el concentrado rougher (ver tabla 7).

La flotación de Zn variando el tiempo de remolienda en las limpiezas, antes de iniciar se realizó varias pruebas de flotación con la finalidad de producir concentrados rougher homogéneo de Zn. Con el concentrado producido se realiza cuatro pruebas de flotación cleaner obteniendo un tiempo de remolienda de 5.06 minutos, que representa un P80 de 20 micras para obtener un grado de concentrado de 62% de zinc y con una recuperación de 86.14%.

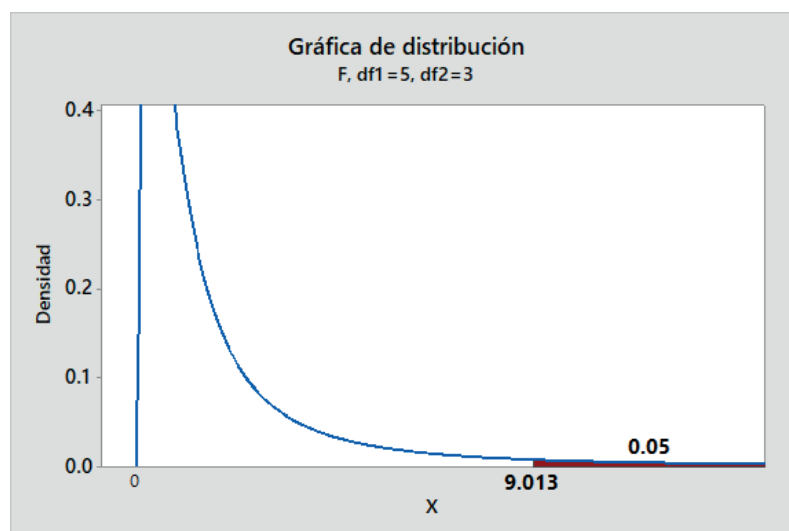


Figura 2. Distribución de probabilidad

Fuente: Elaboración propia

La aplicación de la distribución de probabilidad T-student en el programa estadístico Minitab ayudó en la selección de variables que directamente influyen en la recuperación de Zinc (ver tabla 5), identificado las variables independientes influyentes como son: tiempo de remolienda y dosificación de sulfato de cobre.

Con el diseño hexagonal se determinó la ecuación lineal de la variable dependiente, con la aplicación de derivadas parciales se obtiene los valores máximos de sulfato de cobre (351.54 g/TM) y el tiempo de remolienda (5.06 minutos) que se requiere para obtener una granulometría de 20 micras. Con estas variables reales se calcula la recuperación máxima teórica de zinc de 95.54%.

Los resultados obtenidos en la recuperación de zinc del presente estudio son de 95.54% que está por encima del resultado obtenido en el estudio realizado en la compañía Minera Yauliyacu que obtuvo 94%. El estudio en Minera Yauliyacu se realizó con mineral fresco de cabeza en este estudio se utilizó colas de flotación Pb/Ag (Castro, 2005).

En la Unidad Charcas de Industrial Minera México, también realizaron un estudio de investigación acerca del comportamiento del mineral sulfurado de zinc con la finalidad de incrementar su recuperación y grado de zinc, las pruebas de flotación fueron realizadas a nivel de laboratorio metalúrgico. Estas pruebas se realizaron en base al diseño factorial 2³ donde las variables dependientes fueron el grado y la recuperación de zinc y las variables estudiadas son: adición de colector, activador y espumante. Con estas condiciones óptimas se logró aumentar la recuperación de zinc de 84.8% a 86.8% conservando constante el grado de zinc de 49.1% (Pérez, 2008).

V. CONCLUSIONES

- Al obtener las variables independientes más influyentes como sulfato de cobre y tiempo de remolienda, se aplica el programa estadístico MINITAB para la selección y optimización de las variables y de esta forma logramos obtener los valores máximos de sulfato de cobre y tiempo de remolienda.
- La optimización mediante el diseño hexagonal es de mucha utilidad por la facilidad y rapidez de obtener los resultados de las variables de estudio que nos permite optimizar la dosificación de sulfato de cobre y el tiempo de remolienda, este último nos permite controlar la granulometría que se

requiere para la flotación, la falta de control de estas variables generaría costos elevados de tratamiento.

- Las pruebas con el relave final confirman que es posible recuperar el 95.54% de zinc presente en el relave con un concentrado que ensaya 62% de zinc. Esta recuperación adicional equivale a optimizar la recuperación de Zn de 82.00% a 95.54%.
- La recuperación de zinc registrada en planta concentradora recuperada es de 82% como registra en el balance metalúrgico de la empresa Mines and Metals Trading Perú, la consecuencia de este resultado es por la falta de control en la dosificación de sulfato de cobre y la falta de capacidad de remolienda en el circuito rougher de zinc que no permite obtener el grado de molienda de 20 micras.

VI. AGRADECIMIENTO

A la empresa Mines and Metals trading Perú por facilitar la toma de muestras para el presente estudio.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el uso a nivel industrial y de esta manera tener un control correcto en las dosificaciones de reactivos y el tiempo de remolienda adecuada para poder mejorar sus recuperaciones y disminuir el costo de tratamiento y que esto incrementaría sus márgenes de ganancia.
- Controlar el Blending de mineral fresco en cancha de gruesos antes que ingrese al proceso es muy importante ya que se cuenta con minerales de distintas minas de la zona que presentan distintos comportamientos fisicoquímicos en la flotación de minerales, por lo cual un correcto Blending ayuda a controlar una dosificación de reactivos de forma constante sin variaciones y por consiguiente mejora el performance metalúrgico.
- El control de la granulometría en las colas de flotación de Pb-Ag y en las limpiezas de Zn, esto nos permite establecer las óptimas condiciones de operación como la dosificación de reactivos para la flotación de minerales para los distintos tipos de mineral que ingresa a la Planta Recuperada.
- El uso de molino de remolienda para el concentrado rougher es importante para la liberación óptima de zinc, con esto se

garantiza la recuperación y el grado de concentrado de zinc.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [9] Minitab (2016). Introducción a Minitab 17. Recuperado de https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab17_GettingStarted-es-es.pdf
- [10] Bueno, H. (2003). *Técnica Experimental e Ingeniería Básica en Plantas Concentradoras*. Huancayo.
- [11] Castro, J. (2005). *Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la compañía minera Yauliyacu S.A mediante diseños experimentales*. Lima-Perú: Tesis UNMSM.
- [12] Chia, J., Chung Ching, A., Arce, G., Lovera, D., Arias, V., Puente S, L., & Coronado F, r. (2013). optimización de Variables en la Flotación Polimetálica Utilizando MINITAB proyecto Minera Hilarión. *Revista de instituto de Investigación (RIIGEO) FIGMMG-UNMSM*, 1-6.
- [13] Chirio, J. (2018). *Investigación para la Optimización del proceso de Flotación de Concentrado de Zinc en la Compañía Minera Yauliyacu S.A*. Arequipa - Peru: Universidad Nacional de San Agustín.
- [14] Currie, J.M (1984). *Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales*. Perú: Traducido por Ms.Sc. Juan Chia Aquije.
- [15] Pérez, A. (2008). Optimización de la Recuperación-grado de Minerales Sulfuros. *XIV Encuentro Sobre Procesamiento de Minerales*, 17.
- [16] Kelly, G. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*. México: Limusa.
- [17] Manzaneda, J. (2004). *Procesamiento de Minerales*. Lima: Lima.
- [18] Novoa, G., & Vargas, L. (2013). *Variables y propiedades que Influyen en el proceso de Flotación*. Antofagasta-Chile: Universidad Católica del Norte.
- [19] Otero, J. (1976). *Operaciones De Separación En Metalurgia Extractiva*. Madrid: Grefol S.A.
- [20] Quiñonez, J., Gagliutti, P., & Campian, M. (2013). Caracterización de las esfaleritas por el método de microscopía óptica. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 7.
- [21] Sutulov, A. (1963). *Flotación de Minerales*. Concepción: Universidad de Concepción.
- [22] Taggart, A. (1966). *Elementos de Preparación de Minerales*. Madrid: Interciencia.
- [23] Tecsup. (2006). Concentración de Minerales. *Programa de capacitación continua*, 21-75.
- [24] Valverde Espinoza, S. G. (1992). *Técnicas de Optimización Experimental en Metalurgia*. Lima-Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.