

Israel Huapaya¹, Juan Crisostomo², Dalia Valladolid³

¹ Gerencia Técnica, Div. M y M de Bureau Veritas Perú, israel.huapaya@bureauveritas.com

² Gerencia de Operaciones, Div. M y M de Bureau Veritas Perú, juan.crisostomo@bureauveritas.com

³ Gerencia de Desarrollo de Negocios, Div. M y M de Bureau Veritas Perú, dalia.valladolid@bureauveritas.com

RESUMEN

Se describe la metodología utilizada para optimizar los procesos de extracción de muestras de roca sólida mineralizada con contenidos de oro correspondientes a un conjunto de vetas en interior mina, incluyendo la optimización del muestreo de fragmentos de roca mineralizada descargada en canchas. Se inició la evaluación experimental con la caracterización del factor de heterogeneidad intrínseca de los dominios de muestreo o lotes mediante Test de Heterogeneidad, facilitando el establecimiento de la precisión del muestreo para una determinada masa y tamaño nominal máximo de las muestras, que a su vez permitieron la obtención de nomogramas con los que se realizó la optimización de los protocolos de muestreo y preparación de muestras en conformidad con los métodos de ensayo; posibilitando así, la aplicación de programas efectivos de aseguramiento y control de la calidad para eliminar los sesgos persistentes y mantener el error relativo de muestreo dentro de un nivel de precisión que garantice la representatividad de las muestras para obtención de resultados confiables y permanentes en los procesos de análisis químicos cuantitativos realizados en los laboratorios.

1. Introducción

La validación de los métodos de muestreo es necesaria para asegurar el resultado de ensayos o mediciones de contenidos de elementos químicos de interés en las muestras.

Un muestreo sin controles establecidos para eliminar los errores que inducen al sesgo y sin el conocimiento del nivel de precisión para asegurar la obtención de muestras representativas, genera la mayor contribución a la incertidumbre de medición, obteniéndose resultados no confiables. Por este motivo, el muestreo requiere una gestión y un control cuidadoso, con evaluaciones frecuentes para reducir la varianza total a un nivel aceptable, mientras que al

mismo tiempo se eliminan los sesgos significativos, permitiendo reducir la contribución a la incertidumbre derivada del proceso de muestreo. Sin embargo, los procedimientos para estimar la incertidumbre resultante no están bien desarrollados y, además, requieren orientaciones específicas.

El conocimiento específico de la precisión del proceso de muestreo es muy limitado.

Dado que los procesos analíticos y de muestreo contribuyen a la incertidumbre en el resultado, la incertidumbre solo se puede estimar si hay una comprensión del proceso completo.

Además, la optimización del error relativo en muestreo y análisis solo es posible cuando se comprenden ambos procesos.

Es necesario disponer de técnicas confiables de estimación de la contribución del muestreo a la incertidumbre para la mayoría de los sistemas de medición analítica.

La optimización de los protocolos de muestreo permite maximizar la calidad del muestreo, reduciendo la varianza total a un nivel aceptable y sin distorsión del contenido crítico debido a la forma de seleccionar la muestra.

La fuente principal de variabilidad o error aleatorio que origina la pérdida de calidad del muestreo respecto al nivel de precisión es la heterogeneidad de constitución y distribución del lote o dominio de muestreo.

Los errores que inducen al sesgo o desviaciones en muestreo son originados al realizar la toma de incrementos y la preparación de las muestras para los ensayos sin tomar en cuenta la teoría de muestreo de minerales de Pierre Gy.

A pequeña escala, la heterogeneidad de constitución entre fragmentos (CH_L) de cada dominio de muestreo de mineral es responsable del error fundamental de muestreo (FSE) que corresponde al mínimo error de muestreo al seleccionar aleatoriamente cada fragmento una a la vez, considerando que cada fragmento del lote tiene un contenido crítico diferente. Para un determinado peso de la muestra y tamaño nominal máximo de los fragmentos (d), el error

fundamental de muestreo (FSE) es el mínimo error que existiría si el protocolo fuera implementado de manera perfecta.

El Error relativo de muestreo deberá ser medido, evaluado y controlado para mantenerlo dentro de un rango aceptable.

La validación e implementación de procedimientos de muestreo debe considerar una primera etapa para caracterizar la heterogeneidad del lote o dominio de muestreo, de tal forma que sea factible cuantificar la varianza del error fundamental de muestreo y construir los Nomogramas de muestreo.

Una segunda etapa consiste en optimizar el protocolo de muestreo para mantener la varianza relativa del error fundamental o simplemente error relativo dentro de rangos aceptables e implementar controles para eliminar o minimizar los sesgos persistentes.

2. Objetivo

Proponer una metodología alternativa para optimizar los protocolos de muestreo en interior mina y superficie con aplicación del Test de Heterogeneidad, que es una técnica experimental establecida para minerales fragmentados según los criterios de la Teoría de muestreo de P. Gy. Para su aplicación a lotes de roca sólida mineralizada se utilizaron fragmentos de roca mineralizada manteniendo la información química y mineralógica del lote original para poder ser evaluados bajo los lineamientos de la técnica propuesta.

Los objetivos específicos del presente trabajo técnico son:

- Establecer la masa mínima requerida o el peso óptimo de las muestras para una determinada granulometría; manteniendo la precisión del muestreo dentro de rangos aceptables y a su vez sin originar dificultades operativas.
- Validar los procedimientos de muestreo en interior mina para extracción de muestras de roca sólida mineralizada.
- Validar los procedimientos de muestreo en canchas del mineral fragmentado mediante la metodología aplicada.
- Validar los procedimientos de preparación de muestras de mineral para análisis químicos.
- Establecer el error relativo aceptable para evaluaciones de precisión con muestras gemelas.
- Establecer controles para eliminación de errores que inducen al sesgo en muestreo.
- Establecer controles que inducen al sesgo en la preparación de muestras para análisis químico.

3. Fundamentación teórica y conceptual

La heterogeneidad de constitución del lote de mineral se define como la varianza de la heterogeneidad de un fragmento con respecto al lote o dominio de muestreo; sin embargo, la heterogeneidad de constitución es difícil de calcular y se requieren simplificaciones. Por tal motivo, para caracterizar la heterogeneidad del lote o dominio de muestreo se utiliza el factor de heterogeneidad intrínseca del lote (IH_L), que se define como:

$$IH_L = CH_L (M_L/N_F) \dots (1)$$

Donde:

CH_L , es la heterogeneidad de constitución

M_L , es la masa del lote o dominio de muestreo y

N_F , es el número de fragmentos contenidos en el lote

Considerando que la heterogeneidad intrínseca del lote (IH_L) es proporcional a la varianza de la heterogeneidad de un fragmento o partícula, se demuestra que:

$$IH_L = c l f d^3 \dots (2)$$

Donde:

c , es el factor mineralógico (g/cm^3),

l , es el factor de liberación del contenido crítico (adimensional)

f , es el factor de forma de los fragmentos (adimensional),

g , es el factor granulométrico (adimensional),

d , es el diámetro nominal de las partículas

La Teoría de muestreo de minerales de Pierre Gy, establece que el error relativo de muestreo o la varianza relativa a un analito del error fundamental (S_{FSE}^2), está dada por:

$$S_{FSE}^2 = K d^3 [(1/M_S) - (1/M_L)] \dots (3)$$

Donde:

S_{FSE}^2 , varianza relativa de FSE

K , constante de muestreo

d , tamaño nominal de las partículas o fragmentos

M_S , masa de la muestra

M_L , masa del lote o dominio de muestreo

Si M_S es mucho menor que M_L :

$$S_{FSE}^2 = K d^3 (1/M_S) \dots (4)$$

El desarrollo de la ecuación (4) permite evaluar el error de muestreo o varianza relativa del error fundamental de muestreo para una determinada masa de la muestra (M_S) y un tamaño nominal máximo de las partículas o fragmentos (d). A partir del conocimiento de la constante de muestreo K , se puede demostrar que K es el producto de los siguientes factores:

$$K = c f g \dots (5)$$

Donde:

c, es el factor mineralógico (g/cm^3),

l, es el factor de liberación del contenido crítico (adimensional)

f, es el factor de forma de los fragmentos (adimensional),

g, es el factor granulométrico (adimensional)

Es posible encontrar el valor de K realizando en forma teórica la evaluación de cada factor, por separado o en forma experimental, mediante el Test de Heterogeneidad, considerando que el factor de liberación está dado por la siguiente ecuación:

$$l = (d_1/d)^\alpha \dots (6)$$

Donde:

d_1 , diámetro de partícula donde se libera el mineral.

d, diámetro nominal de las partículas

α , parámetro único para cada tipo de mineral.

Reemplazando (6) en (5):

$$K = c f g (d_1/d)^\alpha \dots (7)$$

Entonces: $K * (d^\alpha) = c f g (d_1)^\alpha \dots (8)$

Por lo que (8) es una constante de muestreo experimental aplicable para cada etapa de conminación y α está dado para un tipo de mineral.

Experimentalmente se obtiene d y K:

$$d = [(d_1^3 + d_2^3)/2]^{1/3} \dots (9)$$

Donde:

d_1 y d_2 son las aberturas de los tamices utilizados para tamizar el material.

Las diferentes constantes K para cada estado de conminación, la podemos obtener experimentalmente a partir de:

$$K = I_{H_L} / (d^\alpha) \dots (10)$$

4. Metodología

El Método experimental para caracterizar la Heterogeneidad intrínseca del lote o dominio de muestreo (I_{H_L}), y obtener la Constante de muestreo, denominado Test de Heterogeneidad, consiste en:

- Tomar una gran cantidad de fragmentos de roca de los dominios de muestreo

- Registrar los tipos de mineralización visualizados al momento de extraer las muestras.
- Clasificación granulométrica del total de fragmentos de roca acumulada, separándose en grupos según sus dimensiones mediante tamizado.
- De cada grupo de fragmentos se forman cuadrículados con la misma cantidad de partículas para obtener muestras representativas de cada grupo.
- Los grupos de masa M_Q clasificados por tamaños se acondicionan para ser muestreadas sin sesgo y con mínima varianza de FSE.
- Cada muestra se compone de Q partículas, una masa M_q y un contenido medio a_c .

La estimación experimental del factor de heterogeneidad intrínseca del lote (I_{H_L}), se calcula para cada fracción de tamaño, de acuerdo con la Ecuación:

$$I_{H_L} = g \sum_q [(a_q - a_Q)^2 / a_Q^2] (M_q^2 / M_Q) \dots (11)$$

Donde:

M_q , masa de cada grupo o muestra de fragmentos Q

a_q , es el contenido metálico de cada muestra,

M_Q , es la masa total sometida a prueba

a_Q , es su contenido medio

g, es el factor granulométrico

$$M_Q = \sum M_q \dots (12)$$

$$a_Q = [1/M_Q] \sum (a_q M_q) \dots (13)$$

El resultado del Test de heterogeneidad permite la correlación del diámetro nominal de las fracciones con el factor de heterogeneidad intrínseca I_{H_L} . El diámetro nominal se calcula según la ecuación (9)

El diámetro nominal d se correlaciona con I_{H_L} , según la ecuación (10), donde K es una constante específica para un tipo de mineral dado en un grado dado y α es un parámetro único para cada tipo de mineral.

Ambos parámetros de muestreo, K y α , indican la cantidad de heterogeneidad constitucional del mineral y pueden derivarse de la línea de regresión que pasa por los resultados de I_{H_L} para cada tipo de mineral.

Cuanto más altos sean los valores de K y α , mayor será la heterogeneidad del mineral.

La Metodología utilizada, considera un primer estudio con evaluación del compósito de todas las vetas. Sin embargo, un segundo estudio de caracterización debe considerar la determinación de Unidades Geológicas de

cada veta (UGs), o Ensamblajes mineralógicos textuales (EMTs), debido a que cada tipo de mineral en las vetas debe tener su Test de heterogeneidad, e incluso, tomar en cuenta las gangas que posiblemente también influyen.

5. Datos y Resultados

5.1 Test de Heterogeneidad

Se realizó la extracción de fragmentos de roca mineralizada de cada veta formando un total de 491,787 Kg de fragmentos de roca obtenidas del conjunto de vetas.

Al momento de realizar la extracción de los fragmentos de roca se visualizaron los tipos de mineralización y se separaron en dos grupos:

- Primer Lote o Dominio de muestreo: Fragmentos de roca con mineralización de oro tipo sulfuros, un acumulado aproximado de 236,795 Kg. El resultado de análisis mineralógico del compósito de fragmentos indica que le corresponde una mineralización pirita/oro y oro nativo.
- Segundo Lote o Dominio de muestreo: Fragmentos de roca con mineralización de oro tipo cuarzo – sulfuros, con un aproximado de 254,992 Kg. El resultado de análisis mineralógico del compósito de fragmentos indica que le correspondiente una mineralización pirita/oro y electrum.

Luego, mediante tamizado, cada lote se agrupó en 03 tamaños de fracciones, tal como se indica en la Tabla 1:

Tabla 1

Fracción	Grupos de tamaño de muestras (cm)
Fina	Menores a 1.25 cm y mayores a 0.07 cm
Intermedia	Menores a 1.905 cm y mayores a 1.25 cm
Gruesa	Menores a 3.175 cm y mayores a 1.905 cm

Seguidamente, se acondicionó cada lote a fin de obtener una muestra representativa de cada grupo de fracciones con las siguientes pautas:

- Previamente, cada grupo de fracciones se homogenizó en bolsas plásticas hechas de polietileno de alta densidad.
- El material de cada tipo de mineralización se extendió sobre un plástico. A continuación, las partículas se distribuyeron de tal manera que ninguna quede apilada sobre las otras y se encuentren accesibles para ser muestreadas.

- Finalmente, se recolectó al azar y una a una, la misma cantidad de fragmentos gruesos, intermedios y finos.

En resumen, se tomaron las siguientes muestras:

- Para el Primer Lote (mineralización pirita/oro y oro nativo): 52 muestras del grupo de fracciones gruesas, 52 muestras del grupo de fracciones intermedias y 52 muestras del grupo de fracciones finas.
- Para el Segundo Lote (mineralización tipo pirita/oro y electrum): 55 muestras del grupo de fracciones gruesas, 55 muestras del grupo de fracciones intermedias y 55 muestras del grupo de fracciones finas.

Las muestras de cada tipo de mineralización y cada fracción de tamaño se enviaron luego a los laboratorios físicos y químicos para la determinación de la masa y el contenido de oro.

Con los datos de masa y contenido de oro para cada grupo de fracciones (grueso, intermedio y fino) de cada tipo de mineralización y utilizando las ecuaciones (11), (12), (13), (9) y (10), obtendremos IH_L a partir de los parámetros K y α , que definen la heterogeneidad para cada tipo de mineralización.

5.2 Tamaño de los fragmentos

Considerando los datos de la Tabla 1 y ecuación (9):

5.2.1 Cálculo de tamaño nominal de partículas gruesas

Tabla 2

tamiz (cm)	tamiz (cm)	suma de cubos	raiz cubica	d_1 (cm)
3.175	3.2	32.768		
1.905	1.9	6.859		
			19.814	2.706
				2.7

5.2.2 Cálculo de tamaño nominal de partículas intermedias

Tabla 3

tamiz (cm)	tamiz (cm)	suma de cubos	raiz cubica	d_2 (cm)
1.905	1.9	6.859		
1.25	1.2	1.728		
			4.2935	1.6253135
				1.6

5.2.3 Cálculo de tamaño nominal de partículas finas

Tabla 4

tamiz (cm)	tamiz (cm)	suma de cubos	raiz cubica	d_3 (cm)
1.25	1.2	1.728		
0.07	0.1	0.001		
			0.8645	0.9526243
				1

5.3 Resultados experimentales de IH_L

5.3.1 Resultados del Primer Lote

Tabla 5

N°	IH _L GRUESO	IH _L intermedio	EST.IH _L FINOS
1	24.03	5.13	1.30
2	24.89	5.81	0.80
3	26.81	6.14	1.07
4	24.30	4.51	0.90
5	29.34	5.29	1.39
6	23.63	5.04	1.12
7	22.60	4.87	1.13
8	22.29	5.04	1.66
9	27.66	5.10	0.60
10	29.01	5.60	0.90
11	23.47	5.79	1.23
12	24.84	5.90	1.44
13	22.31	5.18	1.88
14	20.69	5.10	1.51
15	26.58	5.12	0.95
16	22.84	5.50	2.18
17	25.12	6.26	1.70
18	24.23	5.01	1.55
19	29.50	5.12	1.18
20	22.02	5.50	1.22
21	24.79	5.62	0.90
22	21.79	4.96	1.06
23	21.27	5.25	1.57
24	24.20	5.24	0.70
25	26.08	5.11	1.04
26	24.59	5.77	1.70
27	23.82	5.62	0.69
28	25.14	5.03	1.30
29	23.17	5.11	2.54
30	24.36	4.01	2.01
31	27.10	4.81	0.99
32	26.92	4.60	1.11
33	21.22	5.23	0.39
34	28.28	5.28	1.01
35	23.69	3.89	1.15
36	27.84	5.09	1.28
37	27.84	5.54	1.30
38	21.60	5.17	1.60
39	21.73	4.99	1.40
40	27.64	6.41	1.02
41	26.44	5.27	1.60
42	21.39	6.63	1.43
43	24.40	3.64	0.67
44	24.99	3.36	1.12
45	24.02	5.60	1.01
46	21.98	5.03	1.09
47	24.25	3.40	1.68
48	24.53	5.81	1.70
49	25.15	5.49	1.01
50	23.89	5.32	1.00
51	27.12	4.13	1.53
52	24.16	3.83	1.50
53	24.54	5.55	1.30
54	27.63	5.49	1.07
55	27.13	4.91	0.91
	748.50	155.8	38.0

5.3.2 Resultados del Segundo Lote

Tabla 6

N°	IH _L GRUESO	IH _L intermedio	IH _L finos
1	19.97	3.40	0.78
2	19.09	3.30	0.61
3	14.69	3.60	1.31
4	13.97	1.02	0.44
5	14.63	3.01	0.60
6	14.99	1.10	0.79
7	14.29	4.60	0.92
8	14.71	5.30	0.53
9	14.41	1.29	0.75
10	14.46	1.65	0.67
11	14.92	3.80	1.14
12	14.55	3.10	0.73
13	17.96	3.73	0.69
14	14.21	1.31	1.20
15	14.14	4.10	1.26
16	16.62	1.16	0.74
17	18.37	3.50	0.75
18	14.61	3.90	0.76
19	14.56	3.01	0.97
20	17.39	1.03	0.69
21	15.73	1.13	0.84
22	14.59	1.09	0.89
23	14.45	3.90	1.54
24	14.61	3.40	1.60
25	16.25	3.50	0.65
26	12.91	1.90	0.52
27	14.17	3.10	0.56
28	14.04	5.90	0.74
29	14.54	3.05	0.50
30	14.91	1.32	0.75
31	19.09	1.90	0.75
32	14.94	3.40	0.72
33	15.36	1.09	0.78
34	19.34	3.10	0.94
35	13.61	5.45	0.77
36	14.55	3.70	0.52
37	12.20	3.50	0.64
38	16.88	3.20	0.83
39	14.95	3.70	0.87
40	14.31	3.25	0.81
41	17.21	3.69	0.71
42	14.08	3.47	0.90
43	15.09	3.33	0.26
44	16.06	7.40	0.79
45	14.56	3.02	0.90
46	19.10	3.34	0.81
47	12.33	6.10	0.83
48	17.21	5.90	0.51
49	12.32	2.22	0.66
50	15.29	3.36	0.60
51	16.72	3.52	0.70
52	16.04	3.70	0.50
	440.0	91.6	22.4

5.4 Resultado experimental de parámetro K y α

5.4.1 Mineralización tipo pirita/oro y oro nativo

A continuación, la aplicación de resultados de I_{HL} de los grupos gruesos, intermedios y finos para valuación de parámetros "K" y " α " para Mineralización pirita/oro y oro nativo:

Tabla 7

Grupos	di	I_{HL}	Definición	Cálculo	α
Gruesos	2.7	440.0	$K*(2.7)^\alpha$	$(22.4)*(2.7)^\alpha$	3
Intermedios	1.6	91.6	$K*(1.6)^\alpha$	$(91.6)*(1.6)^\alpha$	3
Finos	1	22.4	$K*(1)^\alpha$	22.4	

Para $I_{HL} = Kd^3$, se obtendrán los siguientes resultados:

Tabla 8

Grupos	d (cm)	K	d^3	Kd^3
Gruesos	2.70	22.4	19.7	440.0
Intermedios	1.6	22.4	4.1	91.6
Finos	1	22.4	1.0	22.4

Los resultados de I_{HL} , la varianza del error fundamental para cada tamaño nominal d y masa M de las muestras conforme a la mineralización pirita/oro y oro nativo, se muestran en el siguiente Tabla 9:

Tabla 9

d (cm)	K	I_{HL}	M (g)	S^2_{FSE}
2.70	22.4	440.0	5000.0	0.08800
2.54	22.4	366.3	4408.5	0.08310
2.22	22.4	244.6	3758.5	0.06508
1.91	22.4	155.8	3513.2	0.04434
1.25	22.4	43.7	3066.4	0.01424
0.63	22.4	5.6	2363.1	0.00237
0.34	22.4	0.9	1682.4	0.00052
0.20	22.4	0.2	1272.0	0.00014
0.17	22.4	0.1	1036.6	0.00011
0.07	22.4	0.01	965.9	0.00001

5.4.2 Mineralización tipo pirita/oro y electrum

Tabla 10

Grupos	di	I_{HL}	Definición	Cálculo	α
Gruesos	2.7	748.5	$K*(2.7)^\alpha$	$38*(2.7)^\alpha$	3
Intermedios	1.6	155.8	$K*(1.6)^\alpha$	$38*(1.6)^\alpha$	3
Finos	1	38.0	$K*(1)^\alpha$	38	

Para $I_{HL} = Kd^3$ se obtendrán los siguientes resultados:

Tabla 11

Grupos	d (cm)	K	d^3	Kd^3
Gruesos	2.70	38.0	19.7	748.5
Intermedios	1.6	38.0	4.1	155.8
Finos	1	38.0	1.0	38.0

Los resultados de I_{HL} , la varianza del error fundamental para cada tamaño nominal d y masa M de las muestras conforme a la mineralización tipo pirita/oro y electrum, se muestran en el siguiente Tabla 12:

Tabla 12

d (cm)	K	I_{HL}	M (g)	S^2_{FSE}
2.70	38.0	748.5	5000.0	0.14971
2.54	38.0	623.2	4256.7	0.14640
2.22	38.0	416.1	3650.1	0.11399
1.91	38.0	265.0	3277.4	0.08085
1.60	38.0	155.8	3000.0	0.05192
1.25	38.0	74.3	2564.3	0.02897
1.00	38.0	38.0	2000.0	0.01902
0.63	38.0	9.51	1650.1	0.00576
0.34	38.0	1.49	1094.9	0.00137
0.20	38.0	0.30	875.8	0.00035
0.17	38.0	0.19	749.9	0.00025
0.07	38.0	0.01	711.2	0.00002

Observación: El resultado K = 38 finalmente se considera como constante de muestreo por corresponder a la mayor heterogeneidad intrínseca de la mineralización.

5.5 Optimización del Protocolo de muestreo en interior mina

5.5.1 Protocolo de muestreo antes de su optimización

En la Tabla 13 se presenta el detalle del protocolo de muestreo antes de su optimización: desde el muestreo de canales hasta la muestra pulverizada.

Tabla 13

Proceso	d (cm)	Peso de la muestra (g)	Varianza Relativa S_{FSE}^2	Cambio ΔS_{FSE}^2	Error Relativo (%)
Muestreo de canales	4.000	4,000.00	0.6084800	0.6084800	78%
Chancado primario	0.635	4,000.00	0.0024344		
Chancado secundario	0.200	4,000.00	0.0000761		
Cuarteo	0.200	300.00	0.0010141	0.0009381	3%
Pulverizado	0.011	300.00	0.0000002		
TOTAL			0.6120047		81%

El Gráfico 1 presenta el protocolo de muestreo en canales (Nomograma S_{FSE}^2) es el siguiente:

Proceso	d (cm)	Peso de la muestra (g)	Varianza Relativa del σ_{FSE}^2	Cambio $\Delta \sigma_{FSE}^2$	Error Relativo (%)
Muestreo de canales	2.100	4,000.00	0.0880490	0.0880490	30%
Chancado primario	0.635	4,000.00	0.0024344		
Chancado secundario	0.200	4,000.00	0.0000761		
Cuarteo	0.200	300.00	0.0010141	0.0009381	3%
Pulverizado	0.011	300.00	0.0000002		
TOTAL			0.0915737		33%

El Gráfico 2 presenta el protocolo de muestreo en canales (Nomograma S_{FSE}^2) es el siguiente:

Gráfico 1

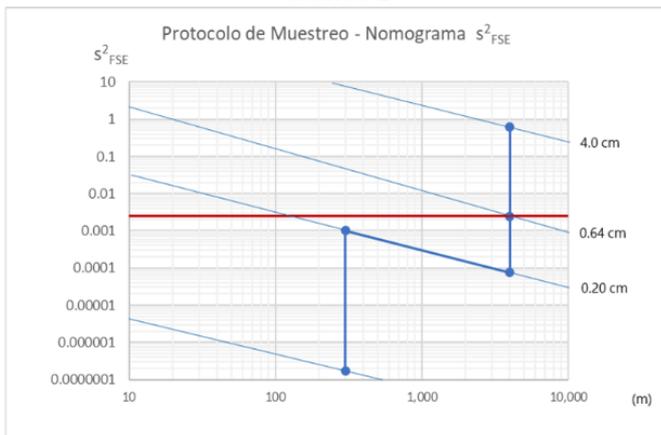
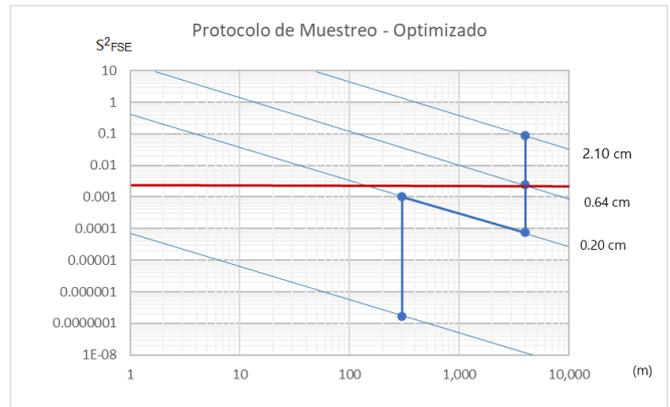


Gráfico 2



En la Tabla 11 el error relativo de muestreo es 78%, encontrándose fuera del rango de aceptación (error relativo aceptable 30%). Por lo tanto, se tienen dos alternativas: reducir el tamaño nominal de los fragmentos manteniendo el peso de la muestra en 4 Kg, o aumentar el peso de la muestra manteniendo un tamaño nominal de los fragmentos en 4 cm.

Se observa que los errores relativos de la preparación de muestra se encuentran por debajo de la línea de seguridad de color rojo (establecido en 5%), por lo que no requieren optimización.

5.5.2 Optimización del protocolo de muestreo en interior mina

Para optimizar el protocolo se considera la opción de reducir el tamaño nominal de las fracciones de la muestra obtenida, de 4.0 cm a 2.1 cm, manteniendo el peso de la muestra en 4 Kg, a fin de disminuir el error relativo de 78% a 30%.

Los procesos de preparación de muestras no requieren optimizarse porque se encuentran por debajo de la línea de seguridad (establecido en 5%).

Se observa en el Gráfico 3 que el error total del protocolo optimizado es 33% (antes 81%).

5.6 Optimización del Protocolo de muestreo en cancha

5.6.1 Protocolo de muestreo en cancha antes de su optimización.

La Tabla 15: Protocolo de muestreo en superficie, previo a su optimización.

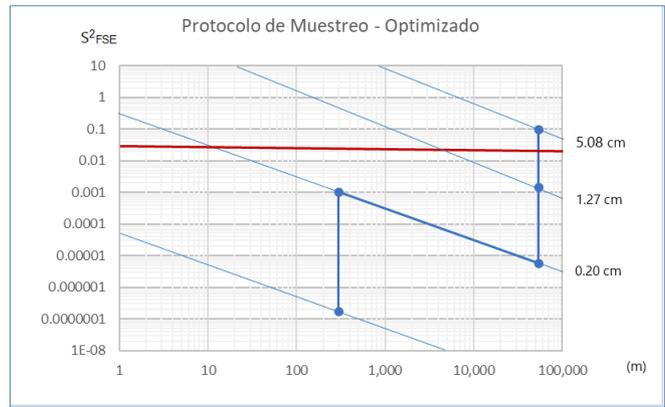
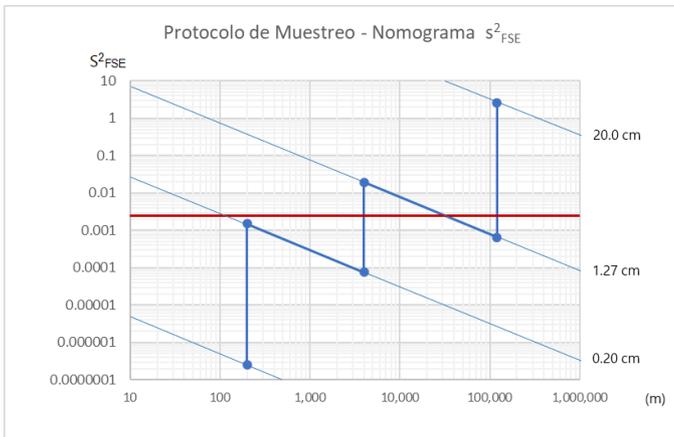
Tabla 15

Proceso	d (cm)	Peso de la muestra (g)	Varianza del F σ_{FSE}^2	Cambio $\Delta \sigma_{FSE}^2$	Error Relativo (%)
Muestreo en Cancha	20.00	120,000	2.5353333	2.5353333	159%
Chancado primario	1.27	120,000	0.0006492		
Cuarteo	1.27	4,000	0.0155800	0.0149308	14%
Chancado secundario	0.20	4,000	0.0000608		
Cuarteo	0.20	300	0.0010141	0.0009533	4%
Pulverizado	0.011	300	0.0000002		
TOTAL			2.5526377		174%

Gráfico 3: Nomograma S_{FSE}^2 sin optimizar:

Tabla 14: Protocolo de Muestreo Optimizado

Tabla 14



El error relativo de muestreo del mineral en superficie es 159 %, encontrándose fuera del rango de aceptación. Por tanto, la optimización del protocolo de muestreo consistirá en disminuir el error relativo a 30% para estar dentro del rango aceptable. El cuarteo de la muestra tiene un error relativo de 14% por lo que se encuentra por arriba de la línea de seguridad establecida en 5%, por lo que deberá ser optimizado para mantener un nivel de precisión aceptable.

5.6.2 Optimización del Protocolo de muestreo en superficie

Para optimizar el protocolo, se deberá considerar la opción de acondicionamiento de las cargas mediante mecanismos de conminución y extendido de la carga para disminuir el error relativo de 159% a 30% (error relativo aceptable). La alternativa es reducir el tamaño nominal de los fragmentos del mineral descargado de 20 cm a 5.08 cm, considerando una distribución granulométrica uniforme (ver Tabla 16).

Tabla 16

Proceso	d (cm)	Peso de la muestra (g)	Varianza Relativa S ² _{FSE}	Cambio ΔS ² _{FSE}	Error Relativo (%)
Muestreo en Cancha	5.08	54,000	0.092359	0.092359	30%
Chancado primario	1.270	54,000	0.0014426		
Chancado secundario	0.200	4,000	0.0000056		
Cuarteo	0.200	300	0.0010141	0.0010085	3%
Pulverizado	0.011	300	0.0000002		
		TOTAL	0.0094788461		33%

El Gráfico 4 presenta el protocolo de muestreo optimizado (Nomograma S²_{FSE}) es el siguiente:

Gráfico 4

En el Gráfico 4 se observa que el proceso de preparación de muestras ha sido optimizado con un proceso de molienda previa a la realización del cuarteo.

6. Conclusiones

Conforme a los resultados del Test de Heterogeneidad, la mineralización de pirita/oro y electrum es la que presenta mayor heterogeneidad, siendo K = 38 la constante de muestreo que genera la varianza relativa a considerar en el proceso de optimización.

Se presentan los pesos óptimos para los muestreos en canales y muestreo de mineral en cancha, para mantener los Errores relativos en 30% (*).

Tabla 17

Proceso de Muestreo	Tamaño Nominal de fragmentos d (cm)	Peso de la muestra (g)	Varianza relativa del FSE (S ² _{FSE})	Error relativo (%)
Muestreo de Canales en interior mina	2.10	4,000	0.0880490	30%
Muestreo de mineral de mina en Cancha	5.08	54,000	0.092359	30%

El control del tamaño nominal máximo de los fragmentos y el peso de la muestra para ambos tipos de muestreo es de necesidad básica para evidenciar de que se mantiene el nivel de precisión aceptable.

(*). Error relativo aceptable. QA/QC en la Exploración Geológica. Dr. Armando Simón, Geólogo Principal AMEC

La optimización del muestreo en canales deberá considerar un control del diámetro máximo de los "chips" para mantener el error a un nivel aceptable. Se recomienda usar fragmentadores de chips para disminuir los tamaños de chips mayores, sin perder frágiles ni deleznable (Canchaya 2018).

La optimización del muestreo se orienta a la reducción de la variabilidad y la no introducción de sesgo debido a errores de tipo circunstancial, como son la falta de destreza al momento de extraer las muestras con un

menor volumen de fragmentos extraídos de rocas conformado por minerales de alta dureza y mayor volumen de fragmentos extraídos del mineral de baja dureza. Se establecerán controles de calidad a fin de mantener un estándar de muestreo conformado por volumen de fragmentos uniforme.

6.1 Conclusiones de muestreo en interior mina

6.1.1 Se deberán establecer medidas correctivas a los equipos y herramientas de muestreo, a fin de evitar la introducción de sesgo por pérdida de fragmentos cuando las partículas frágiles se dispersan en el aire y las deleznales se pierden en el piso. Es posible realizar un control del error de extracción evaluando el riesgo de sesgo debido a fragmentos que no aparecen en la muestra.

6.1.2 La introducción de sesgo debido a la contaminación de la muestra también deberá ser considerado, teniendo en cuenta que se origina principalmente por desprendimiento de fragmentos de paredes y techo que caen e ingresan a la muestra. Por lo tanto, deberán realizarse las mejoras en el desatado de rocas y en cubrir/proteger las muestras de una forma efectiva.

6.1.3 Una alternativa para la optimización del protocolo de muestreo es el uso de una cortadora de disco diamantado en lugar del rotomartillo. De esta manera, se obtendrían “testigos” (lajas) y no “chips” de rotomartillo (material fragmentado) con lo cual la varianza de error fundamental tendría incidencia a partir de la fragmentación con la chancadora. Además, se eliminan los errores de sesgo ya que no habría pérdidas de frágiles ni de deleznales.

6.1.4 Con la reducción del tamaño máximo nominal, otros parámetros relacionados como el factor de distribución granulométrica, se reducen también.

6.1.5 Una característica del error fundamental FSE es que disminuye muy rápidamente cuando el tamaño nominal se reduce, y no tan rápidamente cuando la masa de la muestra aumenta. No obstante, nunca se puede eliminar, independientemente de los procedimientos de trituración y homogeneización utilizados.

6.1.6 Sin embargo, la alternativa de reducir el error de muestreo incrementando la masa de las muestras se tendría que evaluar considerando la RM N°375-2008-TR en su anexo 1 del numeral 6: “Cuando las cargas sean mayores a 25kg para varones y 15kg para mujeres, el empleador favorecerá la manipulación de cargas

utilizando ayudas mecánicas”. Por lo que será necesario disminuir de 5 a 3 muestras (el máximo para varones), así como de 3 a 2 el máximo para mujeres.

6.1.7 Es importante señalar que el Test de Heterogeneidad evaluado arroja resultados $IH_L = Kd^3$ para dos tipos de mineralización encontrado. Para el caso del mineral pirita/oro y oro nativo, la Heterogeneidad Intrínseca IH_L es menor que IH_L correspondiente a la mineralización de pirita/oro y electrum, por lo que se considera la mayor heterogeneidad para fines de optimización.

6.2. Conclusiones de muestreo en Canchas

6.2.1 El mineral de mina descargado en cancha presenta fracciones de roca de dimensiones muy grandes (mayor a 4 pulgadas) y una variada distribución de tamaño de fragmentos (gruesos, medios y finos). Actualmente, el peso de la muestra extraída es de 120 Kg, por lo que, si el tamaño nominal de las fracciones es de 20 cm, el error relativo es 159%.

6.2.2 Un error de muestreo de 159% no es aceptable, por lo que si se reduce el tamaño nominal de las fracciones de 20 a 5.08 cm, disminuiría el error de muestreo a 30% con un menor peso de la muestra en 54 Kg. Esta optimización es ideal; sin embargo, es difícil de conseguir. No obstante, los resultados del muestreo de este tipo de dominios por lo general son utilizados de manera referencial y si se llegara a optimizar, se podrían utilizar para realizar en mezclas.

6.2.3 La realización del muestreo de mineral en Cancha sin acondicionamiento de la carga origina un alto error fundamental. Así como, errores de delimitación, errores de extracción de incrementos y sesgo, siendo las siguientes complicaciones las más críticas:

6.2.3.1 Presencia de fragmentos gruesos (de dimensiones decimétricas que al descargar ruedan y se concentran en la base de la ruma), fragmentos intermedios (no clasificable y en mayor proporción) y fragmentos finos (no uniformes hasta polvo de roca), que impiden realizar su homogeneización, por lo que la formación de camas para muestreo no facilitará la generación de muestras representativas.

6.2.3.2 Los fragmentos gruesos (de dimensiones decimétricas con algunos contenidos de cuarzo o muy silicificados) no son considerados al tomar los incrementos, con lo cual se induce al sesgo en el muestreo.

6.2.4 El actual protocolo de preparación de muestras de mineral de mina considera un chancado a ½ pulgada (1.27 cm) y un cuarteo con divisor Rifle, por lo que la muestra de 120 Kg. se divide en dos muestras de 60 Kg. El error relativo en este proceso es de 14% (error relativo muy alto respecto al 5% fijado como límite).

6.2.5 Los procedimientos de preparación de muestras deberán ser revisados para considerar los errores asociados con cada reducción de tamaño de las partículas (chancado primario, chancado secundario y pulverizado) y los pesos óptimos de las muestras resultantes de los procesos de división o cuarteo, los cuales deberán ser previamente validados.

6.2.6 Se deberá revisar si los equipos cumplen con las especificaciones técnicas requeridas, para evitar la introducción de errores que inducen al sesgo, tales como cuarteadores que originan segregación o cuyas dimensiones no se ajustan al tamaño de los fragmentos.

6.2.7 Los controles de calidad utilizados al preparar las muestras en el laboratorio de mina (para muestras obtenidas de canales en interior mina) y en la preparación de muestras en la muestrera de Cancha (para muestras de mineral descargado en Cancha) deberán ser modificados por controles establecidos conforme a los errores asociados a la mineralogía de las vetas, eliminando los que no tienen sustento técnico.

Agradecimientos

A la Gerencia de la División Metales y Minerales de Bureau Veritas Perú.

A la Gerencia de Desarrollo de Negocios de la División Metales y Minerales de Bureau Veritas Perú.

Al Laboratorio Primario LPG – Chorrillos de Bureau Veritas Perú.

Al Laboratorio de Metales y Minerales de Bureau Veritas Perú.

Referencias

Merks, J.W. (1986) Sampling and Weighing of Bulk Solids, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld.

Gy P. (1992) Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems. Theories of Heterogeneity, Sampling and Homogenizing. - Elsevier, New York.

Huapaya I. (2007) Optimización de Preparación de muestras geoquímicas – XXVIII Convención Minera – Extemin 2007 – Arequipa, 10 al 14 de Setiembre.

Huapaya I. (2011) Quality control for minerals sampling with PGAAN - 5th World Conference on Sampling and Blending. Santiago de Chile, 25 al 28 de Octubre del 2011; 7p.

Canchaya S. (2008) El Modelo Geometalúrgico. - XIV Congreso Peruano de Geología y XIII Congreso Latinoamericano de Geología. Lima 29 de Set. a 3 de Octubre, 2008: 6 p.

Canchaya S. (2011) QA/QC in mining reality or fantasy? - 5th World Conference on Sampling and Blending. Santiago de Chile, 25 al 28 de Octubre del 2011; 7p.

Canchaya S. (2017) Unidades Geometalúrgicas (UGMs) vs. Modelo Geometalúrgico de Bloques (MGMB). - PROCEMIN y GEOMET 2017. Sgo. de Chile; 4 al 6 de Octubre del 2017.

Canchaya S. (2019) Geometallurgical block model based on mineralogical-textural assemblages (MTA) and geological fragmentation units (GFU). - Procemin – GEOMET 2019; Santiago de Chile, 20 al 22 de Nov. 2019.

Canchaya S. (2020) Taller de campo de Muestreo y QA/QC. - Setiembre del 2020. Resort Kankay-Cieneguilla-Lima. Módulo II.

Minnitt R., Rice P.M. & Spangenberg C. (2007) Understanding the components of the fundamental sampling error. - The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. August 2007.

Pitard F.F. (2018) Una Guía de Sistemas de Muestreo y Protocolos de Muestreo para minimizar problemas de reconciliación entre Geólogos, Mineros y Metalurgistas. I International Congress on Minerals Sampling – Muestreo 2018. Lima, October 25 – 26, 2018

Francois-Bongarcon D. (2018) Teoría del Muestreo Cuantitativo: Factor de Liberación, Factor de Forma y Factor Granulométrico. I International Congress on Minerals Sampling. Lima, October 25 – 26, 2018.

Esbensen, K. H. (2018) El Poder Universal de la Teoría de Muestreo (TOS) en la Práctica. I International Congress on Minerals Sampling. Lima, October 25 – 26, 2018

Arroyo D. (2018) El Efecto Nugget en la Simulación Geoestadística. I International Congress on Minerals Sampling. Lima, October 25 – 26, 2018

Pitard M. A. (2018) Una Caja de Herramienta de Software Esencial Basado en la Teoría de Muestreo. I International Congress on Minerals Sampling. Lima, October 25 – 26, 2018

Pitard F.F. (2018) La Superioridad de un Sistema de Muestreo de Cono Proporcional en Línea Equiprobabilístico para el Balance del Material y el Control de Proceso. I International Congress on Minerals Sampling. Lima, October 25 – 26, 2018

Dr. Armando Simon, Geólogo Principal AMEC Internacional. Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica. Santiago, Chile.

Cánepa C., Determinación microscópica del grado de liberación de los minerales: Edición 1989, editorial ISSN Lima- Perú, Vol 79, pp 91-110.

Nombre del autor (1): Israel Huapaya Caballa
Cargo: Gerente Técnico
Empresa: Bureau Veritas
Correo electrónico: israel.huapaya@bureauveritas.com
Teléfono / Celular: +51 922 130 005
Dirección: Av. Elmer Faucett 444 – Bellavista - Callao
Perfil: Lic. en Ciencias Físicas – Maestría en Geofísica Nuclear – Diplomado en Geometalurgia

Nombre del coautor (2): Juan Crisóstomo Ramos
Cargo: Jefe Ore Control
Empresa: Bureau Veritas
Correo electrónico: Juan.crisostomo@bureauveritas.com
Teléfono / Celular: +51 972 237 437
Dirección: Av. Elmer Faucett 444 – Bellavista – Callao
Perfil: Geólogo de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Pasco

Nombre del coautor (3): Dalia Valladolid Cruz
Cargo: Ejecutivo de Desarrollo de Negocios
Empresa: Bureau Veritas
Correo electrónico: dalia.valladolid@bureauveritas.com
Teléfono / Celular: +51 967 781 719
Dirección: Av. Oscar R. Benavides 3866, Torre EC 01-3A,
Perfil profesional: Ingeniero Geólogo – Universidad Nacional de Piura