

# REPARAMETRIZACIÓN DE LA ECUACIÓN DE KUZNETSOV EN LA MINA LAGUNAS NORTE

Abel Eduardo Anchorena López<sup>1</sup>, José Ángel Sanchidrián Blanco<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Ingeniero de Minas, Barrick Gold Corp., Lagunas Norte, Perú*

<sup>2</sup> *Ph.D., Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España*

## Resumen

Las empresas mineras buscan obtener la mayor rentabilidad en todas sus operaciones, esto se hace posible solo si se tiene un adecuado control de costos operativos. No es una novedad ver en la fragmentación de la roca volada un gran aporte en toda la cadena productiva de la mina.

Predecir la fragmentación del material volado es sin lugar a duda una herramienta poderosa en la toma de decisiones. Permite seleccionar la mejor alternativa en cuanto a diseños de perforación y voladura, obteniendo como resultado una fragmentación esperada al mejor costo, involucrando una serie de criterios técnicos que respalden nuestra decisión y considerando las restricciones propias de toda operación minera.

En este trabajo se presenta un modelo para estimar tamaños de fragmentos de las voladuras obtenidas a partir de las medidas de granulometría realizadas mediante análisis digital de imagen, datos de perforación y voladura y el índice de volabilidad de la roca. El modelo constituye una adaptación concreta a la operación de la conocida fórmula de Kuznetsov.

## Introducción

El presente trabajo muestra la adaptación de la ecuación propuesta por Kuznetsov para estimar tamaños:  $X_{50}$  y  $X_{80}$  en mina Lagunas Norte, operación de Barrick Gold localizada en Perú, lo cual nos lleva a reparametrizar dicha ecuación haciéndola específica para el yacimiento.

Basaremos el estudio en desarrollar relaciones directas entre las propiedades del macizo rocoso y las propiedades de la voladura (interacción entre el explosivo y la roca) dando como resultado el tamaño del fragmento que viene a ser la descripción numérica del fenómeno físico de la voladura. La información resultante se incorporará en las variables descritas en la ecuación de Kuznetsov.

Para su desarrollo es necesario tomar información de diferentes voladuras realizadas en la mina, plantear una estrategia de recopilación y análisis de datos. Los resultados obtenidos dependerán entre otras cosas de la calidad y de la cantidad de las mediciones realizadas, esta última a su vez, dependerá de la variabilidad del fenómeno. Las variables que debemos tener en consideración están relacionadas con:

- **Las Propiedades del Explosivo:** Densidad del explosivo (se debe comprobarla en el campo antes de iniciar el carguío), conocer la Energía Media del Explosivo (KJ/Kg), medir su velocidad de detonación y llevar registros de las mediciones.
- **El Macizo Rocos:** Debe ser cuantificado mediante la valorización de sus propiedades físicas (pruebas de laboratorio) y estructurales con el fin de estimar el Factor Roca.
- **La Perforación:** Debe realizarse según el diseño establecido, es necesario tener controles específicos de campo. Es de mucha ayuda contar con sistema GPS de alta precisión el cual reduce el error de perforación; signos vitales de las perforadoras donde se registra la profundidad del pozo, RPM y pull down además, es sumamente importante contar con personal calificado.

Se debe definir cuál será el método a emplear para medir los resultados de la pila de material volado, en ese sentido es necesario contar con una medición sistemática y confiable, al mismo tiempo se debe determinar los controles que se van a realizar de tal forma que aseguren la veracidad de las mediciones y su posterior interpretación.

## Toma de datos

### *Fragmentación*

En mina Lagunas Norte el análisis de la fragmentación post-voladura se efectúa con el Split Online mediante análisis digital de imágenes, para lo cual se cuenta con una cámara instalada en chancadora primaria, la cual toma fotografías en el momento de la descarga de los camiones. Es crucial que la fragmentación medida sea fiable, el valor menor que el

Split Online es capaz de medir o delinear se conoce como “Fines Cut-off”, suele ser tres o cuatro veces el tamaño del pixel y depende de la resolución de la cámara y del tamaño real del área de la foto. En nuestro caso el valor de corte de finos es de 2.78 pulgadas, es decir valores menores serán en realidad extrapolación del sistema. Conocido este valor mínimo, se ha utilizado como último punto medido tres pulgadas.

Para validar la simulación de toda la curva granulométrica volada, necesitamos un estimador de algún otro punto inferior de la curva, esta parte del análisis no forma parte de este estudio, y será realizado posteriormente con la adquisición de zarandas vibratorias y los pesajes de material pasante y retenido. De esta forma podremos obtener uno o dos puntos de la parte inferior de la curva (menor a tres pulgadas) y ajustar estos valores a las funciones descriptoras.

En la Figura 1 se muestra la distribución granulométrica realizada por el Split Online, donde se aprecia de color rojo, la porción de la curva mayor a tres pulgadas (zona donde la curva es confiable), la parte de la curva de color verde es la extrapolación realizada por el sistema. La curva de color azul es una simulación realizada con el modelo “Crush-Zone” del JKMRC (Kanchibotla et al., 1999) a modo de referencia.

#### *Constantes de roca*

El Factor Roca utilizado es el propuesto por Cunningham (1987) que a su vez es una modificación del propuesto por Lilly (1986).

El factor de roca propuesto por Cunningham valora la información obtenida del macizo rocoso y la incorpora en la siguiente ecuación:

$$A = 0.06(RMD + JF + RDI + HF)$$

$$JF = JPS + JPA$$

Dónde RMD describe la masa rocosa, JPS el espaciamiento entre las fracturas, JPA la orientación del plano de las fracturas, RDI el efecto de la densidad de la roca y HF el efecto de la dureza de la roca, en la forma que se muestra en la Tabla 1.

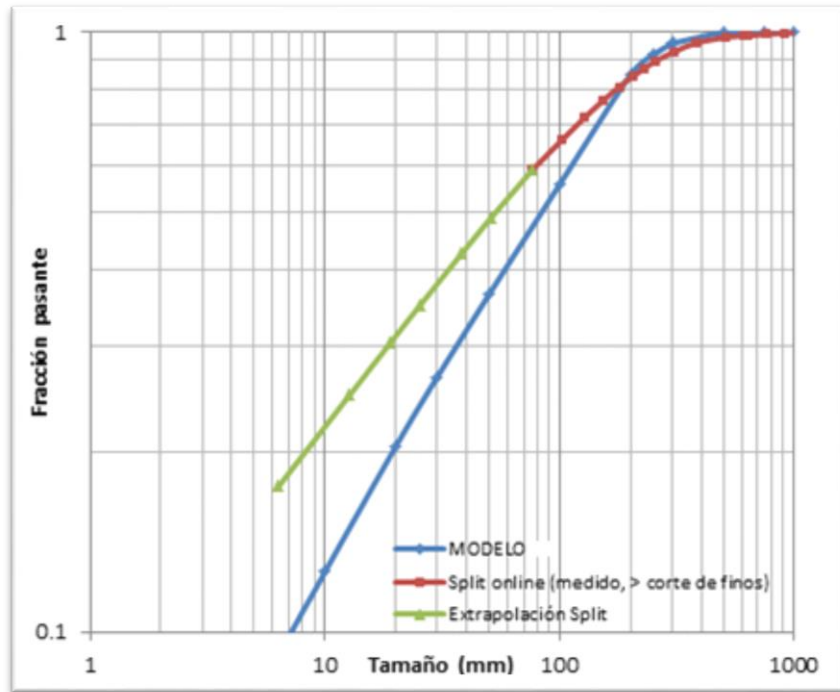


Figura 1. Ejemplo de curva granulométrica medida.

Tabla 1. Índice de volabilidad de Cunningham.

PARÁMETRO	RANKING
<b>Descripción de la Masa Rocosa (RMD)</b>	
Pulverulento/Quebradizo	10
Diaclasado verticalmente	JPS + JPA
Masiva	50
<b>Espaciamiento de Fracturas (JPS)</b>	
0.1 m	10
0.1 a sobre tamaño	20
Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
<b>Angulo del Plano de Fracturas (JPA)</b>	
Buza fuera de la cara	20
Rumbo perpendicular a la cara	30
Buza hacia la cara	40
<b>Influencia de la Densidad (RDI)</b>	$RDI=25 \cdot SG - 50$
<b>Factor Dureza (HF)</b>	E/3 para E<50 GPa, UCS/5 para E>50

En la tabla 2 se muestra un resumen de los factores de roca estimados en las voladuras analizadas para este trabajo.

Tabla 2. Factores de roca de las voladuras analizadas.

N°	Fecha	Disparo	RMD	JPS	JPA	RDI	HF	A
1	17/12/2013	4100-124 03M1	65	35	30	13.25	4.7	4.98
2	17/12/2013	4100-124 04M1	65	35	30	13.25	4.7	4.98
3	01/05/2014	4100-128 02M1	50	30	20	11.5	3.2	3.80
4	02/04/2014	4100-134 02M1	40	20	20	14.5	4.13	3.52
5	24/02/2014	4090-112 02M1	60	20	40	14	5.7	4.78
6	26/02/2014	4100-137 01M1	60	20	40	15.75	2.65	4.70
7	03/03/2014	4090-115 02M1	40	20	20	14.5	4.13	3.52
8	03/03/2014	4090-115 05M1	40	20	20	14.5	4.13	3.52
9	13/06/2014	4080-132 02M1	40	20	20	12.5	4.7	3.43
10	13/06/2014	4080-133 01M1	40	20	20	13.25	4.7	3.48
11	13/06/2014	4080-133 02M1	40	20	20	13.25	4.7	3.48
12	19/06/2014	4070-120 01M2	30	10	20	14	4.7	2.90
13	20/06/2014	4060-098 01M1	40	20	20	14.25	5.7	3.60
14	20/06/2014	4060-098 06M1	40	20	20	14.25	5.7	3.60
15	20/06/2014	4060-098 02M1	40	20	20	14.25	5.7	3.60
16	22/06/2014	4070-123 06M1	55	20	35	13.5	4.7	4.39
17	29/06/2014	4070-125 02M1	40	20	20	14.75	4.76	3.57
18	29/06/2014	4070-125 03M1	40	20	20	14.75	4.76	3.57
19	24/06/2014	4070-122 02M1	30	10	20	12.5	3.83	2.80
20	24/06/2014	4070-122 04M1	30	10	20	12.5	3.83	2.78
21	26/06/2014	4060-099 03M1	30	10	20	15.25	4.28	2.97
22	26/06/2014	4060-099 05M1	30	10	20	15.25	4.28	2.97
23	03/07/2014	4070-126 02M1	35	15	20	13.5	4.7	3.19
24	05/07/2014	4060-100 01M1	40	20	20	12.5	5	3.45
25	05/07/2014	4060-100 03M1	40	20	20	12.5	5	3.45
26	07/07/2014	4060-102 01M1	35	15	20	14.5	4.7	3.25
27	07/07/2014	4060-102 04M1	35	15	20	14.5	4.7	3.25
28	16/07/2014	4060-106 02M1	35	15	20	14.5	4.7	3.25
29	13/07/2014	4060-105 02M1	40	20	20	14.25	5.7	3.59
30	23/07/2014	4060-107 04M1	40	20	20	13.5	4.73	3.50
31	30/07/2014	4050-089 01M1	35	15	20	12	4	3.00
32	04/08/2014	4050-093 02M1	50	20	30	12	4	4.00

## Perforación y explosivos

### - Perforación

Mina Lagunas Norte cuenta con una flota de seis perforadoras:

Cuatro perforadoras Terex Reedrill SKS 12 que perforan diámetros de 9 7/8 pulgadas y 7 7/8 pulgadas. Dos perforadoras Ingresoll Rand DMM2 que perforan diámetros de 7 7/8 pulgadas.

Una perforadora Ranger 700 que perfora diámetros de: 3 pulgadas, 3.5 pulgadas, 4 pulgadas y 4.5 pulgadas.

Una perforadora Sandvik DP1500 i que perfora diámetros de: 4 pulgadas, 4.5 pulgadas, 5 pulgadas y 6 pulgadas. Normalmente, se utiliza diámetro de 9 7/8 pulgadas para taladros

de producción y 7 7/8 pulgadas para contorno y buffer, diámetros inferiores son utilizados para pre corte y voladuras secundarias.

- *Explosivos*

En Mina Lagunas Norte se utiliza principalmente ANFO y ANFO PESADO en taladros de producción, contorno y buffer. En taladros de pre corte y disparos secundarios se utiliza emulsión encartuchada de 1 1/8 x 8 pulgadas, 1 1/2 x 13.4 pulgadas, 2 x 16 pulgadas y 3 pulgadas. Para la iniciación se utilizan detonadores electrónicos I-kon con booster de 450 gramos y se utiliza exel de 600 ms como back up del I-kon.

En la tabla 3 se muestran las propiedades de los explosivos utilizados en el carguío de taladros.

Los resultados de las pruebas realizadas para determinar las velocidades de detonación se muestran en la Tabla 4

Tabla 3. Densidad y energía de los explosivos involucrados.

Producto	Densidad (gr/cm3)	Energía Total (Kj/Kg)
ANFO	0.785	3960
HA-28	0.885	3850
HA-37	0.995	3780
HA-46	1.17	3720
HA-45/55	1.26	3655
HA-55	1.26	3640
HA-64	1.32	3479

Tabla 4. Velocidades de detonación medidas.

Explosivo	VOD límite Inferio (m/s)	VOD límite Superior (m/s)	VOD Promedio (m/s)
ANFO	3900	4200	-----
HA-28	4300	4600	4581
HA-37	4600	4900	4901
HA-46	4900	5200	5080
HA-45/55	4900	5300	5132
HA-55	5000	5300	5192

## Análisis de datos

Estudios recientes (Sanchidrián, 2013), demuestran que las funciones Swebrec y Weibull-Rosin-Rammler Truncada, están entre las mejores funciones de este tipo (funciones de tres parámetros para representar la granulometría de la roca volada). Algunas conclusiones reportadas son las siguientes:

- Las funciones de dos parámetros difícilmente pueden representar más de un orden de magnitud de los datos en tamaños o pasantes.
- Las funciones con asíntotas al 100% en pasante pueden tener errores grandes en el extremo superior.
- Las distribuciones truncadas de tres parámetros funcionan muy bien en los gruesos (sobre todo) y en la zona central, a menudo mejor que las bi-componentes, más complicadas y con más parámetros.
- Las funciones de tres parámetros pueden usarse hasta pasantes de 8 % a 10%. Si se interesa representar bien valores por debajo de estos son necesarias distribuciones de cinco parámetros.
- La función Swebrec ampliada es la que mejor funciona en todos sus intervalos.
- Entre las distribuciones truncadas, la función Swebrec y la función Weibull Rosin Rammler truncada son las mejores.

Las funciones Weibull-Rosin-Rammler y Swebrec, en forma de distribuciones acumuladas tienen las expresiones:

- Weibull-Rosin-Rammler ordinaria (WRR):

$$FWRR = 1 - e^{[-(\frac{x}{x_c})^n]}$$

Dónde: x es tamaño de la abertura del tamiz, Xc es el tamaño característico del material fragmentado (tamaño para el que la fracción pasante es  $1 - 1/e = 0.632$ ), n es el parámetro de forma que es la pendiente de la curva log-log en los finos.

- Weibull-Rosin-Rammler truncada (TWRR):

El efecto truncado se obtiene cambiando en la función WRR la variable x (tamaño) por  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{X/X_{max}}{1 - X/X_{max}} = \frac{X}{X_{max} - X}$$



Xmax, es el tamaño máximo en el cual el pasante es 100%, la función queda descrita por la siguiente expresión:

$$FTWRR = 1 - e^{-\left(\frac{X X_{max} - X_c}{X_c X_{max} - X}\right)^n}; \quad 0 \leq x \leq X_{max}$$

- Swebrec (SWE, Ouchterlony 2005):

$$FSWE = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\log\left(\frac{X_{max}}{X}\right)}{\log\left(\frac{X_{max}}{X_{50}}\right)} \right]^5}; \quad 0 \leq x \leq X_{max}$$

### Ajuste de las funciones de distribución

Se han registrado 32 voladuras para la elaboración de este proyecto, solo se han considerado polígonos de mineral, puesto que deben ir a chancadora primaria lugar donde se encuentra la cámara del Sistema Split. Al término del polígono se obtiene una curva de distribución granulométrica del polígono minado.

Los ajustes de las funciones descriptoras de fragmentación a la curva medida por el Split se realiza mediante rutinas de optimización no lineal, considerando dos parámetros libres: tamaño característico Xc y exponente n, en el caso de las Funciones Weibull Rosin Rammler ordinaria y troncada, tamaño medio X50 y exponente b en el caso de la Función Swebrec, manteniendo el parámetro Xmax fijo en el caso de las funciones de tres parámetros, dándole el valor por anticipado del X mayor dado por el Split.

Los resultados de los ajustes se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de funciones representativas de la fragmentación.

Disparo	WRR		TWR			SWE		
	X <sub>c</sub>	n	X <sub>c</sub>	n	X <sub>max</sub>	X <sub>50</sub>	S	X <sub>max</sub>
4100-124 03M1	107.5	0.89	107.8	0.76	1143	70.5	3.28	1143
4100-124 04M1	112.2	0.78	111.6	0.53	609	61	1.75	609
4100-128 02M1	109.9	0.82	109.9	0.69	1143	68.9	2.96	1143
4100-134 02M1	111.7	0.77	112.1	0.66	1143	68.3	2.77	1143
4090-112 02M1	120.7	0.86	121.6	0.73	1143	78	3	1143
4100-137 01M1	96.4	0.72	96.47	0.63	1143	56.9	2.75	1143
4090-115 02M1	68.2	0.72	65.38	0.59	914	37.2	2.72	914
4090-115 05M1	94.5	0.77	93.22	0.64	1143	55.6	2.85	1143
4080-132 02M1	108.4	0.92	108.8	0.72	762	70.6	2.69	762
4080-133 01M1	98.86	0.77	99.24	0.67	1143	61.1	2.95	1143
4080-133 02M1	109	0.74	108.9	0.63	1143	64.7	2.66	1143
4070-120 01M2	135.7	0.85	137.4	0.67	914	86.2	2.45	914
4060-098 01M1	88.78	0.67	87.7	0.57	1143	48.1	2.53	1143
4060-098 06M1	87.19	0.79	86.14	0.67	1143	53	3.09	1143
4060-098 02M1	96	0.74	95.03	0.63	1143	55.9	2.75	1143
4070-123 06M1	101.1	0.74	100.4	0.62	1143	58.9	2.69	1143
4070-125 02M1	88.04	0.71	86.95	0.61	1143	50.2	2.75	1143
4070-125 03M1	97.23	0.74	96.38	0.62	1143	56.3	2.72	1143
4070-122 02M1	101.9	0.81	101.2	0.66	1016	62.1	2.79	1016
4070-122 04M1	108.3	0.77	108.2	0.65	1143	65.3	2.75	1143
4060-099 03M1	94.95	0.71	93.99	0.59	1143	53.5	2.62	1143
4060-099 05M1	105	0.87	105.2	0.74	1143	68.2	3.23	1143
4070-126 02M1	121.8	0.58	117.9	0.42	1143	49.4	1.64	1143
4060-100 01M1	198.1	0.71	206.5	0.51	1143	114.4	1.81	1143
4060-100 03M1	75.29	0.72	73.89	0.62	1143	43.8	3	1143
4060-102 01M1	97.78	0.89	97.37	0.7	762	62.2	2.72	762
4060-102 04M1	67.56	0.75	65.79	0.65	1143	40.4	3.28	1143
4060-106 02M1	96.39	0.77	95.63	0.65	1143	57.7	2.88	1143
4060-105 02M1	75.62	0.77	74.03	0.66	1143	45.4	3.19	1143
4060-107 04M1	101.2	0.86	101	0.73	1143	64.7	3.2	1143
4050-089 01M1	112.7	0.77	112.6	0.65	1143	67.7	2.69	1143
4050-093 02M1	122.1	0.84	122.8	0.71	1143	77.4	2.87	1143

#### Adaptación de la fórmula de Kuznetsov para X<sub>50</sub> y X<sub>80</sub>

De los ajustes no lineales a los que fueron sometidas las funciones descriptoras de fragmentación podemos obtener los parámetros de cada función, en este caso podemos obtener de la función Swebrec el tamaño medio (x50) y tomarlo como dato producto de la voladura.

En el caso del X80 podemos obtenerlo por interpolación en escala log-log, donde las curvas en pequeños intervalos son casi lineales, la interpolación logarítmico-lineal está dada por la expresión:

$$\text{Log}(X_{80}/X_1) = \text{Log}(80/P_1) / \text{Log}(P_2/P_1) * \text{Log}(X_2/x_1)$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  son los dos tamaños medidos que horquillan  $X_{80}$ ,  $P_1$  y  $P_2$  son sus porcentajes pasantes. Es necesario tener un registro en cada voladura de las siguientes variables que intervienen en el modelo:

- Factor de Roca
- Consumo específico  $q$ , en Kg/ m<sup>3</sup>
- Carga media del taladro  $Q$ , en Kg

Energía media  $E$ , en KJ/Kg, donde:  $E = \frac{1}{\sum_{i=1}^{nh} m_i} \sum_{k=1}^{nh} m_i E_i$  ;  $m_i$  es la masa total del taladro y su media es  $Q$ , la energía  $E_i$  es del explosivo cargada en cada taladro en KJ/Kg, este valor es dado por el fabricante del explosivo.

Se puede concluir que las funciones TWRR y la SWE se ajustan muy bien a todos los datos de la curva granulométrica, los ajustes realizados en la WRR tiene las características conocidas: buen ajuste en la zona central gruesa, caída en los finos y tendencia en la zona muy gruesa hacia tamaños excesivos (por su tendencia asintótica al 100%).

Los datos obtenidos de cada voladura se muestran en la Tabla 6.

La ecuación de *Kuznetsov* es muy utilizada en modelos predictivos de fragmentación, fue incorporada en el modelo *Kuz Ram*, propuesto por *Cunningham* (1983, 1987).

Esta ecuación estima el tamaño medio del fragmento que resulta de una voladura en función de sus parámetros, los cuales son: la inversa del consumo específico, la carga media y la potencia en peso relativa al ANFO del explosivo.

La principal virtud de esta fórmula, está probablemente en que contiene las influencias correctas, lo que nos da una ventana de posibilidades de poder variar los tres exponentes conocidos: 0.8, 1/6 y 19/30 y proponer una forma alternativa que se adecue más a la realidad del yacimiento.

Ecuación  $X_{50}$  según Kuznetsov (1973):

$$X_{50} = A * \left(\frac{V_0}{Q}\right)^{0.8} * Q^{1/6} * \left(\frac{115}{E}\right)^{0.633}$$

Donde:

- $X_{50}$  : Tamaño medio (cm)  
 $V_0/Q$  : Inverso del factor de carga (m<sup>3</sup>/Kg)  
 $Q$  : Carga media del taladro (Kg)  
 $E$  : Potencia en peso relativa del explosivo (%)  
 $A$  : Factor de Roca

Partiendo de esta ecuación podemos plantear ecuaciones del mismo tipo, para lo cual necesitamos estimar los exponentes y comprobar la significancia estadística de los mismos. La ecuación está dada por la siguiente expresión:

$$X\alpha = A * (q)^a * Q^b * (E)^c$$

Tabla 6. Variables para la construcción del modelo.

X50	X80	A	q	Q	E
70.50	186.90	4.98	1.1619	362.5000	3609.6399
61.02	222.50	4.98	1.0353	323.0000	3589.1178
68.94	196.70	3.80	1.1319	382.7193	3575.9088
68.31	216.90	3.52	1.1702	365.0902	3660.0000
78.02	210.58	4.78	1.2433	387.9211	3550.6155
56.93	186.70	4.70	1.1895	371.1224	3479.4360
37.16	138.80	3.52	1.2614	393.5662	3510.8934
55.59	182.22	3.52	1.2204	380.7692	3479.4360
70.57	184.69	3.43	0.9266	365.9091	3720.0000
61.06	180.41	3.48	1.0198	344.8214	3667.6748
64.74	204.02	3.48	1.0800	365.1613	3669.9117
89.97	235.89	2.90	0.9671	353.9130	3720.0000
48.13	182.92	3.60	1.0700	361.7797	3720.0000
53.03	164.13	3.60	1.0015	338.6404	3720.0000
55.86	185.51	3.60	1.1215	379.2045	3720.0000
58.95	192.88	4.39	1.1824	399.8113	3659.7959
50.24	173.19	3.57	1.0094	341.2941	3649.3382
56.29	189.73	3.57	0.9911	335.1282	3638.7017
62.08	187.41	2.80	0.7877	288.2500	3850.0000
65.27	200.87	2.78	0.7421	271.5789	3850.0000
53.51	190.20	2.97	0.8746	320.0746	3744.7890
68.18	158.02	2.97	0.9794	358.4118	3720.0000
49.35	278.60	3.19	0.9800	331.3793	3729.8647
125.64	349.15	3.45	0.9347	342.0588	3708.0545
43.75	147.74	3.45	0.9083	332.3810	3640.0000
62.17	170.78	3.25	0.9616	351.8919	3694.9712
40.36	131.14	3.25	0.8418	308.0453	3797.0049
57.71	181.36	3.25	0.8448	309.1489	3780.0000
45.35	145.40	3.59	0.9133	308.7981	3780.0000
64.69	181.32	3.50	1.0743	363.2609	3718.4541
67.73	209.49	3.00	0.5302	224.8958	3780.0000
77.35	217.18	4.00	0.9287	314.0000	3780.0000

Los datos de la Tabla 6 se ajustaron a ecuaciones tipo Kuznetsov a los tamaños X<sub>50</sub> y X<sub>80</sub> mediante algoritmos de ajuste no lineal de Levenberg-Marquardt de mínimos cuadrados, programado en entorno Matlab.

Las estimaciones de los tamaños:  $X_{50}$  y  $X_{80}$  son calculadas a partir de la información registrada de las 32 voladuras, con los siguientes resultados:

- Ecuación  $X_{50}$ :

$$X_{50} = A * (q)^{-0.94} * Q^{0.49}$$

No se ha considerado la energía en el ajuste, debido a la tendencia que esta tiene en relación con el tamaño medio del fragmento obtenido de la voladura. Los exponentes son significantes al 0.05 con intervalos de confianza de: a: [-1.4728, -0.4067], b: [0.4693, 0.5037]. En la Figura 2 se muestra una gráfica del  $x_{50}$  estimado y  $x_{50}$  experimental.

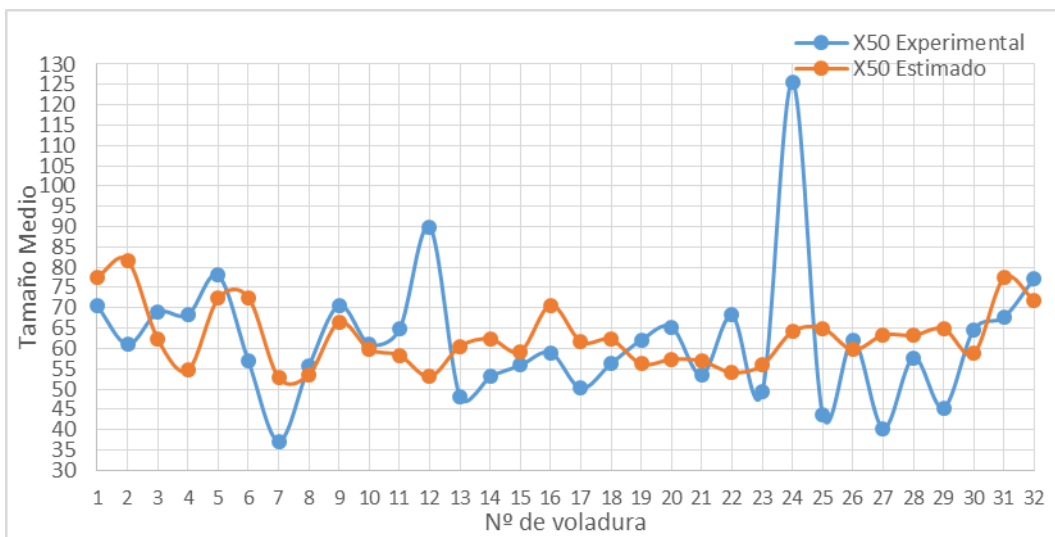


Figura 2. Comparación de  $X_{50}$  experimental y estimado.

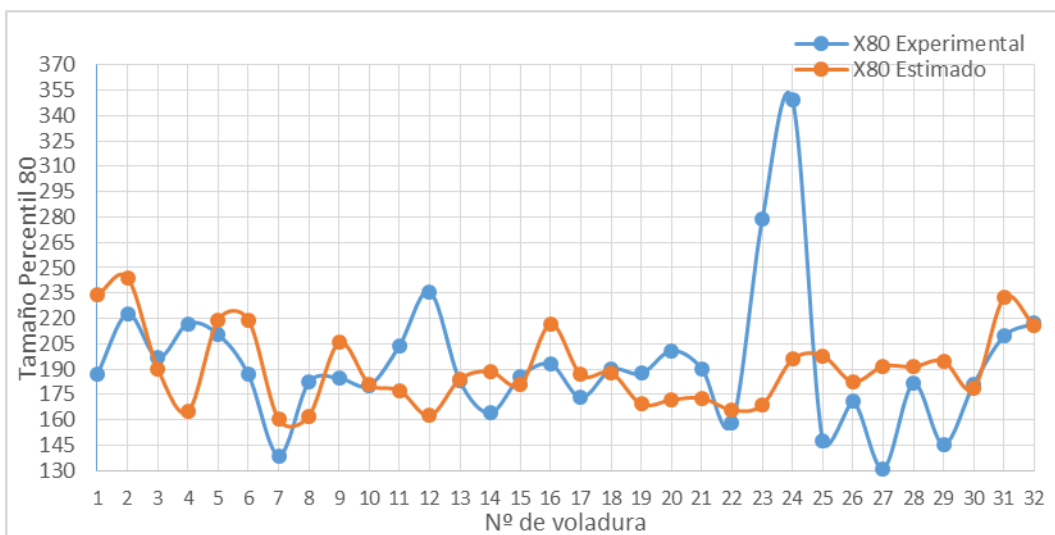


Figura 3. Comparación de  $X_{80}$  medido y estimado.

- Ecuación  $X_{80}$ :

$$X_{80} = A * (q)^{-1.05} * Q^{0.68}$$

Los exponentes son significantes al 0.05 con intervalos de confianza de: a: [-1.5728, -0.5936], b: [0.666, 0.6952]. En la Figura 3 se muestra una gráfica  $x_{80}$  estimado y  $x_{80}$  experimental

## Discusión y conclusiones

Las estimaciones de tamaños  $X_{50}$  y  $X_{80}$  en la práctica ha dado buenos resultados, reproduce de una manera aceptable los tamaños dados por el Split, esto ha permitido realizar modificaciones en los diseños con éxito alcanzando fragmentación esperada y una buena asignación de recursos que se reflejan en los costos.

La exclusión de la energía en el modelo se debe a que la data experimental no refleja la tendencia esperada; ello puede deberse a dos hechos: se necesitan mayor cantidad de datos debido a la alta variabilidad del fenómeno para que se reflejen las tendencias, y/o que las medidas tengan incertidumbre muy alta, es decir los resultados de la medición tienen errores, relacionados con la instalación del sistema de medida (como pueden ser poca iluminación nocturna y variaciones en el posicionamiento de la cámara del Split).

Asimismo, se espera que la incorporación de los tiempos de retardo al modelo, actualmente ausentes, contribuya a que éste capture mejor la variabilidad de la granulometría de la voladura.

Solo mediante la investigación se podrán tener modelos predictivos de fragmentación más confiables y mejores, en los cuales todos los involucrados en voladura de rocas estamos interesados. Desde el punto de vista del negocio, incorporar tecnología y conocimiento da un valor agregado que todas las empresas buscan. Es innegable el beneficio de optar por la investigación.

## Referencias

Cunningham CVB. 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Proc. 1st Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Luleå, Sweden, pp 439-453.

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. 2005. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Techn. (Trans. of the Inst. of Mining & Met. A)* 114: A29–A44.

Sanchidrián JA. 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.

# REPARAMETRIZACIÓN DE LA ECUACIÓN DE KUZNETSOV

ABEL EDUARDO ANCHORENA LÓPEZ <sup>1</sup> JOSÉ ANGEL SANCHIDRIÁN  
BLANCO<sup>2</sup>



# Contenido

- Introducción
- Perforación y Voladura
- Datos:
  - Medición de Fragmentación
  - Constante de Roca
- Análisis de Datos:
  - Funciones Descriptoras
  - Registros de Voladura
  - Tendencias de los Datos Experimentales
  - Resultados obtenidos de los ajustes de las ecuaciones “tipo Kuznetsov”
- Modelo Predictivo de Fragmentación (Preliminar)
- Discusión y Comentarios

# Introducción

Predecir la fragmentación del material volado es sin lugar a duda una herramienta poderosa en la toma de decisiones. Permite seleccionar la mejor alternativa en cuanto a diseños de perforación y voladura, obteniendo como resultado una fragmentación esperada al mejor costo.

El presente trabajo realizado en Mina Lagunas Norte, operación de Barrick Misquichilca en Perú, está orientado a modelar la fragmentación de la pila de un material volado, utilizando ecuaciones “tipo Kuznetsov” para estimar tamaños de fragmentos e incorporarlos a funciones descriptoras de fragmentación.

De manera complementaria se mostrarán resultados en una “etapa preliminar” de un Modelo Predictivo de Fragmentación, el cual utiliza como función descriptora del material volado la Función Swebrec.

# Perforación y Voladura

- Perforación:

- Cuatro perforadoras Terex Reedrill SKS 12 : Diámetros de perforación 9 7/8" y 7 7/8".
- Dos perforadoras Ingersoll Rand DMM2 : Diámetros de perforación 7 7/8".
- Una perforadora Ranger 700 : Diámetros de perforación 4" y 4.5".
- Una perforadora Sandvik DP 1500 i: Diámetros de perforación de 4.5", 5" y 6".



# Perforación y Voladura

- Voladura:

Según los diámetros de perforación se considera lo siguiente:

- Diámetro de 9 7/8" para taladros de producción.
- Diámetro de 7 7/8 para taladros de buffer, contorno y en algunos casos para producción.
- Diámetros de 4.5" y 5" para taladros de pre corte.

Explosivos:

Iniciación: Se utilizan: detonadores electrónicos, booster de 450 gr, exel de 600ms como back up.



# Perforación y Voladura

Densidad y Energía de los explosivos utilizados:

Producto	Densidad (gr/cm3)	Energía Total (Kj/Kg)
ANFO	0.785	3960
HA-28	0.885	3850
HA-37	0.995	3780
HA-46	1.17	3720
HA-45/55	1.26	3655
HA-55	1.26	3640
HA-64	1.32	3479



## Control de la Calidad del Explosivo

- Mediciones de VOD
- Control de Densidades
- Calibraciones de camiones
- Control de Diesel en ANFO
- Análisis Granulométrico de Nitrato

Explosivo	VOD límite Infererio (m/s)	VOD límite Superior (m/s)	VOD Promedio (m/s)
ANFO	3900	4200	-----
HA-28	4300	4600	4581
HA-37	4600	4900	4901
HA-46	4900	5200	5080
HA-45/55	4900	5300	5132
HA-55	5000	5300	5192

# Datos

## *Medición de la Fragmentación :*

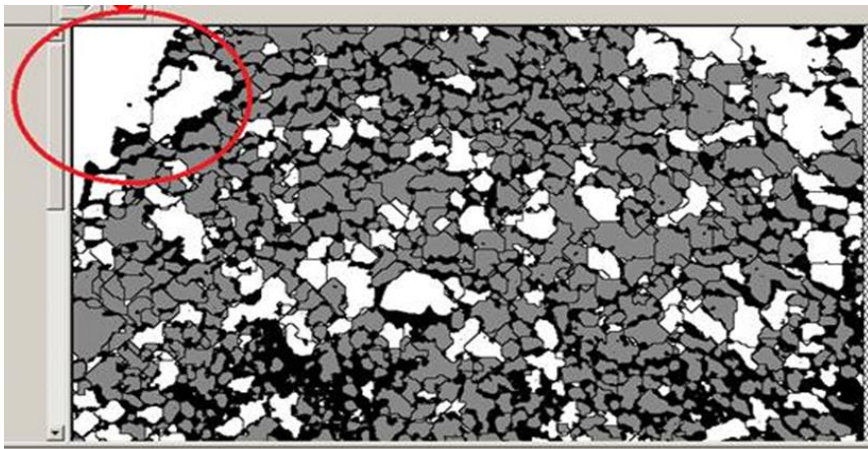
En Mina Lagunas Norte el análisis de la fragmentación post-voladura se efectúa con el Split Online, para lo cual se cuenta con una cámara instalada en chancadora primaria, la cual toma fotografías en el momento de la descarga de los camiones.

El “Fines Cut-off”, en nuestro caso es de 2.78 pulgadas, es decir valores menores serán en realidad extrapolación del sistema. Conocido este valor mínimo, se ha utilizado como último punto medido tres pulgadas.

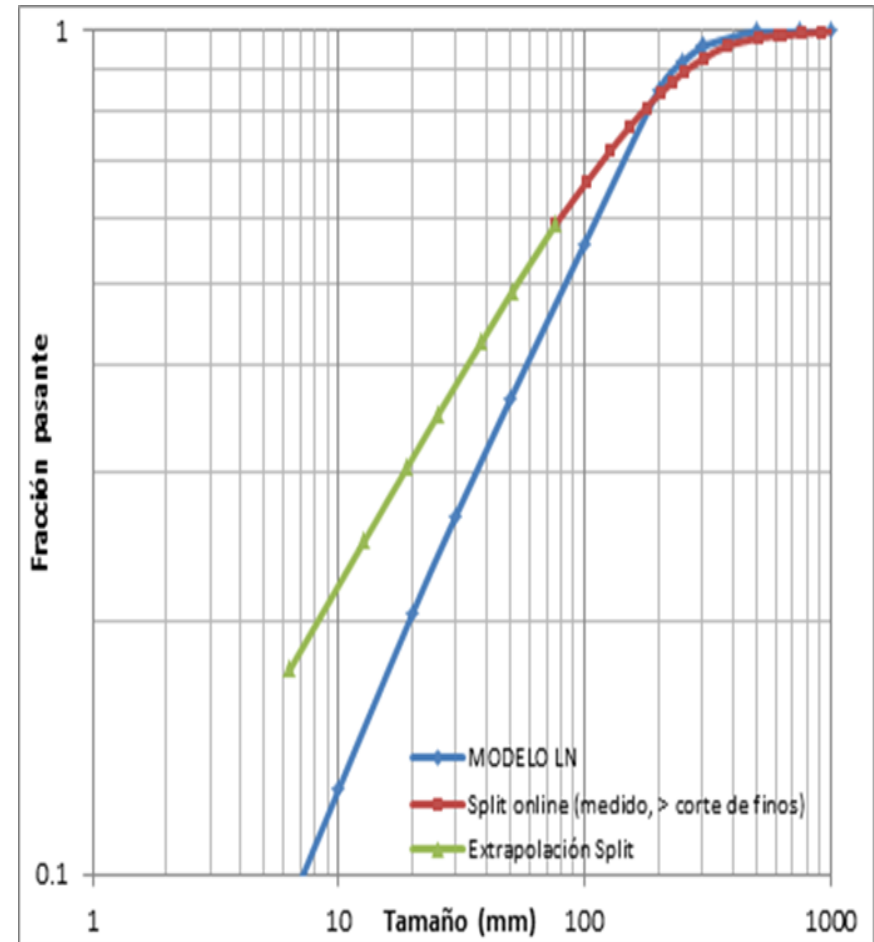
Para validar la simulación de toda la curva granulométrica volada, necesitamos un estimador de algún otro punto inferior de la curva, esta parte del análisis no forma parte de este estudio.

# Datos

Algunos errores en la toma de datos:



Mala posición de la cámara



Tomar toda la curva granulométrica

# Datos

## *Constante de Roca:*

El Factor Roca utilizado es el propuesto por Cunningham (1987) que a su vez es una modificación del propuesto por Lilly (1986).

$$A=0.06(RMD+JF+RDI+HF)$$

$$JF = JPS + JPA$$

PARÁMETRO	RANKING
<b>Descripción de la Masa Rocosa (RMD)</b>	
Pulverulento/Quebradizo	10
Diaclasado verticalmente	JPS + JPA
Masiva	50
<b>Espaciamiento de Fracturas (JPS)</b>	
0.1 m	10
0.1 a sobre tamaño	20
Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
<b>Angulo del Plano de Fracturas (JPA)</b>	
Buza fuera de la cara	20
Rumbo perpendicular a la cara	30
Buza hacia la cara	40
<b>Influencia de la Densidad (RDI)</b>	$RDI=25^{\ast}SG - 50$
<b>Factor Dureza (HF)</b>	E/3 para E<50 GPa, UCS/5 para E>50





# Análisis de Datos

Estudios recientes (Sanchidrián 2013) concluyen que las funciones: Swebrec y Weibull Rosin Rammler Truncada, están entre las mejores funciones de tres parámetros, capaces de representar la granulometría de la roca volada.

Algunas de sus conclusiones son:

- Funciones con asíntotas al 100% en pasante pueden tener errores grandes en el extremo superior, distribuciones truncadas de tres parámetros funcionan muy bien en los gruesos y en la zona central a menudo mejor que las bi-componentes.
- Las funciones de tres parámetros pueden usarse hasta pasantes de 8% a 10%, valores por debajo necesitan distribuciones de cinco parámetros

# Análisis de Datos

Funciones Descriptoras:

El efecto truncado se obtiene:  $\varepsilon = \frac{x}{x_{max}-x}$  ;  $\varepsilon_c = \frac{x_c}{x_{max}-x_c}$

- FTWRR =  $1 - e^{-\left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right]^n}$

**(Función Weibull Rosin Rammler Truncada)**

- FSWE =  $\frac{1}{1 + \left[\frac{\log\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\log\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)}\right]^b}$

**(Función Swebrec)**

# Análisis de Datos

## Parámetros de las Funciones Descriptoras

- Se obtuvieron mediante ajustes no lineales.
- Por encima del “corte de finos”, al estimar el  $X_{50}$  se utilizó la expresión :
  - $\text{Log}(X_{50}/X_1) = \text{Log}(50/P_1) / \text{Log}(P_2/P_1) \cdot \text{Log}(X_2/X_1)$
- El ajuste de la función Weibull Rosin Rammler ordinaria es solo referencial.

Disparo	WRR		TWR			SWE		
	$X_c$	n	$X_c$	n	$X_{max}$	$X_{50}$	S	$X_{max}$
4100-124 03M1	107.5	0.89	107.8	0.76	1143	70.5	3.28	1143
4100-124 04M1	112.2	0.78	111.6	0.53	609	61	1.75	609
4100-128 02M1	109.9	0.82	109.9	0.69	1143	68.9	2.96	1143
4100-134 02M1	111.7	0.77	112.1	0.66	1143	68.3	2.77	1143
4090-112 02M1	120.7	0.86	121.6	0.73	1143	78	3	1143
4100-137 01M1	96.4	0.72	96.47	0.63	1143	56.9	2.75	1143
4090-115 02M1	68.2	0.72	65.38	0.59	914	37.2	2.72	914
4090-115 05M1	94.5	0.77	93.22	0.64	1143	55.6	2.85	1143
4080-132 02M1	108.4	0.92	108.8	0.72	762	70.6	2.69	762
4080-133 01M1	98.86	0.77	99.24	0.67	1143	61.1	2.95	1143
4080-133 02M1	109	0.74	108.9	0.63	1143	64.7	2.66	1143
4070-120 01M2	135.7	0.85	137.4	0.67	914	86.2	2.45	914
4060-098 01M1	88.78	0.67	87.7	0.57	1143	48.1	2.53	1143
4060-098 06M1	87.19	0.79	86.14	0.67	1143	53	3.09	1143
4060-098 02M1	96	0.74	95.03	0.63	1143	55.9	2.75	1143
4070-123 06M1	101.1	0.74	100.4	0.62	1143	58.9	2.69	1143
4070-125 02M1	88.04	0.71	86.95	0.61	1143	50.2	2.75	1143
4070-125 03M1	97.23	0.74	96.38	0.62	1143	56.3	2.72	1143
4070-122 02M1	101.9	0.81	101.2	0.66	1016	62.1	2.79	1016
4070-122 04M1	108.3	0.77	108.2	0.65	1143	65.3	2.75	1143
4060-099 03M1	94.95	0.71	93.99	0.59	1143	53.5	2.62	1143
4060-099 05M1	105	0.87	105.2	0.74	1143	68.2	3.23	1143
4070-126 02M1	121.8	0.58	117.9	0.42	1143	49.4	1.64	1143
4060-100 01M1	198.1	0.71	206.5	0.51	1143	114.4	1.81	1143
4060-100 03M1	75.29	0.72	73.89	0.62	1143	43.8	3	1143
4060-102 01M1	97.78	0.89	97.37	0.7	762	62.2	2.72	762
4060-102 04M1	67.56	0.75	65.79	0.65	1143	40.4	3.28	1143
4060-106 02M1	96.39	0.77	95.63	0.65	1143	57.7	2.88	1143
4060-105 02M1	75.62	0.77	74.03	0.66	1143	45.4	3.19	1143
4060-107 04M1	101.2	0.86	101	0.73	1143	64.7	3.2	1143
4050-089 01M1	112.7	0.77	112.6	0.65	1143	67.7	2.69	1143
4050-093 02M1	122.1	0.84	122.8	0.71	1143	77.4	2.87	1143

# Análisis de Datos

- Registros de voladura:

- Factor de Roca:  $A$

- Consumo Específico:  $q$  (Kg/m<sup>3</sup>);

- Carga Media del Taladro:  $Q$  (Kg);

- Energía Media del Taladro:  $E$  (KJ/Kg);

Índice de volabilidad Cunningham (1987)

$$q = \sum_1^n m_i / n \cdot V_0$$

$$Q = \sum_1^n m_i / n$$

$$E = \frac{1}{\sum_1^n m_i} \sum_{i=1}^n E_i \cdot m_i$$

# Análisis de Datos

Los datos obtenidos son sometidos a algoritmos de ajuste no lineal de Levenberg-Marquardt de mínimos cuadrados.

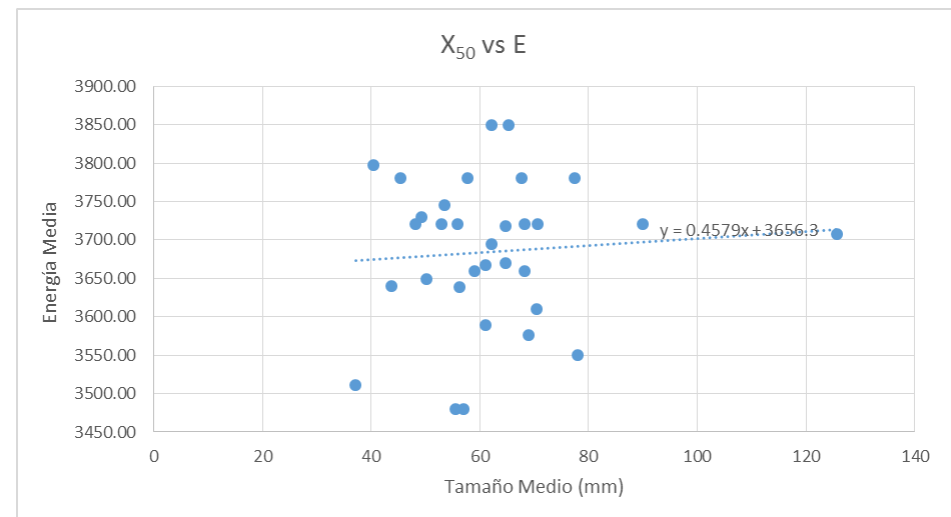
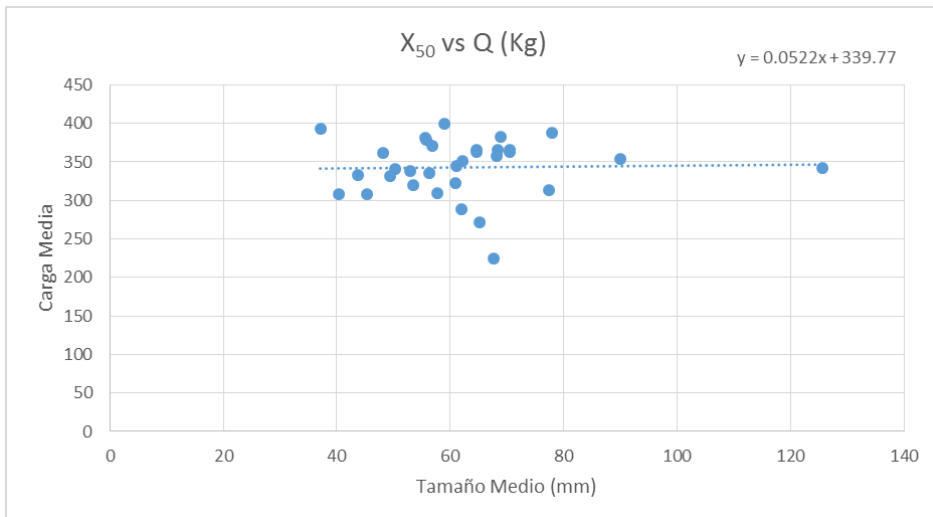
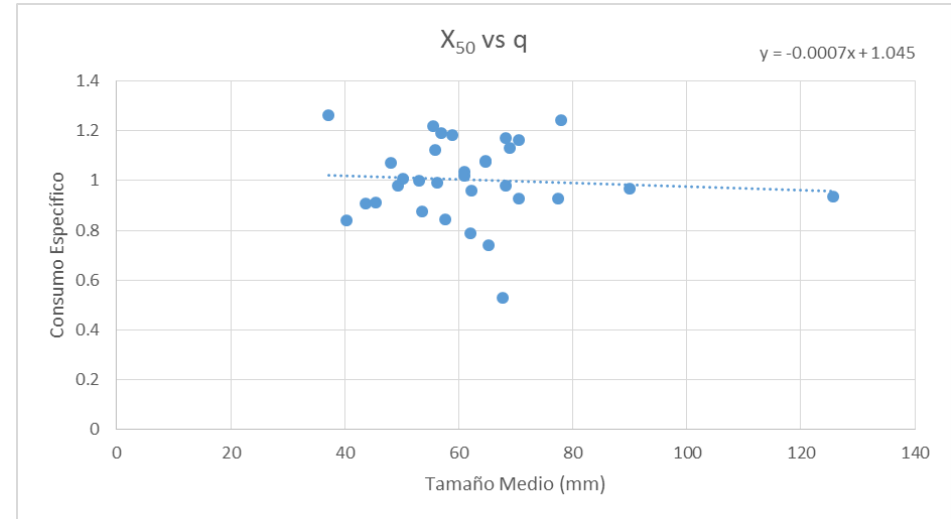
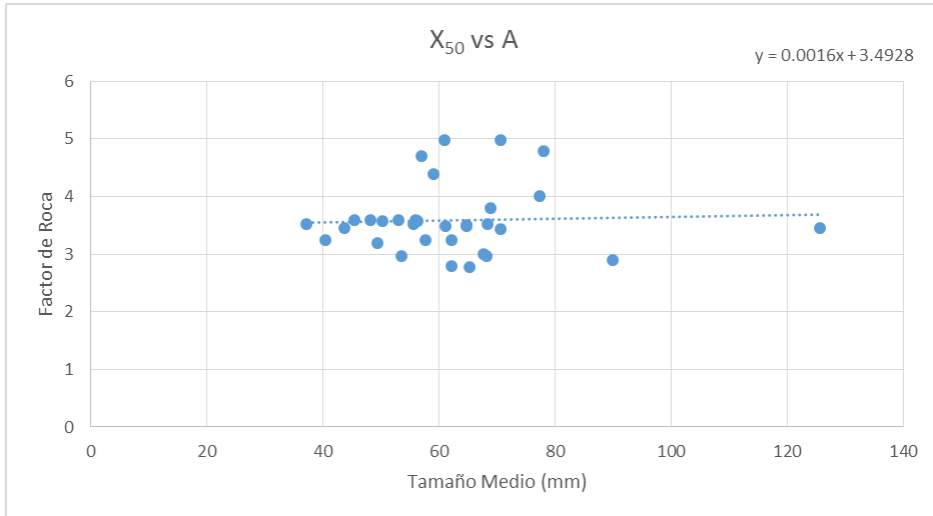
Ajuste a ecuación “*Tipo Kuznetsov*” de la forma:

$$X_{\alpha} = A \cdot q^a \cdot Q^b \cdot E^c$$

X50	X80	A	q	Q	E
70.50	186.90	4.98	1.1619	362.5000	3609.6399
61.02	222.50	4.98	1.0353	323.0000	3589.1178
68.94	196.70	3.80	1.1319	382.7193	3575.9088
68.31	216.90	3.52	1.1702	365.0902	3660.0000
78.02	210.58	4.78	1.2433	387.9211	3550.6155
56.93	186.70	4.70	1.1895	371.1224	3479.4360
37.16	138.80	3.52	1.2614	393.5662	3510.8934
55.59	182.22	3.52	1.2204	380.7692	3479.4360
70.57	184.69	3.43	0.9266	365.9091	3720.0000
61.06	180.41	3.48	1.0198	344.8214	3667.6748
64.74	204.02	3.48	1.0800	365.1613	3669.9117
89.97	235.89	2.90	0.9671	353.9130	3720.0000
48.13	182.92	3.60	1.0700	361.7797	3720.0000
53.03	164.13	3.60	1.0015	338.6404	3720.0000
55.86	185.51	3.60	1.1215	379.2045	3720.0000
58.95	192.88	4.39	1.1824	399.8113	3659.7959
50.24	173.19	3.57	1.0094	341.2941	3649.3382
56.29	189.73	3.57	0.9911	335.1282	3638.7017
62.08	187.41	2.80	0.7877	288.2500	3850.0000
65.27	200.87	2.78	0.7421	271.5789	3850.0000
53.51	190.20	2.97	0.8746	320.0746	3744.7890
68.18	158.02	2.97	0.9794	358.4118	3720.0000
49.35	278.60	3.19	0.9800	331.3793	3729.8647
125.64	349.15	3.45	0.9347	342.0588	3708.0545
43.75	147.74	3.45	0.9083	332.3810	3640.0000
62.17	170.78	3.25	0.9616	351.8919	3694.9712
40.36	131.14	3.25	0.8418	308.0453	3797.0049
57.71	181.36	3.25	0.8448	309.1489	3780.0000
45.35	145.40	3.59	0.9133	308.7981	3780.0000
64.69	181.32	3.50	1.0743	363.2609	3718.4541
67.73	209.49	3.00	0.5302	224.8958	3780.0000
77.35	217.18	4.00	0.9287	314.0000	3780.0000

# Análisis de Datos

Tendencias de los Datos experimentales:



# Análisis de Datos

- Los resultados obtenidos de los datos experimentales son los correctos respecto a: Factor de Roca, Consumo Específico y Carga Media.
- Respecto a la Energía la tendencia no es la correcta, debería tener una tendencia decreciente. La incongruencia en el resultado se debe probablemente a lo limitada de la base de datos, lo cual se espera mejorar en el futuro, con la incorporación de un mayor número de voladuras.
- El mejor ajuste que se puede proponer, de acuerdo con los datos actuales, debe ser “sin considerar la Energía” (por el momento).



# Resultados Obtenidos

- Ecuación  $X_{50}$ :

$$X_{50} = A * (q)^{-0.94} * Q^{0.49}$$

Los exponentes son significantes al 0.05 con intervalos de confianza de:  
a: [-1.4728, -0.4067], b: [0.4693, 0.5037].

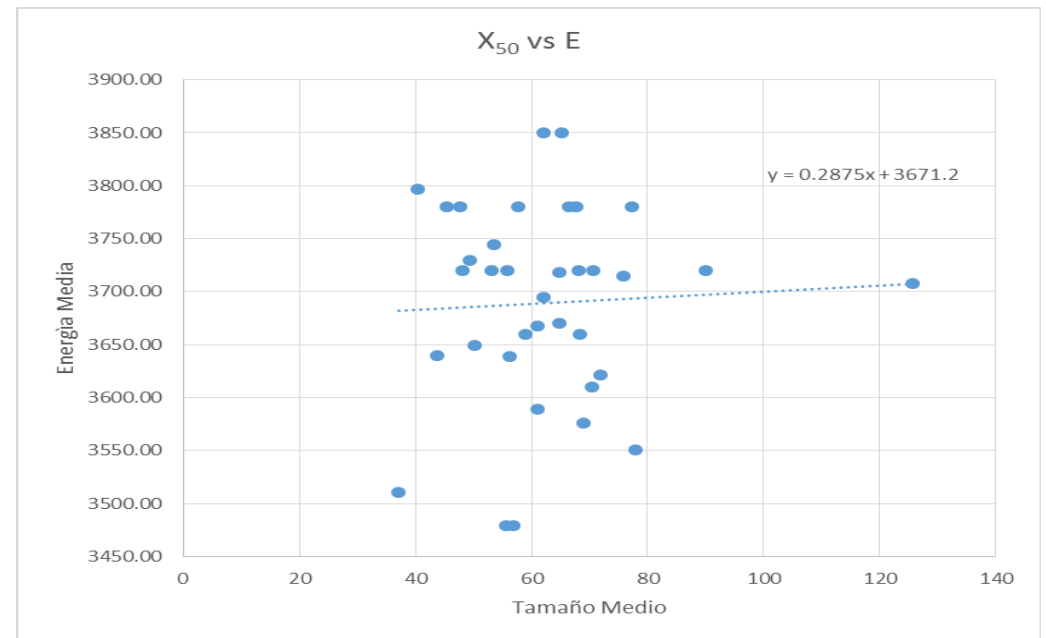
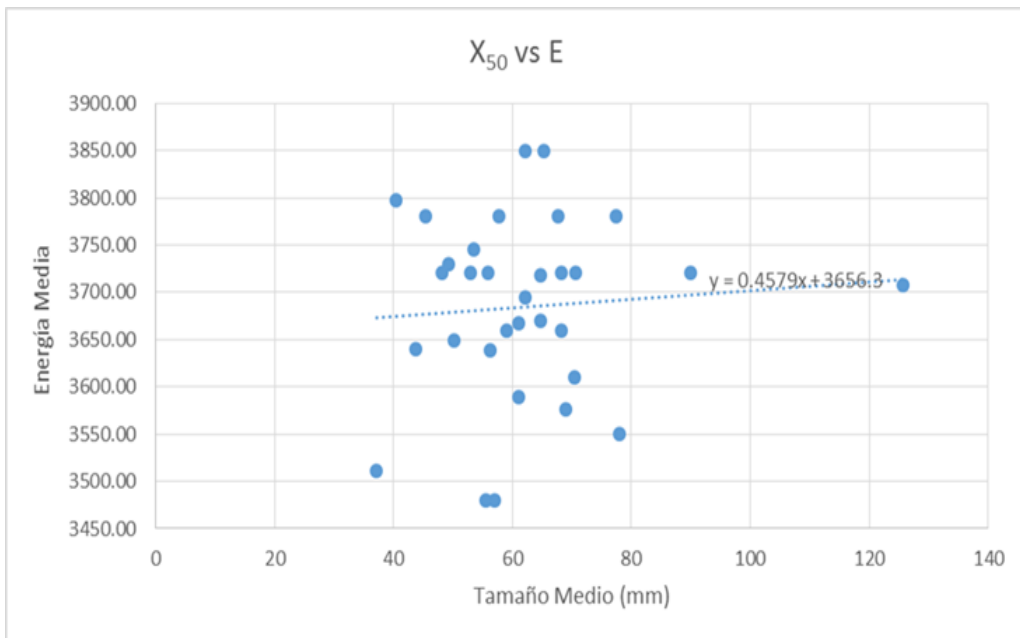
- Ecuación  $X_{80}$ :

$$X_{80} = A * (q)^{-1.05} * Q^{0.68}$$

Los exponentes son significantes al 0.05 con intervalos de confianza de:  
a: [-1.5728, -0.5936], b: [0.666, 0.6952].

# Modelo Predictivo de Fragmentación (Preliminar)

Con la incorporación de cuatro voladuras al análisis, en las cuales se utilizó diámetro de 7 7/8” en taladros de producción, se puede apreciar una mejora en las tendencias, esto se puede atribuir a que se ha producido una mayor variabilidad en los datos, sin embargo, la energía aún no tiene el resultado esperado, pero se observa una mejor tendencia.



# Modelo Predictivo de Fragmentación (Preliminar)

## >> Kunestsov v1: X<sub>50</sub>

Exponentes: -0.8936 0.4862

Intervalos de Confianza:

[-1.3108 -0.4764] [0.4704 0.5020]

## >> Kunestsov v1: X<sub>80</sub>

Exponentes: -0.9731 0.679

Intervalos de Confianza:

[-1.3337 -0.6125] [0.6661 0.6929]

## >> Kunestsov v1: X<sub>max</sub>

Exponentes: -1.1852 0.9747

Intervalos de Confianza:

[-1.4817 -0.8887] [0.9638 0.9857]

X50	X80	Xmax	A	q	Q	E
70.50	186.90	1143.00	4.98	1.1619	362.5000	3609.6399
61.02	222.50	609.60	4.98	1.0353	323.0000	3589.1178
68.94	196.70	1143.00	3.80	1.1319	382.7193	3575.9088
68.31	216.90	1143.00	3.52	1.1702	365.0902	3660.0000
78.02	210.58	1143.00	4.78	1.2433	387.9211	3550.6155
56.93	186.70	1143.00	4.70	1.1895	371.1224	3479.4360
37.16	138.80	914.00	3.52	1.2614	393.5662	3510.8934
55.59	182.22	1143.00	3.52	1.2204	380.7692	3479.4360
70.57	184.69	762.00	3.43	0.9266	365.9091	3720.0000
61.06	180.41	1143.00	3.48	1.0198	344.8214	3667.6748
64.74	204.02	1143.00	3.48	1.0800	365.1613	3669.9117
86.24	235.89	914.00	2.90	0.9671	353.9130	3720.0000
48.13	182.92	1143.00	3.60	1.0700	361.7797	3720.0000
53.03	164.13	1143.00	3.60	1.0015	338.6404	3720.0000
55.86	185.51	1143.00	3.60	1.1215	379.2045	3720.0000
58.95	192.88	1143.00	4.39	1.1824	399.8113	3659.7959
50.24	173.19	1143.00	3.57	1.0094	341.2941	3649.3382
56.29	189.73	1143.00	3.57	0.9911	335.1282	3638.7017
62.08	187.41	1016.00	2.80	0.7877	288.2500	3850.0000
65.27	200.87	1143.00	2.78	0.7421	271.5789	3850.0000
53.51	190.20	1143.00	2.97	0.8746	320.0746	3744.7890
68.18	158.02	1143.00	2.97	0.9794	358.4118	3720.0000
49.35	278.60	1143.00	3.19	0.9800	331.3793	3729.8647
114.36	349.15	1143.00	3.45	0.9347	342.0588	3708.0545
43.75	147.74	1143.00	3.45	0.9083	332.3810	3640.0000
62.17	170.78	762.00	3.25	0.9616	351.8919	3694.9712
40.36	131.14	1143.00	3.25	0.8418	308.0453	3797.0049
57.71	181.36	1143.00	3.25	0.8448	309.1489	3780.0000
45.35	145.40	1143.00	3.59	0.9133	308.7981	3780.0000
64.69	181.32	1143.00	3.50	1.0743	363.2609	3718.4541
67.73	209.49	1143.00	3.00	0.5302	224.8958	3780.0000
77.35	217.18	1143.00	4.00	0.9287	314.0000	3780.0000
66.36	182.16	1066.80	3.14	0.6103	206.3636	3780.0000
47.65	168.53	1143.00	3.14	0.6648	224.7917	3780.0000
75.76	204.79	1016.00	3.38	0.7828	309.1176	3714.5108
71.90	203.79	1143.00	3.38	0.7097	280.2564	3621.7433

# Modelo Predictivo de Fragmentación (Preliminar)

Se ha estimado de manera preliminar  $X_{max}$ , utilizando la información que da el Split Online antes de que la curva se vuelva asintótica (99.8% 99.9%).

• **Cálculo de  $b$ :** Si  $P(x=x_{80})=0.8$

$$\begin{aligned}X_{50} &= A * (q)^{-0.8936} * Q^{0.4862} \\X_{80} &= A * (q)^{-0.9731} * Q^{0.6795} \\X_{max} &= A * (q)^{-1.1852} * Q^{0.9747}\end{aligned}$$

$$b = \frac{\log(0.25)}{\log\left(\frac{\log\left(\frac{x_{max}}{x_{80}}\right)}{\log\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)}\right)}$$

El modelo es representado por la Función Swebrec:

$$P(x) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\log\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\log\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)}\right]^b}$$

# Aplicación del Modelo

<b>Modelo Predictivo Mina Lagunas Norte</b>	
Diámetro del taladro (mm)	251
Densidad del Explosivo (gr/cm3)	1.17
Stemming (m)	5
Altura del banco (m)	10
Sobre perforación	1
Burden (m)	5.41
Espaciamiento (m)	6.25
Carga Media: Q (m)	347.18
Volumen: Vo (m3)	338.125
Densidad de la Roca (gr/cm3)	2.6
Resistencia Compresiva: UCS (MPa)	160
Módulo de Young : E (Gpa)	11.4

<b>Factor de Roca Cunningham(1987)</b>	
RMD	60
JPS	20
JPA	40
SGI	15
HI	3.8

<b>A</b>	4.728
<b>q</b>	1.026778886
<b>Q</b>	347.1796107

$X_{50}$ (mm)	79.37
$X_{80}$ (mm)	245.37
$X_{max}$ (mm)	1372.00

Proyecto: 7-4050-125

<b>Modelo Predictivo Mina Lagunas Norte</b>	
Diámetro del taladro (mm)	251
Densidad del Explosivo (gr/cm3)	0.995
Stemming (m)	5
Altura del banco (m)	10
Sobre perforación	1
Burden (m)	5.63
Espaciamiento (m)	6.5
Carga Media: Q (m)	295.25
Volumen: Vo (m3)	365.95
Densidad de la Roca (gr/cm3)	2.58
Resistencia Compresiva: UCS (MPa)	192.7
Módulo de Young : E (Gpa)	12.4

<b>Factor de Roca Cunningham(1987)</b>	
RMD	40
JPS	20
JPA	20
SGI	14.5
HI	4.1

<b>A</b>	3.518
<b>q</b>	0.80680704
<b>Q</b>	295.2510365

$X_{50}$ (mm)	67.70
$X_{80}$ (mm)	206.78
$X_{max}$ (mm)	1160.08

Proyecto: 8-4070-132

# Aplicación del Modelo

<b>Modelo Predictivo Mina Lagunas Norte</b>	
Diámetro del taladro (mm)	251
Densidad del Explosivo (gr/cm <sup>3</sup> )	0.995
Stemming (m)	5
Altura del banco (m)	10
Sobre perforación	1
Burden (m)	5.63
Espaciamiento (m)	6.5
Carga Media: Q (m)	295.25
Volumen: Vo (m <sup>3</sup> )	365.95
Densidad de la Roca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.6
Resistencia Compresiva: UCS (MPa)	188.8
Módulo de Young : E (Gpa)	11.4

<b>Factor de Roca Cunningham(1987)</b>	
RMD	35
JPS	20
JPA	15
SGI	15
HI	3.8

A	3.228
q	0.80680704
Q	295.2510365

X <sub>50</sub> (mm)	62.12
X <sub>80</sub> (mm)	189.74
X <sub>max</sub> (mm)	1064.45

Proyecto: 8-4040-080

<b>Modelo Predictivo Mina Lagunas Norte</b>	
Diámetro del taladro (mm)	251
Densidad del Explosivo (gr/cm <sup>3</sup> )	0.995
Stemming (m)	5
Altura del banco (m)	10
Sobre perforación	1
Burden (m)	5.41
Espaciamiento (m)	6.25
Carga Media: Q (m)	295.25
Volumen: Vo (m <sup>3</sup> )	338.125
Densidad de la Roca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.59
Resistencia Compresiva: UCS (MPa)	207.8
Módulo de Young : E (Gpa)	14.25

<b>Factor de Roca Cunningham(1987)</b>	
RMD	40
JPS	20
JPA	20
SGI	14.75
HI	4.75

A	3.57
q	0.873200847
Q	295.2510365

X <sub>50</sub> (mm)	64.02
X <sub>80</sub> (mm)	194.30
X <sub>max</sub> (mm)	1071.90

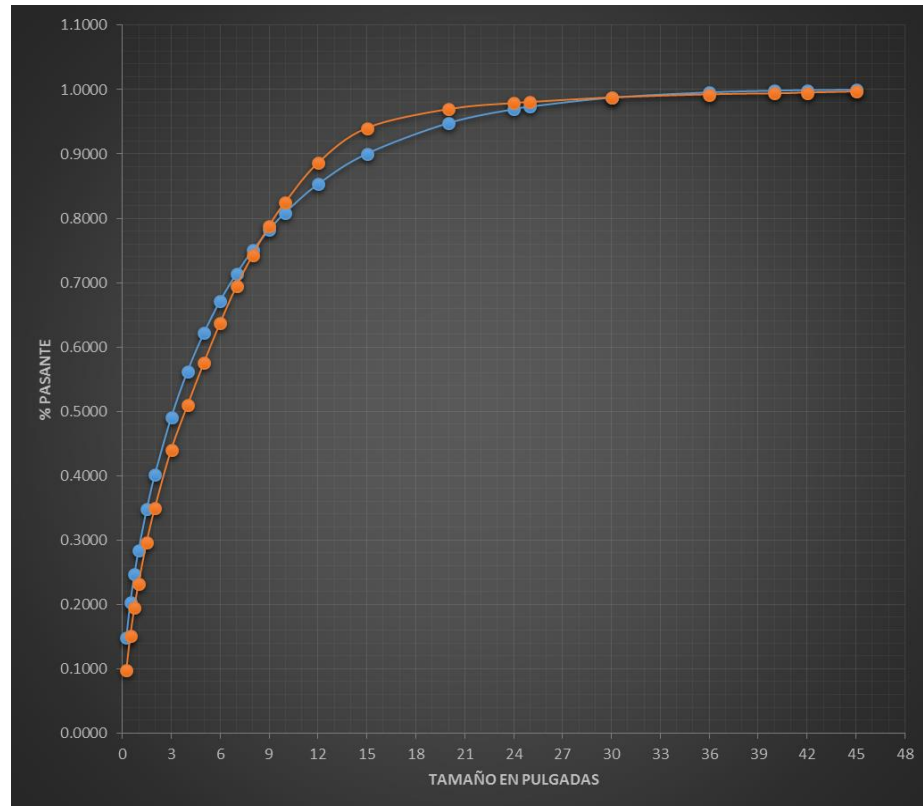
Proyecto: 8-4040-083

# Aplicación del Modelo

Proyecto: 7-4050-125 02M1

P(80) Modelo 9.7"

P(80) Split 9.3"



mm	Split Online		Ksweb		STR	STC
	P	1-P	P	1-P		
6.35	0.098	0.9025	0.1487	0.8513	0.0026	0.33606175
12.7	0.152	0.8484	0.2034	0.7966	0.0027	0.30339501
19.05	0.195	0.8050	0.2467	0.7533	0.0027	0.283503
25.4	0.232	0.7677	0.2840	0.7160	0.0027	0.27092521
38.1	0.296	0.7036	0.3475	0.6525	0.0026	0.2327387
50.8	0.35	0.6504	0.4013	0.5987	0.0027	0.2066803
76.2	0.44	0.5601	0.4903	0.5097	0.0025	0.15177084
101.6	0.509	0.4909	0.5620	0.4380	0.0028	0.11785085
127	0.575	0.4250	0.6214	0.3786	0.0022	0.08931132
152.4	0.637	0.3629	0.6714	0.3286	0.0012	0.0658812
177.8	0.694	0.3060	0.7140	0.2860	0.0004	0.04757073
203.2	0.743	0.2570	0.7504	0.2496	0.0001	0.03455309
228.6	0.788	0.2122	0.7817	0.2183	0.0000	0.02451573
254	0.825	0.1750	0.8088	0.1912	0.0003	0.01785139
304.8	0.886	0.1142	0.8528	0.1472	0.0011	0.00742527
381	0.94	0.0600	0.9001	0.0999	0.0016	0.00172594
508	0.969	0.0306	0.9477	0.0523	0.0005	0.00030059
609.6	0.979	0.0212	0.9694	0.0306	0.0001	0.00010846
635	0.98	0.0196	0.9733	0.0267	0.0001	0.0001113
762	0.987	0.0126	0.9871	0.0129	0.0000	3.2036E-05
914.4	0.992	0.0077	0.9953	0.0047	0.0000	4.7306E-06
1016	0.994	0.0062	0.9979	0.0021	0.0000	1.96E-06
1066.8	0.995	0.0049	0.9987	0.0013	0.0000	6.4E-07
1143	0.997	0.0033	0.9995	0.0005	0.0000	0

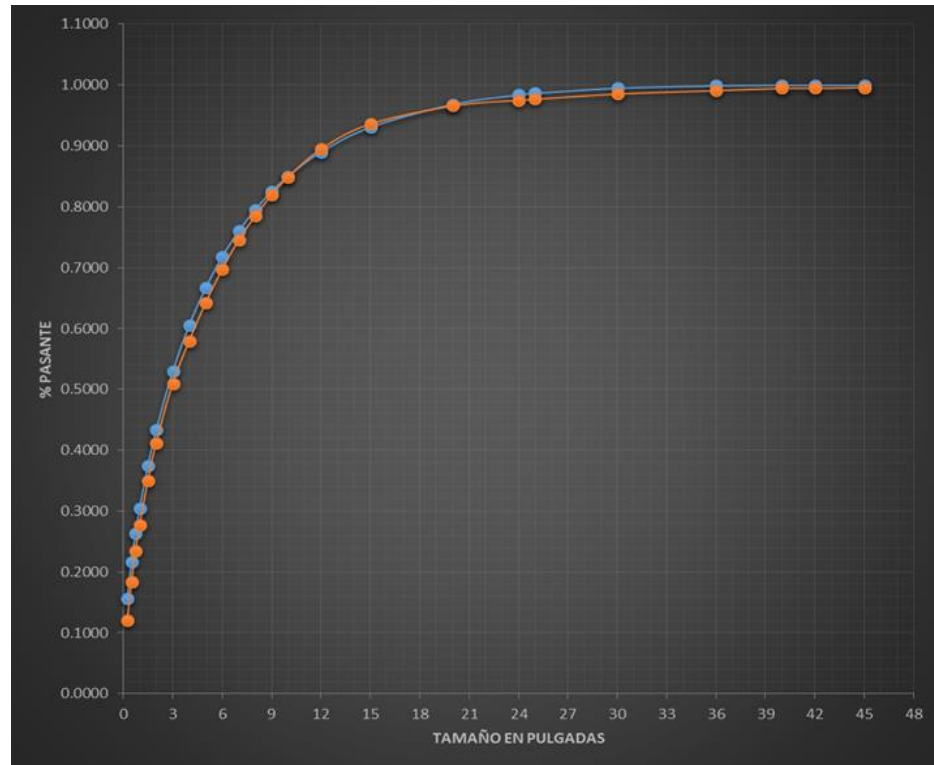
**R<sup>2</sup>= 99%**

# Aplicación del Modelo

Proyecto: 8-4070-132 01M1

P(80) Modelo 8.2"

P(80) Split 8.4"



mm	Split Online		Ksweb		STR	STC
	P	1-P	P	1-P		
6.35	0.12	0.8799	0.1567	0.8433	0.0013	0.342147
12.7	0.184	0.8160	0.2165	0.7835	0.0011	0.29862423
19.05	0.235	0.7654	0.2641	0.7359	0.0009	0.27113322
25.4	0.278	0.7223	0.3051	0.6949	0.0007	0.25240576
38.1	0.35	0.6497	0.3748	0.6252	0.0006	0.20695221
50.8	0.412	0.5876	0.4335	0.5665	0.0004	0.17369153
76.2	0.51	0.4905	0.5295	0.4705	0.0004	0.11752327
101.6	0.58	0.4204	0.6054	0.3946	0.0007	0.08578007
127	0.642	0.3576	0.6671	0.3329	0.0006	0.06169635
152.4	0.697	0.3028	0.7179	0.2821	0.0004	0.04416162
177.8	0.746	0.2544	0.7601	0.2399	0.0002	0.03124309
203.2	0.785	0.2151	0.7955	0.2045	0.0001	0.02281726
228.6	0.819	0.1806	0.8253	0.1747	0.0000	0.01667757
254	0.849	0.1509	0.8506	0.1494	0.0000	0.0123614
304.8	0.895	0.1047	0.8903	0.1097	0.0000	0.00579121
381	0.937	0.0634	0.9309	0.0691	0.0000	0.00187104
508	0.966	0.0338	0.9687	0.0313	0.0000	0.00036338
609.6	0.976	0.0245	0.9841	0.0159	0.0001	0.00015589
635	0.977	0.0228	0.9867	0.0133	0.0001	0.00016555
762	0.986	0.0142	0.9951	0.0049	0.0001	4.6786E-05
914.4	0.991	0.0086	0.9990	0.0010	0.0001	8.7025E-06
1016	0.995	0.0050	0.9998	0.0002	0.0000	1.1111E-07
1066.8	0.995	0.0050	0.9999	0.0001	0.0000	2.5E-07
1143	0.996	0.0040	1.0000	0.0000	0.0000	0

**R<sup>2</sup>= 99%**

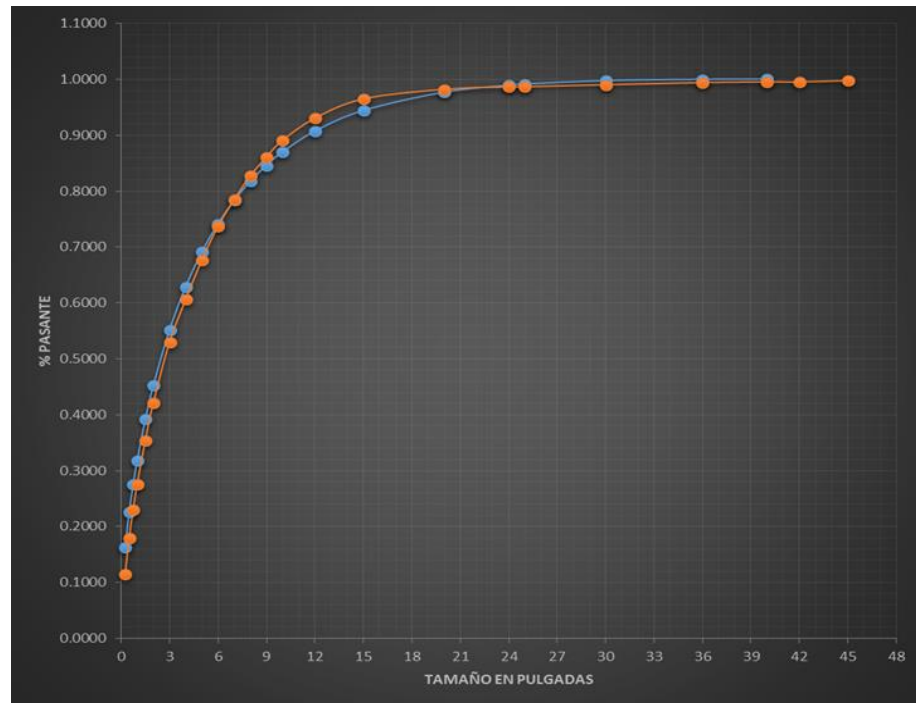


# Aplicación del Modelo

Proyecto: 8-4040-080 01M1

P(80) Modelo 7.5"

P(80) Split 7.4"



mm	Split Online		Ksweb		STR	STC
	P	1-P	P	1-P		
6.35	0.114	0.8858	0.1629	0.8371	0.0024	0.36863112
12.7	0.18	0.8202	0.2257	0.7743	0.0021	0.2932764
19.05	0.231	0.7695	0.2757	0.7243	0.0020	0.24093372
25.4	0.276	0.7241	0.3186	0.6814	0.0018	0.1984257
38.1	0.354	0.6457	0.3915	0.6085	0.0014	0.1347257
50.8	0.422	0.5783	0.4526	0.5474	0.0010	0.08979012
76.2	0.529	0.4706	0.5516	0.4484	0.0005	0.0368448
101.6	0.606	0.3939	0.6290	0.3710	0.0005	0.01328256
127	0.677	0.3234	0.6911	0.3089	0.0002	0.00200256
152.4	0.737	0.2631	0.7416	0.2584	0.0000	0.0002418
177.8	0.785	0.2148	0.7831	0.2169	0.0000	0.00407682
203.2	0.827	0.1728	0.8174	0.1826	0.0001	0.01120422
228.6	0.861	0.1389	0.8460	0.1540	0.0002	0.01953006
254	0.891	0.1091	0.8700	0.1300	0.0004	0.0287472
304.8	0.93	0.0696	0.9071	0.0929	0.0005	0.0437019
381	0.965	0.0352	0.9440	0.0560	0.0004	0.0592679
508	0.982	0.0179	0.9767	0.0233	0.0000	0.06799056
609.6	0.986	0.0137	0.9893	0.0107	0.0000	0.0701985
635	0.987	0.0134	0.9913	0.0087	0.0000	0.07035756
762	0.99	0.0098	0.9974	0.0026	0.0001	0.07228032
914.4	0.994	0.0060	0.9997	0.0003	0.0000	0.07433802
1016	0.995	0.0047	1.0000	0.0000	0.0000	0.0750486
1066.8	0.995	0.0047	1.0000	0.0000	0.0000	0.0750486
1143	0.998	0.0024	1.0000	0.0000	0.0000	0.07631406

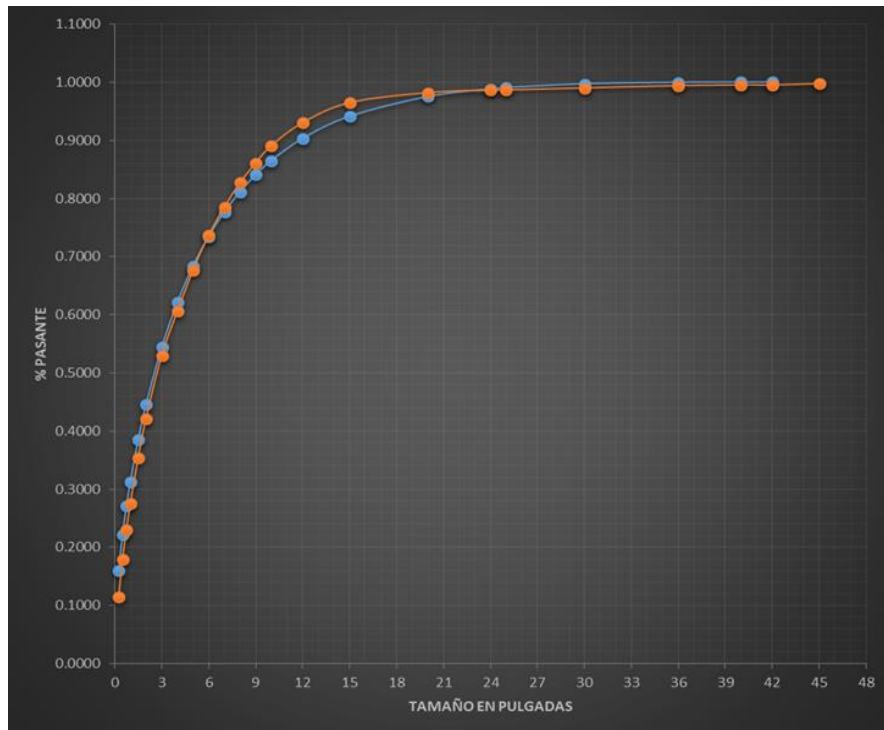
**R<sup>2</sup> = 99%**

# Aplicación del Modelo

Proyecto: 8-4040-083 02M1

P(80) Modelo 7.7"

P(80) Split 7.4"



mm	Split Online		Kswab		STR	STC
	P	1-P	P	1-P		
6.35	0.114	0.8858	0.1601	0.8399	0.0021	0.36863112
12.7	0.18	0.8202	0.2217	0.7783	0.0018	0.2932764
19.05	0.231	0.7695	0.2709	0.7291	0.0016	0.24093372
25.4	0.276	0.7241	0.3132	0.6868	0.0014	0.1984257
38.1	0.354	0.6457	0.3851	0.6149	0.0010	0.1347257
50.8	0.422	0.5783	0.4456	0.5544	0.0006	0.08979012
76.2	0.529	0.4706	0.5440	0.4560	0.0002	0.0368448
101.6	0.606	0.3939	0.6214	0.3786	0.0002	0.01328256
127	0.677	0.3234	0.6837	0.3163	0.0001	0.00200256
152.4	0.737	0.2631	0.7346	0.2654	0.0000	0.0002418
177.8	0.785	0.2148	0.7766	0.2234	0.0001	0.00407682
203.2	0.827	0.1728	0.8115	0.1885	0.0002	0.01120422
228.6	0.861	0.1389	0.8407	0.1593	0.0004	0.01953006
254	0.891	0.1091	0.8651	0.1349	0.0007	0.0287472
304.8	0.93	0.0696	0.9032	0.0968	0.0007	0.0437019
381	0.965	0.0352	0.9413	0.0587	0.0006	0.0592679
508	0.982	0.0179	0.9753	0.0247	0.0000	0.06799056
609.6	0.986	0.0137	0.9885	0.0115	0.0000	0.0701985
635	0.987	0.0134	0.9906	0.0094	0.0000	0.07035756
762	0.99	0.0098	0.9971	0.0029	0.0000	0.07228032
914.4	0.994	0.0060	0.9997	0.0003	0.0000	0.07433802
1016	0.995	0.0047	1.0000	0.0000	0.0000	0.0750486
1066.8	0.995	0.0047	1.0000	0.0000	0.0000	0.0750486
1143	0.998	0.0024	1.0000	0.0000	0.0000	0.07631406

**R<sup>2</sup> = 99%**

# Discusión y Conclusiones

- Las estimaciones de los tamaños de fragmento mediante ecuaciones “tipo Kuznetsov” y su incorporación a un modelo preliminar de Predicción de Fragmentación para Mina Lagunas Norte, ha dado buenos resultados. Esto permitió realizar modificaciones en los diseños de voladura exitosamente, alcanzando una fragmentación requerida por la operación y una disminución sustancial de los costos.
- La exclusión de la energía en el modelo debido a la tendencia incongruente de los datos experimentales debe ser superada en un futuro con la incorporación de mayor cantidad de voladuras con mayor variación en los diámetros de los taladros con lo cual se espera generar una mayor variabilidad en la data.
- La propuesta de cálculo del exponente “b” de la Función Swebrec, mediante la adaptación de la ecuación de Kuznetsov para estimar tamaños de fragmentos surge de la necesidad de representar la granulometría con un respaldo físico y no depender solo de datos geométricos.

**GRACIAS**

# ASOCIACIÓN CHILENA DE INGENIEROS EXPLOSIVISTAS A.G.

## ASIEX

Capítulo Chileno de la International Society of Explosives Engineers – ISEE

### Certificado

Se certifica que

*Abel Anchorena*

---

Participó como expositor en las XI Jornadas de Tronadura 2014.



## ASIEX

ASOCIACIÓN CHILENA DE INGENIEROS EXPLOSIVISTAS

Patricio Olivero  
Presidente Comité Técnico

Paulo Aguilera  
Presidente ASIEX

Valdivia, Chile, Noviembre 2014



BARRICK GOLD CORPORATION    Tel: (416) 861-9911  
BCE Place, TD Canada Trust Tower    Fax: (416) 861-2492  
Suite 3700, 161 Bay Street  
P.O. Box 212  
Toronto, Canada  
M5J 2S1

15 de febrero de 2018

Estimado Abel:

¡Felicitaciones!

Me es muy grato informarle que usted ha sido elegido para recibir uno de los Premios de Excelencia Barrick.

Cada año, a través de estos Premios de Excelencia, nuestra compañía reconoce a personas que han demostrado liderazgo, compromiso y logros en Seguridad laboral, Mejora Continua, Seguridad Patrimonial, Responsabilidad Social Empresarial y Gestión de Medio Ambiente. Estas actividades juegan un rol vital para proteger a nuestra gente y a nuestros activos, dando apoyo a las comunidades locales en donde operamos, y construyendo una reputación positiva para nuestra compañía y nuestros muchos grupos de interés.

Los ganadores fueron seleccionados por nominaciones hechas por las diferentes unidades de Barrick a través del mundo, usando criterios específicos.

Gracias por contribuir al éxito de Barrick y por ser un modelo a imitar para otros. Reconocemos sus logros con este premio.

**Mejora Continua: Individuales – Lagunas Norte – Modelo Predictivo de Fragmentación y su Aplicación**

Adjudicado en reconocimiento por sus esfuerzos para modelar operaciones de tronadura de Lagunas Norte para permitir cambios en los parámetros de tronadura a fin de obtener una mejor fragmentación; ha dado como resultado un ahorro superior a los USD \$1,4 millones.

El Gerente de su Operación, lo contactará para entregarle información adicional y para hacer los arreglos necesarios para la presentación oficial de los premios a comienzos del año 2013.

Quisiera extenderle mis agradecimientos personales y felicitaciones por este brillante logro!

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Jim Gowans".

Jim Gowans  
Director General de Operaciones