

MODELAMIENTO INTEGRAL DE LA VOLADURA EN TAJO

Abel E. Anchorena López¹

MINERS COMPANY

eduardo.anchorena@minersco.com

Rubén Vereau Miranda²

MINERS COMPANY

ruben.vereau@minersco.com

RESUMEN

Este trabajo es una actualización del modelo predictivo de fragmentación de voladura (PERUMIN 2015) el cual simula la curva granulométrica que se desea obtener. Con el Modelamiento Integral de la Voladura, se realiza una mejora en el grado de certeza de la curva granulométrica simulada, obteniendo predicciones hasta de 99.5%

El estudio propone una Metodología de Zonificación basado en los ajustes de tipo no lineal de los Índices de Volabilidad, los cuales son calculados para cada dominio geo estructural de una Mina.

El punto de partida es la elaboración de un Modelo Matemático *ad hoc*, del yacimiento, sobre el cual se estiman los valores de los Índices de Volabilidad, para cada dominio geo estructural, encontrando una tendencia entre dichos valores y los tamaños de fragmento obtenidos de la curva granulométrica.

La confiabilidad se expresa como la bondad de ajuste entre la predicción del modelo y los valores medidos (utilizando algún sistema de estimación). Los resultados del análisis muestran un incremento promedio de 3% a 4% en el coeficiente de determinación de la curva granulométrica simulada, haciéndola más confiable.

En el Modelo Predictivo (MP) *ad hoc*, desarrollado para una mina, la bondad de ajuste se encuentra entre 95% y 99%. En el Modelo Predictivo Zonificado (MPZ), la bondad de ajuste se encuentra entre 98% y 99.5%.

Los beneficios estimados solo por ahorro de perforación y voladura son aproximadamente de 50,000 USD/mes, siendo la mayor contribución del modelamiento el incremento de la productividad de los equipos de carguío y acarreo así como en la producción de Planta.

Los datos mostrados en el estudio pertenecen a una mina de oro ubicada en los Andes peruanos.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en las operaciones mineras la innovación tecnológica es parte fundamental de los procesos, la búsqueda constante de nuevas alternativas, aquellas que generen los mayores beneficios en un corto tiempo, son cada vez más indispensables en las operaciones.

Los Diseños de Voladura elaborados a partir de un Modelo predictivo *ad hoc*, son una herramienta poderosa para la toma de decisiones, debido a la confiabilidad y flexibilidad que proporciona, siendo una de sus principales virtudes la sostenibilidad de la fragmentación en el tiempo, así como un aprovechamiento eficiente de los recursos con los que cuenta la mina.

Este estudio aporta una mejora al modelo *ad hoc* y se basa en incorporar las características de una zonificación geo-estructural a la variable denominada como Índice de Volabilidad, para obtener ajustes casi perfectos de las curvas granulométricas.

Es importante precisar que a pesar de la cantidad de variables aleatorias con las que se elaboran los modelos matemáticos de voladura, desarrollando un Modelo Predictivo Zonificado es posible reducir considerablemente el margen de error en la predicción y en la estimación de los costos asociados al proceso.

Los resultados obtenidos en la Mina de oro (para la cual se realizó el estudio) muestran una sostenibilidad de la fragmentación en el tiempo, los datos se presentan más adelante (Gráfico 4). Así mismo en los resultados mensuales de la Mina se aprecia lo siguiente: reducción significativa en los costos de perforación y voladura, incremento en la producción a chancadora y una mejora en la productividad de los equipos de mina.

Las mejoras en los procesos de una mina están fuertemente relacionados con la calidad de material que se obtiene de la voladura. El impacto positivo o negativo de la fragmentación repercutirá en el resto del sistema. Únicamente midiendo la fragmentación podemos cuantificar su aporte en la cadena de valor.

II. MARCO TEÓRICO

Es conocido que en ocasiones se utiliza la experiencia de los explosivos como base para los diseños de voladura, se realizan algunos ajustes con la finalidad de interpretar al macizo rocoso, siendo en muchos casos poco exitosos y a un costo operativo alto. Otra forma de obtener los diseños de voladura es empleando variables como: la resistencia compresiva y la densidad de la roca, la densidad del explosivo y su energía, el diámetro del pozo, la altura del banco, etc. y posteriormente aplicar modelos determinísticos como: Ash, Konya, López Jimeno, etc. Dichas ecuaciones no entregan como respuesta una estimación de la curva granulométrica, la cual debería ser el producto final esperado.

Un paso más adelante se encuentran los modelos matemáticos tipo: *Kuz-Ram* (Claude Cunningham 1983). “*The Crush-Zone*” del JKMRC (Kanchibotla et al., 1999), por citar los más conocidos, los cuales incorporan las propiedades del explosivo, así como un conocimiento más detallado del macizo rocoso y de cómo la interacción de ambos criterios influyen en la fragmentación de la roca.

La aplicación de softwares específicos en los diseños de voladura nos da cierta tranquilidad, una percepción de que estamos aplicando tecnología para obtener resultados más precisos, lo cual es positivo. Sin embargo muchas veces tratamos de adecuar la mina a un software, lo cual no es correcto, caemos en ajustes sin fundamento técnico con tal de obtener resultados razonablemente cercanos.

En consecuencia la incertidumbre produce sobre costos para corregir desviaciones en la fragmentación requerida por la operación. En esta coyuntura surge la propuesta de elaborar una metodología innovadora que parte del concepto de que cada mina es una realidad distinta, la cual debe ser conocida, analizada y posteriormente modelada con la finalidad de proponer cambios en los diseños que generen beneficios a los diferentes clientes que tiene la operación.

Recordemos que el punto de partida en ciclo productivo es la voladura, siendo su entregable el material fragmentado, el cual repercutirá positiva o negativamente en los demás procesos.

III. METODO DE SOLUCIÓN

Los datos de Mina deben marcar el rumbo del modelamiento. De los modelos matemáticos tradicionales se puede observar que es necesario utilizar una función descriptora de fragmentación, también se debe hallar los parámetros de la curva en función de las variables de voladura mediante un conocimiento certero del explosivo y del macizo rocoso.

Finalmente la formulación del modelo se expresa mediante una función descriptora con parámetros calculados a partir de variables de voladura, los cuales presentan factores y exponentes provenientes de cálculos realizados empleando los datos de Mina (Data Experimental).

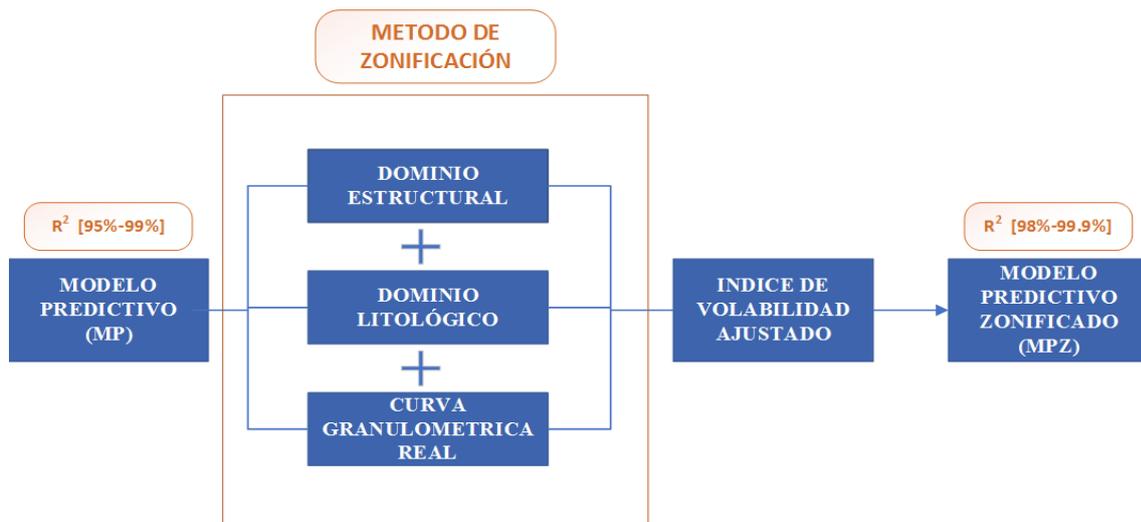
Zonificar el Modelo *ad hoc*, consiste en ajustar los Índices de Volabilidad a los dominios geo estructurales con los que cuenta la mina y modelar voladuras futuras utilizando esos valores determinados en el ajuste.

El estudio se ha dividido en dos partes:

- Elaboración del Modelo Predictivo de Fragmentación.
- Zonificación del Tajo por Índices de Volabilidad Geo-Estructurales.

A continuación se ha elaborado un diagrama de flujo de la metodología propuesta:

Diagrama 1: Estructura del Modelo Predictivo Zonificado



1. MODELO PREDICTIVO AD HOC DE FRAGMENTACIÓN

En los modelos tradicionales, los parámetros de las funciones son estimados por ecuaciones del tipo: *V.M. Kuznetsov* (tamaño medio) o *Chung Katsabanis* (percentil ochenta), así mismo incorporan el Índice de Volabilidad con la finalidad de darle un sentido físico al fenómeno y finalmente proponen un cálculo para el exponente de la función.

Con respecto al exponente de las funciones descriptoras se puede decir que ha sido poco estudiado, por lo general son adecuaciones de lo que *Claude Cunningham* denominó como índice de uniformidad, una de sus modificaciones más recientes la realizó en *The Kuz Ram Fragmentation Model -20 years on, proc. 3rd EFEE World Conf. On Explosives and Blasting, Brighton, 2005*. Donde el exponente depende de la dispersión de los detonadores y es multiplicado por un factor de 1.2 para dispersión cercana a cero (detonadores electrónicos).

La mala noticia respecto al índice de uniformidad es que no existe ninguna teoría ni experimentación mínima congruente, que diga que la uniformidad de la granulometría deba depender solo de los datos geométricos de la voladura, es imperativo estimar los tamaños de fragmento cuando existan datos físicos que lo apoyen.

El modelo *Ad hoc* elaborado para una mina incorpora las ecuaciones de los tamaños de fragmento con los cuales se calcula el exponente de la función, con este método de cálculo se ha superado las deficiencias que presentan modelos del tipo *Kuz Ram*.

José Sanchidrián (2013), analizó 1234 curvas de fragmentación, todas fueron elaboradas mediante procesos de pesaje y cribado (mejorando la exactitud en la medida). Los resultados de las diferentes funciones los somete a numerosas rutinas de análisis estadístico.

Entre las funciones analizadas por *Sanchidrián* se encuentran: *Weibull Rosin Rammler Ordinaria*, *Weibull Rosin Rammler Truncada*, *Grady*, *Log normal*, *Log-Logística*, *Gilvarry*, *Swebrec*, entre otras. Algunas de las conclusiones del estudio son:

- Funciones de tres parámetros como: *Weibull Rosin Ramler Truncada* o la *Swebrec (Finn Ouchterlony)*, son en muchos casos mejores que las funciones bi componentes, pudiendo usarse hasta pasantes de 8% a 10%.
- La función *Weibull Rosin Rammler Ordinaria* (utilizada en Kuz Ram) presenta buen ajuste en la zona central de la curva granulométrica (pasantes entre 20%-80%).

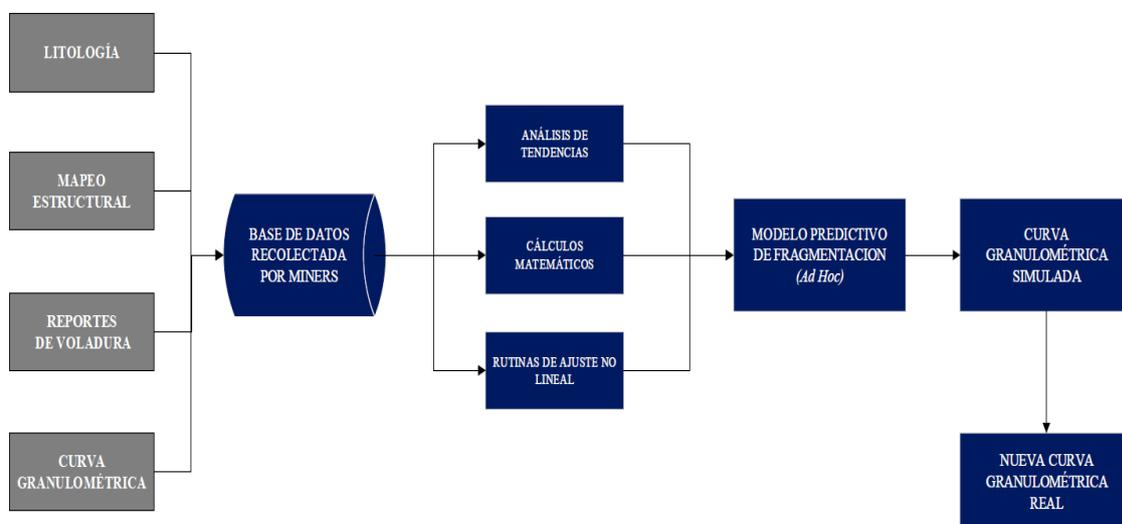
La metodología que propone este estudio cambia todos los conceptos anteriormente expuestos, dando un sentido realmente físico al modelo, lo que se traduce en curvas simuladas precisas y confiables.

La elaboración del Modelo Predictivo ad hoc para una mina tiene las siguientes etapas:

- Recopilación de Información.
- Método de Trabajo: Cálculos Matemáticos-Análisis de Tendencias-Rutinas de Ajustes No Lineales.
- Obtención del Modelo *ad hoc* para la Mina.
- Pruebas de bondad de ajuste $R^2 > 95\%$.

A continuación se presenta un diagrama de flujo donde se aprecia la secuencia y la metodología del proceso para elaborar el Modelo *ad hoc* y validar los resultados.

Diagrama 2: Estructura de la Metodología del Modelo Predictivo *ad hoc*



1.1.Litología y Mapeo Estructural

La litología de un yacimiento y el conocimiento de las estructuras predominantes conforman la variable más importante del modelo matemático debido a que cuantifica las propiedades del macizo rocoso para efectos de voladura.

En la literatura relacionada a modelos de voladura se puede encontrar varios estudios al respecto, entre los más conocidos se encuentran: el Índice de Volabilidad de *Lilly (1986)*, El Factor de Roca de *Claude Cunningham (1987)* este último es una modificación de *Lilly* con más peso en la dureza de la roca.

La manera como realizar el ranking es ampliamente conocida y su desarrollo no forma parte del trabajo, sin embargo es necesario precisar que es posible estimar los factores que multiplican de las ecuaciones con la finalidad de lograr un modelo exacto.

Las ecuaciones de *Cunningham* y *Lilly* respectivamente son las siguientes:

- Factor de Roca (A) = $0.06*(RMD+RDI+HF)$, donde: $RMD = JPS + JPO$
- $BI=0.5*(RMD+JPS+JPO+SGI+RSI)$

En estos casos se debe estimar los valores que reemplazarán el 0.06 y 0.5, este cálculo se realiza con los datos experimentales de Mina y los ajustes no lineales a la ecuación del tamaño de fragmento.

Donde:

- RMD : Descripción del Macizo Rocosos
- JPS : Espaciamiento de las Juntas
- JPO : Orientación de las Juntas
- SGI : Ecuación en Función de la Densidad de la Roca
- RSI : Ecuación en Función de la Resistencia de la Roca

Existen otras ecuaciones para estimar el Índice de Volabilidad, pero mayormente provienen de las ecuaciones mostradas anteriormente, también existe en la literatura otros artículos que proponen otros métodos de cálculo para este valor, es preferible utilizar aquellos que poseen una base científica probada. Lo importante es incorporar en el modelo un solo método de cálculo para todos los registros, de lo contrario estaríamos valorizando el macizo rocoso con escalas diferentes.

1.2. Reportes de Voladura

Es la información del carguío del proyecto volado, lo que realmente se hizo en el campo. Los datos que se registran son: Id del taladro, Kg de explosivo por taladro, altura real del taladro, altura real del taco, densidad y tipo de mezcla explosiva.

La información debe ser real y precisa debido a que proporciona los valores del Consumo Específico (q_i), Carga media (Q_i), Energía Media (E_i).

1.3. Curva Granulométrica

El sistema de medición empleado para obtener la estimación de la curva granulométrica es fundamental para el resultado del modelo. Las mediciones deben ser sistemáticas y representativas de toda la pila de escombros.

En una operación minera donde es imposible seleccionar el material para posteriormente tamizarlo y pesarlo, el Análisis Digital de Imágenes es un método bastante confiable que dependerá de la calidad con la que se tomen los datos para luego procesarlos y elaborar una curva granulométrica confiable.

Actualmente los sistemas Online cuentan con cámaras situadas en chancadora primaria o en los equipos de carguío los cuales facilitan la obtención de información y a su vez proporcionan un número considerable de datos, pero no son los únicos. Un método basado en el muestreo representativo para tomar las fotografías de todo el frente y avanzando conjuntamente con el minado, aprovechando las paradas de los equipos de carguío por cambio de turno y/o refrigerios proporcionan un número adecuado de fotografías para su análisis siempre y cuando se abarque todo el frente. Con uno u otro método es posible obtener información de calidad para elaborar la curva granulométrica de una voladura la cual debe ser confiable ya que es el resultado de la interacción de las demás variables de voladura: Índice de Volabilidad, Consumo Específico, Energía del Explosivo y parámetros geométricos de la malla (burden, espaciamento).

1.4. Base de Datos

Con la información recolectada anteriormente se elabora una base de datos experimental, la cual es indispensable para elaborar un modelo de fragmentación.

Los valores obtenidos son agrupados para realizar los análisis de tendencias, cálculos matemáticos y rutinas de ajustes no lineales.

A continuación se presenta la base de datos que origina el modelo predictivo (MP) de la mina de Au en estudio.

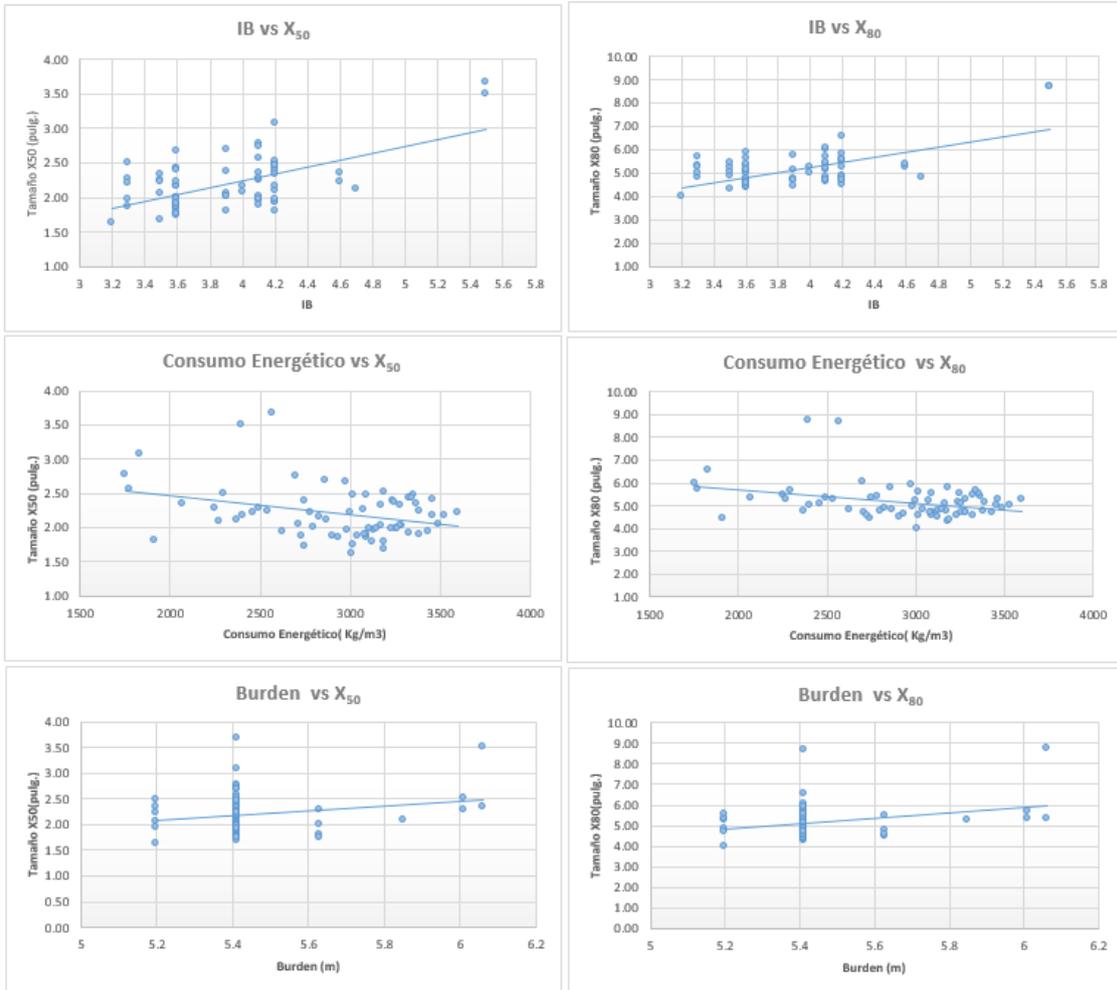
Tabla 1: Base de Datos Experimental del Modelo de la Mina de Oro

X₅₀	X₈₀	A	q_i	Q_i	E	q_iE_i	B
1.95	4.76	4.10	0.94	317.6	3331.5	3129.7	5.4
2.11	4.82	4.70	0.95	320.6	3024.8	2867.6	5.4
1.98	4.63	4.10	0.94	319.0	3294.3	3108.1	5.4
2.22	5.25	4.60	1.11	345.3	3251.3	3598.3	5.2
2.34	5.36	4.60	1.05	326.5	3216.7	3366.4	5.2
2.77	6.00	4.10	0.56	189.5	3127.8	1752.9	5.4
2.56	5.69	4.10	0.58	196.7	3054.6	1776.7	5.4
2.74	6.04	4.10	0.86	289.2	3155.7	2698.7	5.4
2.48	5.54	4.20	1.02	319.8	3275.3	3356.8	5.2
2.05	4.86	3.50	1.07	332.9	3273.4	3492.2	5.2
2.32	5.05	3.50	0.92	310.8	3450.0	3170.7	5.4
2.10	4.74	4.20	0.73	247.0	3250.0	2374.1	5.4
1.68	4.28	3.50	0.96	323.8	3328.8	3187.2	5.4
2.15	4.87	4.20	0.86	290.0	3296.1	2827.0	5.4
1.87	4.82	3.30	0.91	308.4	3333.0	3040.4	5.4
1.79	4.48	4.20	0.96	323.8	3262.4	3124.6	5.4
2.50	5.68	3.30	0.76	321.2	3010.0	2297.8	6.0
2.27	5.32	3.30	0.80	336.8	3114.6	2493.6	6.0
2.35	5.34	4.10	0.63	269.1	3263.8	2070.7	6.1
1.93	4.67	4.20	1.14	355.7	3010.0	3431.3	5.2
1.62	3.97	3.20	0.88	275.2	3410.3	3007.7	5.2
2.42	5.47	4.20	1.03	348.6	3225.7	3325.4	5.4
2.38	5.13	3.90	1.08	363.9	3010.0	3239.2	5.4
2.05	4.71	3.90	0.90	304.8	3010.0	2712.9	5.4
1.99	4.73	3.60	0.93	340.5	3010.0	2800.3	5.6
1.93	4.82	4.20	0.87	294.1	3020.0	2626.6	5.4
1.97	4.67	4.20	1.08	364.6	3018.9	3255.5	5.4
1.78	4.34	3.60	0.98	331.9	3253.5	3193.9	5.4
2.42	5.63	3.60	0.94	316.7	3570.0	3343.4	5.4
2.41	5.29	3.60	1.04	351.7	3330.0	3463.4	5.4
2.24	5.12	4.10	1.04	351.7	3259.7	3390.2	5.4
2.26	5.20	4.10	0.92	311.9	3330.0	3072.0	5.4
1.96	4.96	3.30	0.99	335.7	3010.0	2988.5	5.4
2.21	5.22	3.30	1.00	337.5	3010.0	3004.4	5.4
2.39	5.34	3.60	0.91	309.1	3010.0	2751.3	5.4
1.88	4.48	3.60	0.97	326.4	3010.0	2905.9	5.4
1.85	4.68	3.60	0.97	326.6	3200.4	3091.4	5.4
1.80	4.45	3.90	0.55	202.2	3465.4	1914.4	5.6
2.17	5.00	4.00	1.09	370.2	3223.3	3528.7	5.4
3.08	6.55	4.20	0.58	195.6	3167.3	1831.8	5.4
2.48	5.54	4.20	1.03	347.1	3010.0	3090.3	5.4

2.37	5.55	4.20	1.08	365.0	3010.0	3249.2	5.4
2.32	5.27	4.20	1.08	366.9	3023.1	3279.9	5.4
2.51	5.79	4.20	1.06	357.9	3010.0	3186.4	5.4
1.85	4.64	3.60	0.93	314.2	3157.0	2933.5	5.4
1.92	4.53	3.60	1.06	357.8	3143.2	3325.9	5.4
2.02	4.69	3.90	0.99	335.4	3311.7	3285.4	5.4
2.69	5.76	3.90	0.90	302.7	3194.5	2860.1	5.4
2.02	4.69	3.90	1.03	349.5	3175.7	3282.6	5.4
2.24	5.26	3.50	0.84	285.4	3010.0	2540.5	5.4
2.22	5.41	3.50	0.93	312.9	3010.0	2785.1	5.4
1.90	4.54	3.60	0.93	314.3	3330.0	3094.9	5.4
1.73	4.40	3.60	0.88	298.3	3114.6	2747.5	5.4
2.16	5.02	3.60	0.75	253.0	3214.5	2405.2	5.4
1.98	4.53	3.60	1.07	363.0	3010.0	3231.4	5.4
2.01	4.74	4.10	0.99	333.6	3214.8	3172.2	5.4
1.97	4.82	4.10	0.97	328.0	3245.4	3148.0	5.4
1.89	4.66	4.10	0.96	325.9	3199.0	3082.9	5.4
2.17	4.99	3.60	1.05	356.7	3280.7	3460.6	5.4
1.87	4.55	3.60	0.87	293.5	3143.8	2728.9	5.4
1.98	5.09	3.60	1.04	351.9	3133.8	3261.8	5.4
2.67	5.89	3.60	0.89	302.3	3330.0	2977.3	5.4
1.90	4.72	3.60	1.05	356.5	3208.4	3382.7	5.4
2.22	5.09	3.60	0.79	266.1	3125.1	2459.2	5.4
2.27	5.46	4.10	0.74	271.1	3039.0	2251.3	5.6
1.75	4.55	3.60	0.91	334.0	3302.4	3014.4	5.6
3.50	8.71	5.50	0.83	350.2	2902.6	2396.3	6.1
2.08	5.27	4.00	0.76	298.3	3010.0	2274.1	5.9
3.67	8.69	5.50	0.85	288.6	3010.0	2568.9	5.4
2.46	5.57	4.20	1.00	338.8	3010.0	3015.6	5.4

De la Base de Datos Experimental se obtienen las tendencias de los datos para tamaños X_{50} y X_{80} obtenidos de la curva granulométrica y las variables: Índice de Volabilidad (IB), Consumo Energético ($q_i E_i$), Burden (B). El Gráfico 1 muestra las tendencias de las variables independientes para tamaño X_{80} y X_{50} .

Gráfico 1: Tendencias IB, Consumo Energético, Burden vs Tamaños X_{50} y X_{80}



Las tendencias mostradas anteriormente son las correctas, es razonable suponer que deben incrementarse y/o decrecer, en los sentidos obtenidos, al relacionarse con los tamaños de fragmentos (X_{50} , X_{80}).

1.5. Cálculos Matemáticos

La función *Weibull Rosin Rammler Ordinaria* es la curva seleccionada en el modelo de la Mina de Au, debido a que las curvas granulométricas elaboradas del Análisis Digital de Imágenes son más confiables en la zona central entre los pasantes P (45) al P (85).

Los limitantes de utilizar funciones de mayor número de parámetros son:

- El corte de finos de 3 pulgadas, valores por debajo de este valor son en realidad extrapolación del sistema.
- En la zona gruesa de la curva no existe un detalle de los tamaños máximos de fragmento (X_{max}), en la estimación de medida realizada mediante el Análisis Digital de Imágenes se aprecia tendencias asintóticas, por experiencia (Sanchidrián 2013) en curvas granulométricas pesadas y cribadas las terminaciones son pendientes.

El Modelo Predictivo ad hoc de la Mina se expresa por la siguiente ecuación:

$$P(x) = 1 - e^{-\ln(2) \left(\frac{X}{X50}\right)^{\frac{0.842}{\ln\left(\frac{X80}{X50}\right)}}$$

Las ecuaciones y los intervalos de confianza al 95% de los parámetros (estimados a partir los datos experimentales presentados en la Tabla 1), para la función descriptora de fragmentación, se presentan a continuación:

$$X50 = A(qiEi)^{-0.1965} B^{0.582}$$

$$I.C. a: [-0.3027, -0.0903], b: [0.0847, 1.0794]$$

$$X80 = A(qiEi)^{-0.1486} B^{0.8591}$$

$$I.C. a: [-0.2375, -0.0597], b: [0.4429, 1.2754]$$

2. Zonificación del Tajo por Índices de Volabilidad Geo-Estructurales

Anteriormente nos hemos referido a la variable que describe y cuantifica al macizo rocoso como Índice de Volabilidad. En el subtítulo Litología y Mapeo Estructural se ha resaltado la importancia de este parámetro y su interpretación, sin embargo en muchos casos caracterizar el macizo rocoso no es tarea sencilla.

En ocasiones la información que obtenemos no es representativa, lo cual da resultados poco certeros al analizar la curva granulométrica medida.

Una recomendación es conocer la litología que predomina en el proyecto, observar la cara libre o un afloramiento cercano del macizo (banco superior o banco inferior). Es necesario evaluar una zona donde se determinen las propiedades estructurales del macizo rocoso: orientación, espaciamiento de fracturas, durezas de la roca, etc., y finalmente cuantificarlas utilizando el ranking seleccionado.

Al estudiar las variables que cuantifican los Índices de Volabilidad en la Literatura de Voladura y analizar los estudios realizados para comprobar su validez, se observan similitudes entre ellos. Una semejanza en las estimaciones de los Índices de Volabilidad es que valorizan las estructuras del macizo rocoso y las propiedades físicas de la roca.

Este estudio demuestra que es posible relacionar los valores de los Índices de Volabilidad ajustados mediante un modelo *ad hoc* de una mina mediante su ubicación en Dominios geo estructurales.

Por ejemplo en un proyecto de voladura que se encuentra dentro de un dominio geo estructural del cual se ha estimado previamente el Índice de Volabilidad, es posible modelarlo obteniendo una curva granulométrica casi exacta a la real la cual fue seleccionada de múltiples simulaciones de acuerdo a las necesidades del cliente y al mejor costo.

2.1 Zonificación Geo Estructural Mina de Au

La zonificación geo estructural en este estudio se realizó para una mina de oro, la cual se elaboró sobre la base del modelo geológico y estratigráfico cuya actualización se realizó en el año 2009, los dominios estructurales fueron definidos en base al manto de las estratificaciones y su dirección. Los dominios estructurales reflejan la ubicación de fallas mayores y charnelas de los pliegues que definen grandes cambios en la dirección de la estratificación: manto hacia el oeste, manto hacia el este. Los dominios estructurales identificados anteriormente se vuelven a dividir en sub dominios: superiores e inferiores, de la siguiente manera:

- Sub dominios Superiores: mantos de la estratificación menores a 55°.
- Sub dominios Inferiores: mantos de la estratificación mayores a 55°.

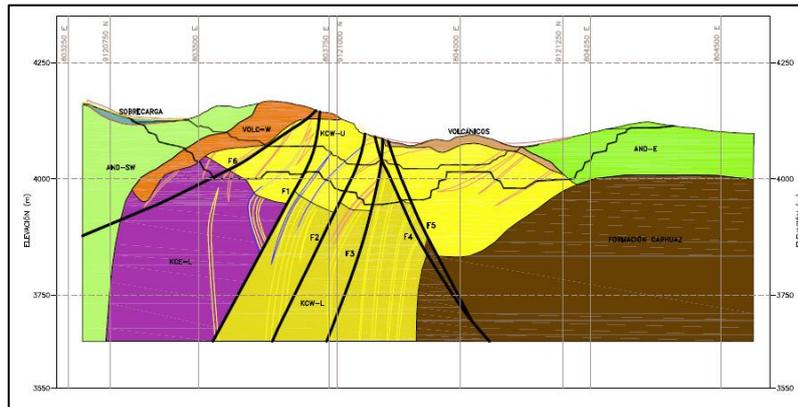
Con estas dos particularidades de la zonificación se han definido cuatro dominios estructurales, la convención de nombres es la siguiente:

- KCW-U Y KCW-L: Todos aquellos limbos con manto hacia el oeste (estratificación) fueron subdivididos en dos dominios estructurales basados en el manto de la estratificación. Las abreviaturas significan lo siguiente:
KC: Chimú Cretáceo
W: Estratificación Manto Oeste
U o L: Subdominio Superior o Inferior
- KCE-U Y KCE-L: Todos aquellos limbos con manto hacia el este (estratificación) fueron subdivididos en dos dominios estructurales basados en el manto de la estratificación. Las abreviaturas significan lo siguiente:
KC: Chimú Cretáceo
W: Estratificación Manto Este
U o L: Subdominio Superior o Inferior

A continuación se muestra como referencia el Plano 1 de la sección geotécnica 4000 NE, los colores representan el tipo de litología, siendo la roca arenisca (color amarillo) la de mayor predominio en el yacimiento.

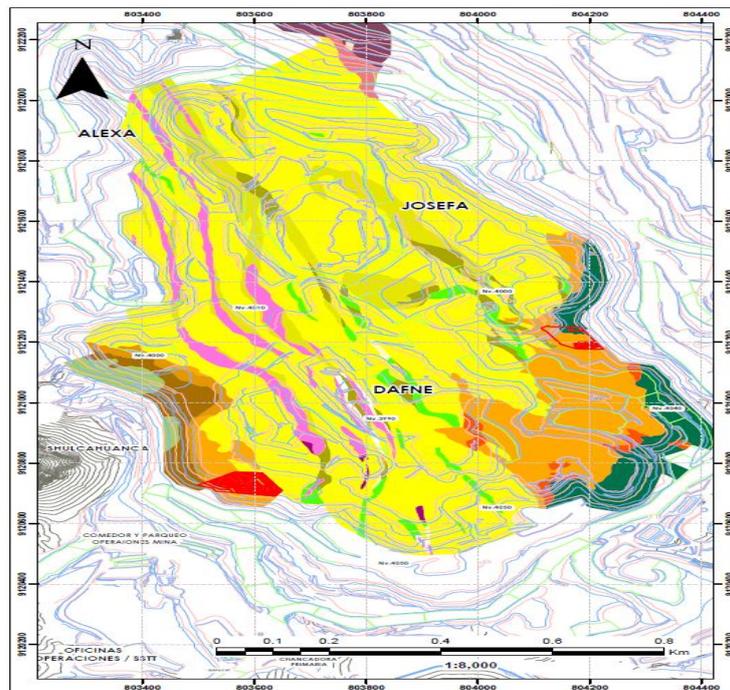
El Plano 2 muestra la distribución litológica del yacimiento, la zona de color amarillo representa las rocas de tipo arenisca, y la zona de coloración anaranjada representa la roca de tipo volcánica (brechas).

Plano 1: Sección Geotécnica 4000 NE-Dominios: Arenisca (color amarillo), Brecha Volcánica (color anaranjado), Andesita (color verde), Limos (color magenta)



Fuente: Piteau Associates 2010

Plano 2: Litología : Arenisca (color amarillo), Brecha Volcánica (color anaranjado), Andesita(color verde), Limo Carbonoso (color magenta), Carbón (color rojo)



Fuente: Mina Lagunas Norte Minera Barrick -Perú

Las areniscas representan entre 80% y 85% de la litología del yacimiento, las brechas volcánicas se encuentran entre 10% y 15%, mientras que las rocas de tipo andesita, limo, limo carbonoso y carbón están entre 5% y 10%, estas últimas son consideradas como desmonte.

2.2. Ajustes de los Índices de Volabilidad

Los ajustes al modelo se realizaron para cada dominio geo estructural. La Metodología de cálculo tiene como objetivo reducir el error entre la curva granulométrica modelada y la curva granulométrica medida, variando solo el índice de Volabilidad.

2.2.1 Análisis de Regresión y Correlación

El análisis de regresión consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables relacionadas. El análisis de correlación estudia el grado de asociación de dos o más variables.

2.2.2 Coeficiente de Determinación (R^2)

Mide la bondad de ajuste de los datos observados con el modelo, la predicción dependerá de la relación entre las variables.

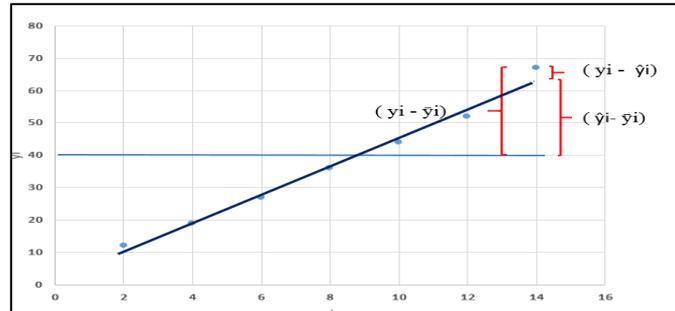
La diferencia que existe en una observación i , entre el valor observado y_i , variable dependiente y el valor estimado de la variable dependiente \hat{y}_i se conoce como *residual i* .

El *residual i* representa el error que existe al estimar el valor observado y_i utilizando el valor estimado \hat{y}_i . La suma de los cuadrados de los residuales se minimiza empleando el método de mínimos cuadrados y se conoce como Suma de Cuadrados debida al Error (SCE).

La suma del cuadro de los errores que existe al estimar el valor y_i utilizando la media observada \bar{y}_i , $\sum (y_i - \bar{y}_i)^2$ se le conoce como Suma Total de Cuadrados, de la misma manera para calcular que tanto se desvían los valores estimados \hat{y}_i de la media de los valores observado \bar{y}_i se utiliza la Suma de Cuadrados debido a la Regresión (SCR).

El Gráfico2 muestra la relación que existe entre la Suma de Cuadrados Totales (SCT), Suma de Cuadrados debido al Error (SCE) y Suma de Cuadrados debido a la Regresión (SCR).

Gráfico 2: Relación entre SCT, SCR, SCE en una Regresión



$$SCT = SCR + SCE$$

$$1 = \frac{SCR}{SCT} + \frac{SCE}{SCT} \quad R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT}$$

Como $SCR \leq SCT$, se deduce que $0 \leq R^2 \leq 1$

Un Coeficiente de Determinación (R^2) igual a 1, representa un ajuste lineal perfecto, ya que $SCR=SCT$, esto es la variación total de Y es explicada por el modelo de regresión.

El valor cero indica la no representatividad del modelo lineal, ya que $SCR= 0$, lo que supone que el modelo no explica nada de la variación total de la variable Y . En nuestro caso de estudio el valor observado Y_i es el porcentaje pasante medido $\%Pasante_{medido}$, el valor estimado del modelo \hat{y}_i es el porcentaje pasante simulado $\%Pasante_{mod}$.

Suma de Cuadrados del Total (SCT)

Representa la variación total de los valores reales de Y respecto de su media muestral, recibiendo el nombre de suma total de cuadrados. Este término se utiliza para el cálculo de la variancia de la muestra.

$$SCT = (\%Pasante_{medido} - \overline{\%Pasante_{medido}})^2$$

Suma de Cuadrados a la Regresión (SCR)

Mide la variación de los valores estimados alrededor de su media.

$$SCT = (\%Pasante_{mod} - \overline{\%Pasante_{medido}})^2$$

Suma de Cuadrados del Error (SCE)

Es la variación residual o no explicada de los valores observados alrededor de la recta de regresión (es la cantidad que se minimiza cuando se obtiene la recta de regresión).

$$SCE = (\%Pasante_{medido} - \%Pasante_{mod})^2$$

2.2.3. Programación Lineal

Estudia las situaciones en las que se exige maximizar o minimizar funciones que se encuentran sujetas a determinadas limitaciones, que llamaremos restricciones.

Función Objetivo ($F_{(x,y)}$)

La programación lineal consiste en optimizar (maximizar o minimizar) una función objetivo, que es una función lineal de varias variables, en nuestro caso:

$$F(A_i) = \text{Min} \{SCE\}$$

$$F(A_i) = \text{Min} \{ \sum (\%Pasante_{medido} - \%Pasante_{mod})^2 \}$$

$$F(A_i) = \text{Min} \{ \sum (K_i - 100 * (1 - e^{-\ln 2 * (\frac{X_i}{X_{50}})^n})^2) \}$$

$$F(A_i) = K_i - \text{Min} \{ \sum (100 * (1 - e^{-\ln 2 * (\frac{X_i}{A_i * (Q_i * E_i)^{-0.1965 * B^{0.582}})})^2) \}$$

A_i : Factor de Roca

X_i : Tamaño Característico del Material Fragmentado

n : Parámetro de Forma (Pendiente de la Curva log-log en los Finos)

K_i : Número Variable

IV. RESULTADOS

Utilizando la metodología expuesta anteriormente, se procesaron 22 voladuras, de las cuales se obtuvieron 32 polígonos (un proyecto de voladura puede contener dos o más polígonos con diferentes tipos de material).

En la Tabla 2 se observan los valores de A_j (Índices de Volabilidad Ajustados) para los polígonos del análisis, así como el tipo de roca a la que pertenecen (SAC: Arenisca, VBS: Volcánico), la zona del tajo (Dafne, Alexa, Josefa) fueron denominadas así por los nombres de los cerros sobre los cuales se deposita el yacimiento de oro, los tamaños del percentil 80 medidos son X_{80} .

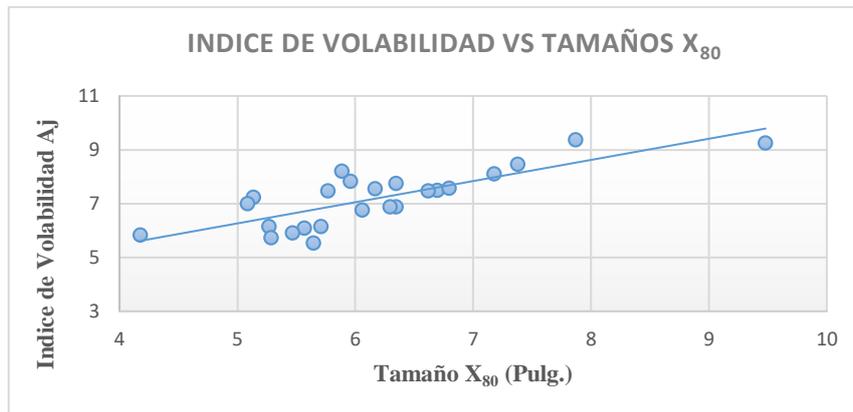
Tabla 2: Índices de Volabilidad Ajustados, Zona del Tajo, Tipo de Roca y Percentil 80

ID	PROYECTO	POLÍGONO	ZONA	A_j	TIPO DE ROCA	X_{80real}
1	12-3990-035	02M1A	DAFNE	5.77	SAC	7.46
2	13-4040-202	03M1	DAFNE	7.87	VBS	9.37
3	13-4040-203	01M1	DAFNE	7.38	VBS	8.46
4	13-4040-203	02M3	DAFNE	6.06	VBS	6.75
5	13-4040-203	04M3	DAFNE	6.70	VBS	7.49
6	13-4040-203	05M1	DAFNE	7.18	VBS	8.10
7	13-4040-203	06M1	DAFNE	6.35	SAC & VBS	6.87
8	10-4030-172	M1A	JOSEFA	9.48	VBS	9.24
9	10-4040-197	03M1A	JOSEFA	6.30	VBS	6.87
10	13-4010-151	06M3	DAFNE	5.14	SAC	7.24
11	10-4030-177	01M1	JOSEFA	4.18	SAC	5.83
12	10-4030-178	01M1	JOSEFA	5.09	SAC	6.99
13	12-4000-096	02M3	DAFNE	5.65	SAC & VBS	5.53
14	12-4000-095	03M1A	DAFNE	5.27	SAC	6.14
15	12-4000-095	05M1A	DAFNE	5.71	SAC	6.14
16	10-4030-179	03M1	JOSEFA	6.62	VBS	7.46
17	10-4030-183	04M1A	JOSEFA	6.35	SAC & VBS	7.75
18	13-4030-181	01M1A	DAFNE	6.80	VBS	7.56
19	13-4030-182	01M1	DAFNE	5.57	SAC & VBS	6.09
20	13-4030-182	03M3	DAFNE	5.47	SAC & VBS	5.91
21	13-4030-182	04M1A	DAFNE	5.29	SAC & VBS	5.73
22	9-4000-094	01M3	ALEXA	5.96	VBS	7.83

23	10-4020-160	02M1	JOSEFA	5.89	SAC	8.21
24	10-4020-161	01M1	JOSEFA	6.17	VBS	7.55
25	10-4020-161	02M1	JOSEFA	4.96	SAC	6.23
26	10-4000-097	02M1	JOSEFA	5.66	SAC	7.11
27	10-4000-100	03M1	JOSEFA	6.05	SAC	8.09
28	10-4000-100	01M1	JOSEFA	6.77	SAC	9.51
29	9-4000-098	04M1A	JOSEFA	5.58	SAC	8.05
30	13-4030-180	01M1A	DAFNE	4.29	SAC	5.81
32	13-4030-180	03M1A	DAFNE	5.84	VBS	7.88
32	10-4020-165	01M1	JOSEFA	5.45	SAC	7.93

La regresión lineal entre las variables A_j y los tamaños X_{80} se muestran en la Gráfica 3, el Coeficiente de Determinación es de 63.7%, lo cual quiere decir que si utilizaríamos la variable independiente A_j para determinar el valor de X_{80} tendríamos una confiabilidad en la predicción del 63.7 % lo cual es bastante bueno, considerando que el modelo es Lineal y no existen más variables que contribuyan en la predicción. Naturalmente no es lo correcto es solo un ejemplo que trata de explicar la gran contribución de la variable Índice de Volabilidad Ajustado en la predicción del percentil 80, el aporte restante para llegar a un 98% o 99% en el coeficiente de determinación se le atribuye a las variables independientes: Consumo específico, Energía Media y Burden.

Gráfico 3: Relación Lineal de Índices de Volabilidad Ajustados y los X_{80} medidos



En la Tabla 3 se presentan los valores de las variables independientes (Q_i , q_i ; E_i , A_j y el tipo de explosivo), utilizadas en el Modelo Predictivo Zonificado para el proyecto 13-4040-203 ejecutado para la Mina de oro, los resultados de los ajustes del modelo zonificado se muestran en la Tabla 4.

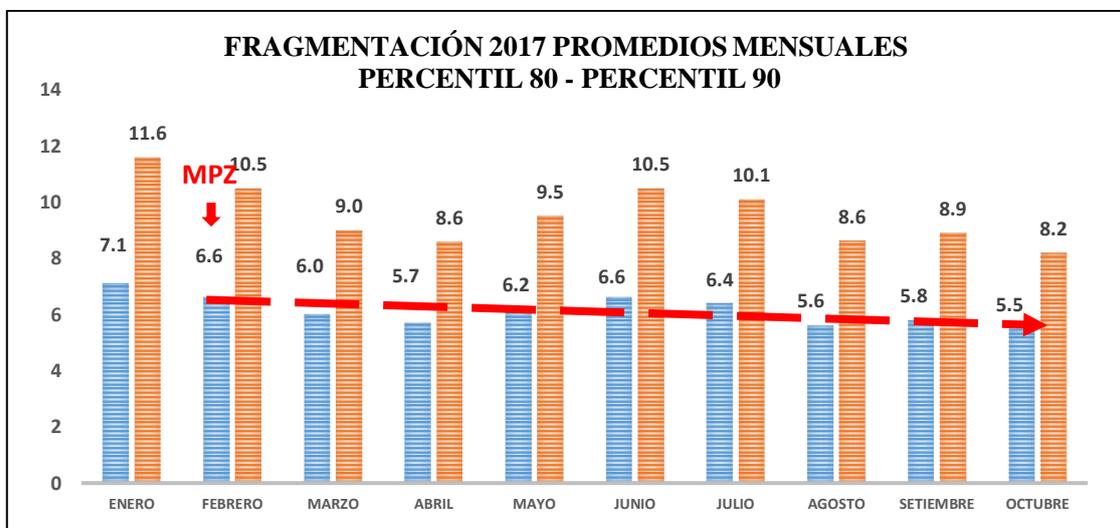
Tabla 3: Valores de las Variables Independientes

PROYECTO	POLÍGONO	MEZCLA (Kg)		N° POZOS	Q_i	q_i	E_i	A_i	X_{50}	X_{80}
		HA 45/55	HA64							
13-4040-203	01M1	34,235	520	102	340.7	1.3	3,296	7.5	3.57	8.22
	02M3	14,810	-	38	389.7	1.49	3,300	6.2	2.89	6.68
	04M3	5,605	-	15	373.6	1.43	3,300	6.7	3.15	7.28
	05M1	9,180	-	25	367.2	1.4	3,300	7.2	3.39	7.83
	06M1	7,785	-	20	389.3	1.49	3,300	6.3	2.96	6.86

Tabla 4: Bondad de Ajuste del X_{80} del Modelo vs X_{80} Medido

POLÍGONO	SCE	SCT	A_j	X_{80} estimado	X_{80} medido	R^2
01M1	38.97	9090.48	7.46	8.22	8.46	0.97
02M3	91.54	7042.08	6.19	6.68	6.75	0.99
04M3	110.95	7471.86	6.7	7.28	7.49	0.97
05M1	63.72	8551.78	7.18	7.83	8.1	0.97
06M1	8.32	8048.04	6.34	6.86	6.87	1

Gráfico 4: Sostenibilidad de la Fragmentación en una Mina de Oro año 2017



V. CONCLUSIONES

- Los dominios estructurales y litológicos que caracterizan un yacimiento utilizados para: obtener información de la estabilidad de los taludes, localizar zonas de falla, ubicar posibles continuidades de zonas mineralizadas son empleados con éxito en el modelamiento de la voladura para obtener valores representativos del Índice de Volabilidad con esta metodología alcanzando una confiabilidad de 99%.
- Existe una gran correlación entre los tamaños de fragmento medidos y los índices de Volabilidad Ajustados.
- El Modelamiento Integrado de la Voladura para una mina, supera en exactitud a cualquier estimación de la curva granulométrica, obteniendo una respuesta inmediata y confiable para cada situación que se ponga como objetivo, como por ejemplo: ahorro en los costos de perforación y voladura, aumento de la producción de mineral a chancadora, incrementar la productividad de los equipos de carguío y acarreo (minera –desmante) o en aumentar la recuperación de oro en planta (previo estudio metalúrgico).

REFERENCIAS

Cunningham CVB. 1987. Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on. Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, CO, pp 475-487.

Kanchibotla SS, Valery W, Morrell S. 1999. Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proc. Explo'99—A Conference on Rock Breaking. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Kalgoorlie, Australia. pp. 137–144.

Kuznetsov VM. 1973. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. Soviet Mining Sci. 9: 144–148.

Lilly P. 1986. An empirical method of assessing rock mass blastability, Proc. Large Open Pit Mine Conference, Australia, October 1986, pp 89-92.

Ouchterlony, F. 2015. Personal communication.

Sanchidrián J A. 2013. ¿Qué función representa mejor la distribución granulométrica de la roca fragmentada? Sipervor XII, Lima, Perú, 21-23 noviembre de 2013. Universidad Nacional de Ingeniería.

Sanchidrián, J A, Segarra, P, Ouchterlony, F and López, LM. On the accuracy of fragment size measurement by image analysis in combination with some distribution functions. Rock Mech Rock Eng 42: 95-116

Sanchidrián, J A., Segarra, P and López, L M. 2006. A Practical Procedure for the Measurement of Fragmentation by Blasting by Image Analysis. Rock Mech Rock Eng, 39(4): 359-382.

Sanchidrián, J A. 2014-2018. Personal communication.



Premio a la
Innovación Tecnológica
en el Sector Mineroenergético 2018

Organiza:

Comité de Tecnología e Innovación



Sociedad Nacional de
**MINERIA PETROLEO
Y ENERGIA**

Con el apoyo de:



PERÚ

Ministerio
de la Producción

Acta de Ganadores

Acta de Calificación.

Con fecha 17 de julio de 2018, el Jurado Calificador ha emitido los siguientes resultados:

CATEGORÍA: EMPRESA INNOVADORA

Nº	Empresa	Nombre del Trabajo
1	Repsol Comercial S.A.C.	Modernización TI en las estaciones de servicio Repsol Perú.
2	Minera La Zanja S.R.L.	Elaboración de suelo mejorado para el cierre de mina La Zanja.
Mención Honrosa	Sociedad Minera Cerro Verde S.A.C.	Herramienta para el cambio y tensado de fajas en celdas de flotación, "la garra".

CATEGORÍA: IDEA INNOVADORA

Nº	RAZÓN SOCIAL	NOMBRE DEL TRABAJO
1	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Informática para la última milla - Computing for the last mile.
2	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Tratamiento de residuos orgánicos por fermentación anaerobia.
Mención Honrosa	Compañía Minera Antamina S.A	Antamina óptimo - Sistema recomendador de asignaciones y manejo óptimo de la flota de equipo pesado.

CATEGORÍA: ACADÉMICO INNOVADOR

Nº	RAZÓN SOCIAL	NOMBRE DEL TRABAJO
1	Universidad Nacional de Ingeniería	Desarrollo de cohetes experimentales que trasladan bacterias "Pseudomonas spp" para prevenir las tormentas eléctricas durante días de parada de planta.
2	Universidad Nacional San Agustín de Arequipa	Tecnología de tratamiento para la eliminación de cianuro y metales pesados de efluentes del proceso de cianuración utilizando sales ferricas y peróxido de hidrógeno.
Mención Honrosa	Pontificia Universidad Católica del Perú	Mejora de procesos en la industria minera mediante la dinámica de fluidos computacional y técnicas experimentales.

CATEGORÍA: PROVEEDOR DE EXCELENCIA

Nº	RAZÓN SOCIAL	NOMBRE DEL TRABAJO
1	Dinamo Tecnologías S.A.C.	Torre de iluminación solar.
2	Miners Company S.A.C.	Modelamiento integral de voladura en tajo.