



WEBINAR DE CONMINUCIÓN

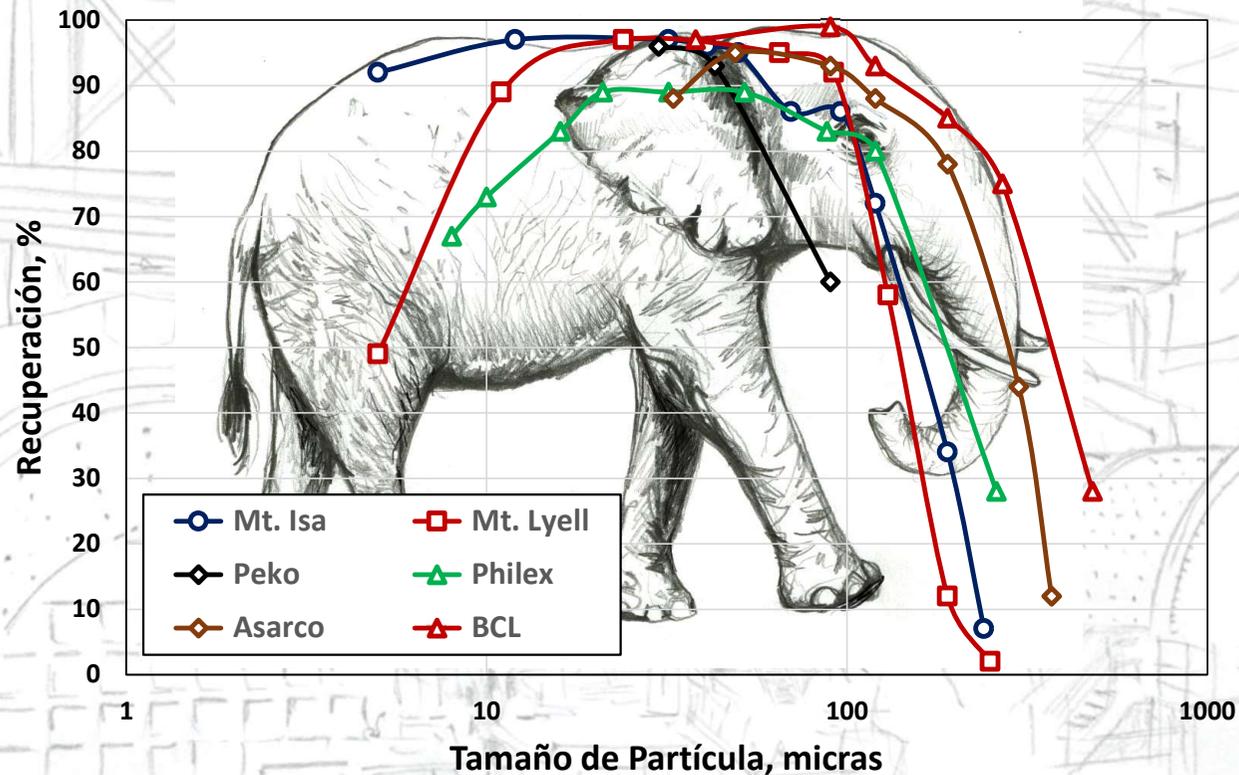
**CONTROL EXPERTO DE LA MOLIENDA SECUNDARIA
EN BASE A MEDICIONES EN LINEA DEL TAMAÑO DE PRODUCTO A FLOTACION**

Dr. Jaime E. Sepúlveda

Con el gentil auspicio de: **MOLYCOP**

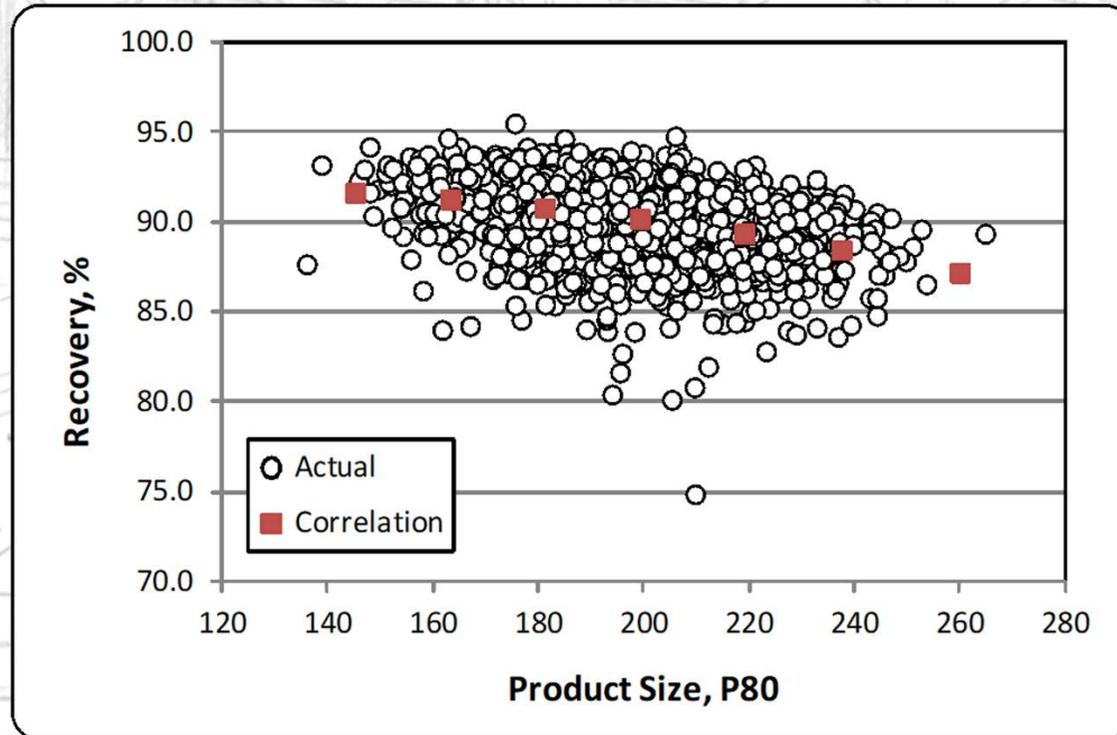


¿Para qué molemos? ¿Cuán fino? ¿Cuán grueso?



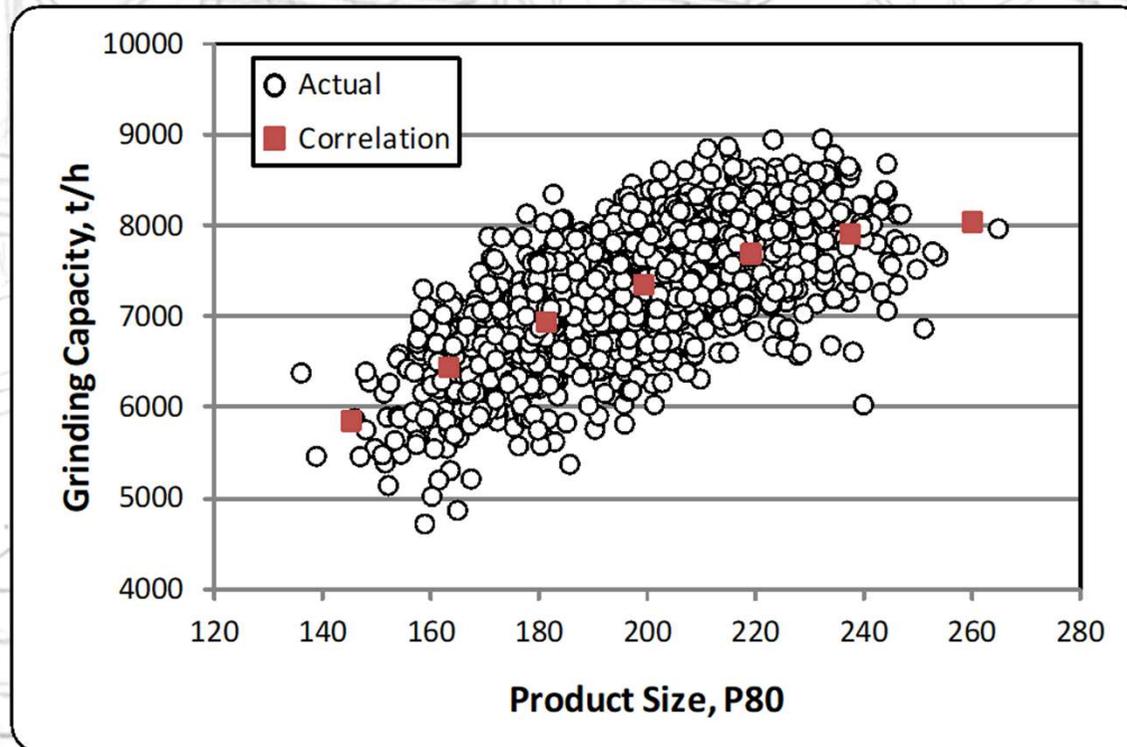
- ❑ El **Tamaño de las Partículas** es crítico para la Flotación. Tanto las partículas **muy finas** como las **muy gruesas** son menos compatibles con el proceso de **Flotación** que las de tamaño intermedio.

Relación Recuperación vs. Tamaño de Producto Molido



- ❑ En general, un mayor tamaño característico del producto alimentado a **Flotación (P80 o % +Malla de Referencia)** afecta negativamente el nivel de **Recuperación** alcanzable.

Relación Tonelaje vs. Tamaño de Producto Molido



- ❑ Pero al mismo tiempo, si la máxima **Recuperación** fuese el único objetivo operacional, debiéramos entonces moler bastante fino, sacrificando considerablemente el **Tonelaje**.

- ❑ En la búsqueda del óptimo retorno de la operación, se recomienda establecer como objetivo maximizar la **Producción Neta de Metal (NMP)**, definida como la velocidad de producción de metal valioso recuperado (por ejemplo, cobre) por hora de operación, la que simplemente se calcula como:

$$\mathbf{NMP = h R T} \quad , \text{ t de Cu /h}$$

donde:

h = Ley de Cabeza, % Cu

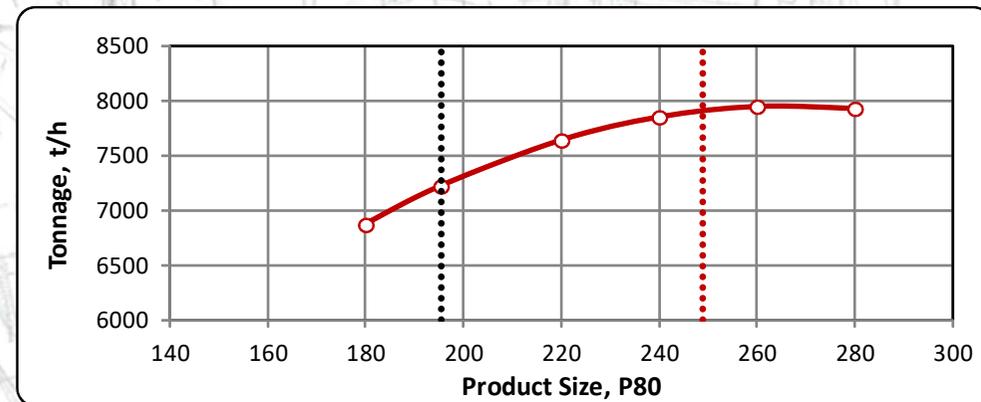
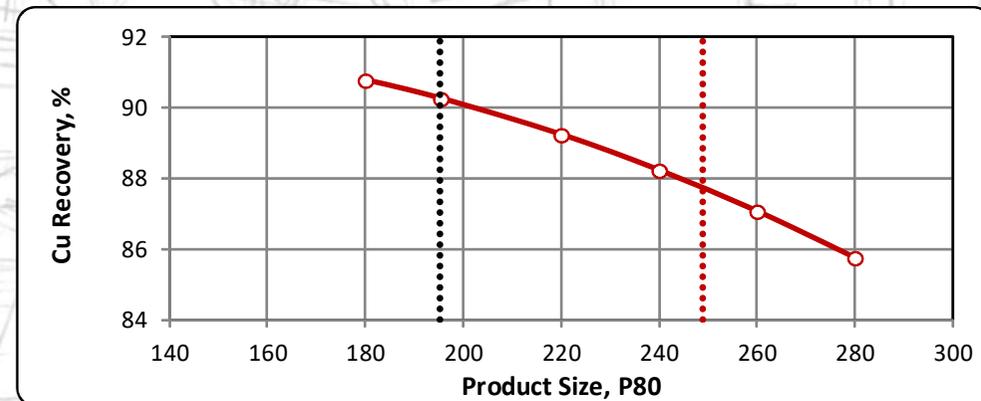
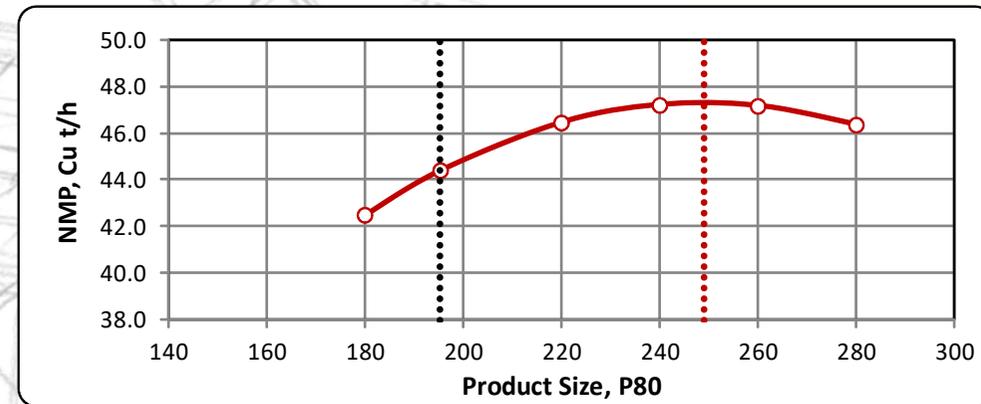
R = Recuperación Global en Flotación, 0/1

T = Tonelaje de Alimentación Fresca, t/h

- ❑ Por lo tanto, a fin de maximizar **NMP**, para una **Ley de Cabeza (h)** conocida, debemos enfocarnos en maximizar el **Tonelaje (T)** pero sin sacrificar considerablemente la **Recuperación (R)**.

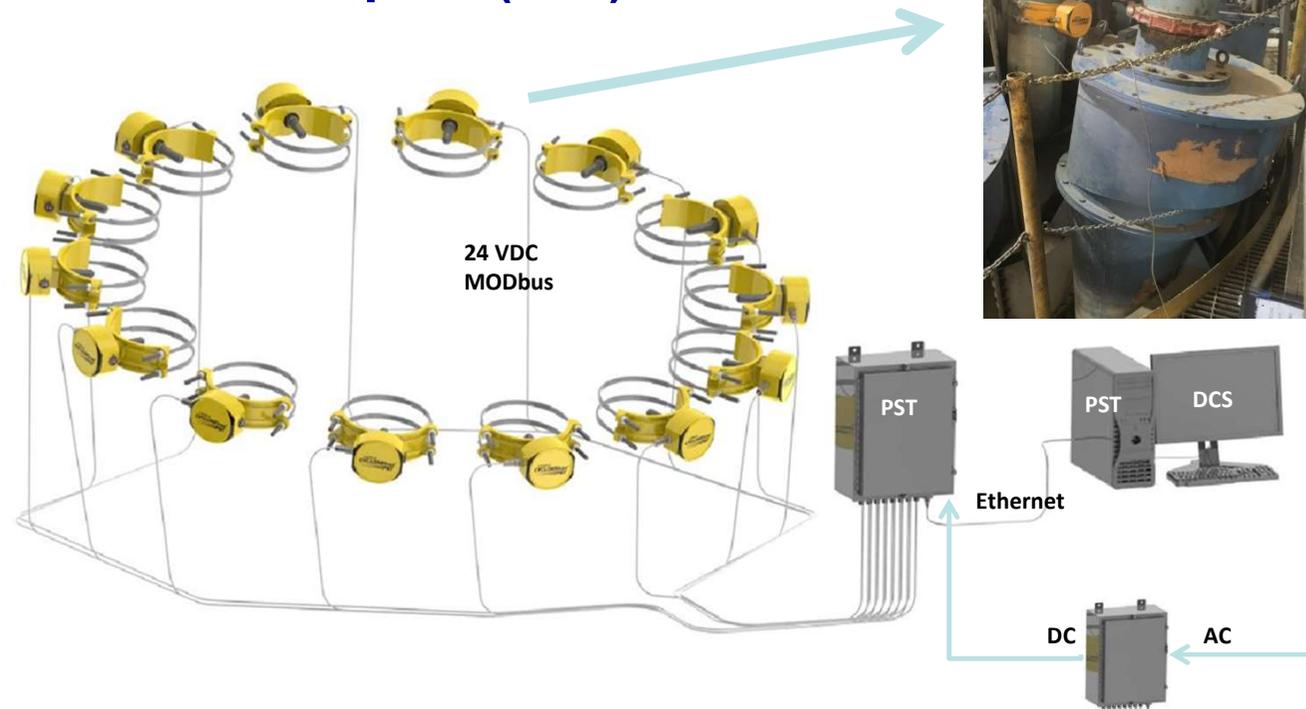
P80 OPTIMO

- ❑ En este ejemplo, el **Tamaño P80 Optimo**, que maximizaría el **NMP** en hasta **6.5%**, estaría cercano a las **250 micras**; con respecto a la condición promedio actual de **195 micras**, para una ley de cabeza también promedio de **0.68% Cu**.
- ❑ Por lo tanto, es fundamental poder **“medir”** el tamaño del producto molido resultante y **“controlar”** dicha condición dentro de los rangos óptimos deseados.
- ❑ Obviamente, no será suficiente sólo **“medir”** sino también **“detectar”** e idealmente **“prevenir”** eventuales contingencias operacionales; tales como el **Acordonamiento/Bloqueo (A/B)** de ciclones.



□ PARTICLE SIZE TRACKER (PST)

- **Medición en Línea del Tamaño de las Partículas** (con hasta **5** mallas de referencia) de cada ciclón individual, sin necesidad de recolectar muestras.
- **Detección de Acordonamiento/Bloqueo (A/B)** de ciclones (“Roping”).



Contingencia Operacional

ACORDONAMIENTO/BLOQUEO (A/B) DE CICLONES

- ❑ El **Acordonamiento/Bloqueo (A/B)** de hidrociclones es de ocurrencia común y frecuente en todos los procesos de molienda/clasificación.
- ❑ La descarga de un ciclón se obstruye cuando se excede su capacidad volumétrica (**m³/h**) de descarga de pulpas demasiado espesas en su retorno al molino.
- ❑ Sin embargo, según postula la **“Cuarta Ley” de la Molienda/Clasificación**, la búsqueda de una **Optima Eficiencia Energética** del proceso conlleva mantener altos niveles de **Flujo de Descarga de los Ciclones (Carga Circulante)** y en la **Densidad de Descarga (% Sólidos)**, ambas condiciones propicias para una mayor frecuencia de **Acordonamiento/Bloqueo (A/B)** .

Optimizando la Eficiencia Energética

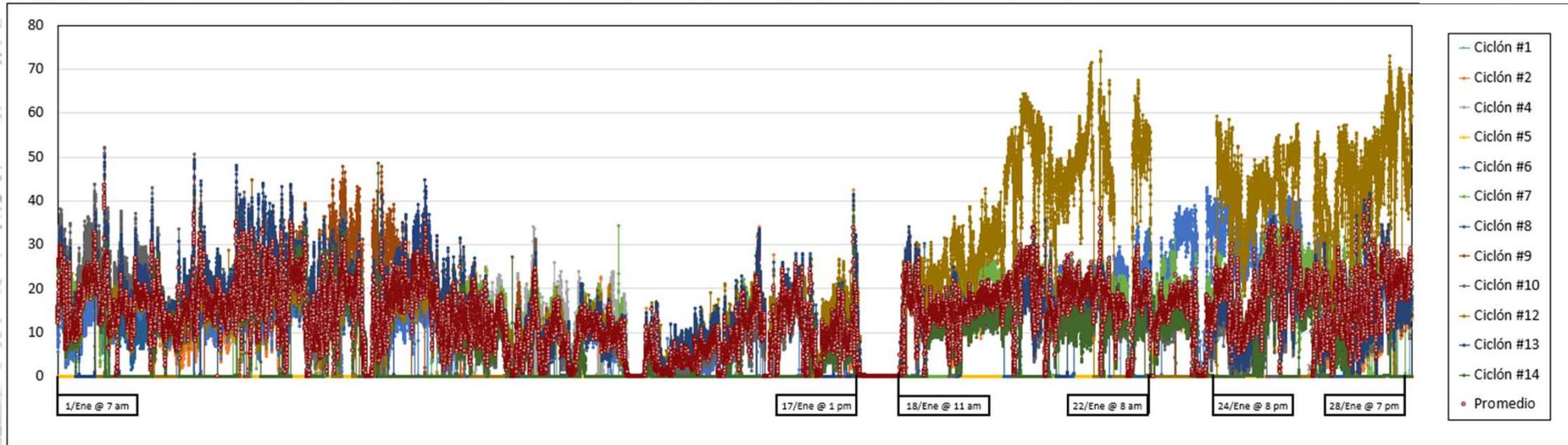
EL CRITERIO DE LA '4ta. LEY'

- ❑ Para una óptima **Eficiencia Energética** del proceso de molienda, se requiere que el contenido de partículas finas en el interior del molino sea **tan bajo como sea posible** ... *para una tarea de molienda dada*.
- ❑ Tal objetivo puede ser siempre alcanzado operando el circuito bajo las siguientes **3** condiciones operacionales:
 - **% Sólidos de Rebose** al mínimo posible, limitado por la disponibilidad total de agua,
 - **% Sólidos de Descarga**, al máximo posible, limitado por la condición de acordonamiento o '*roping*',
 - Máxima **Carga Circulante**, sólo limitada por la capacidad de la bomba y la capacidad de transporte de pulpa del molino.

Ejemplo de Aplicación Industrial

ACORDONAMIENTO/BLOQUEO (A/B) DE CICLONES

% + 65#

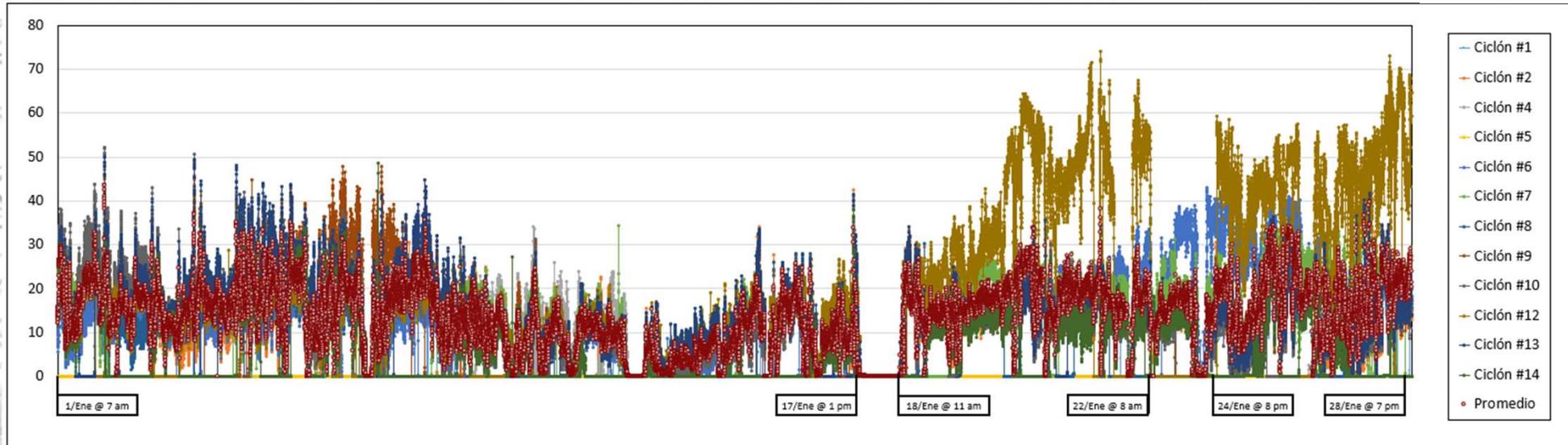


- ❑ En esta aplicación particular, el registro histórico de la operación, demostró la alta tasa de frecuencia de condiciones **A/B**, particularmente del **Ciclón 12**, con posterioridad al 18 de Enero de 2020.
- ❑ La línea roja representa el promedio aritmético de todos los ciclones en operación la que, sorprendentemente, se vio sólo levemente afectada por el bloqueo, hecho que podría ser confundido por la **Estrategia de Control** por un leve incremento en la **Dureza del Mineral** y comandar innecesarias reducciones del **Tonelaje** procesado.

Ejemplo de Aplicación Industrial

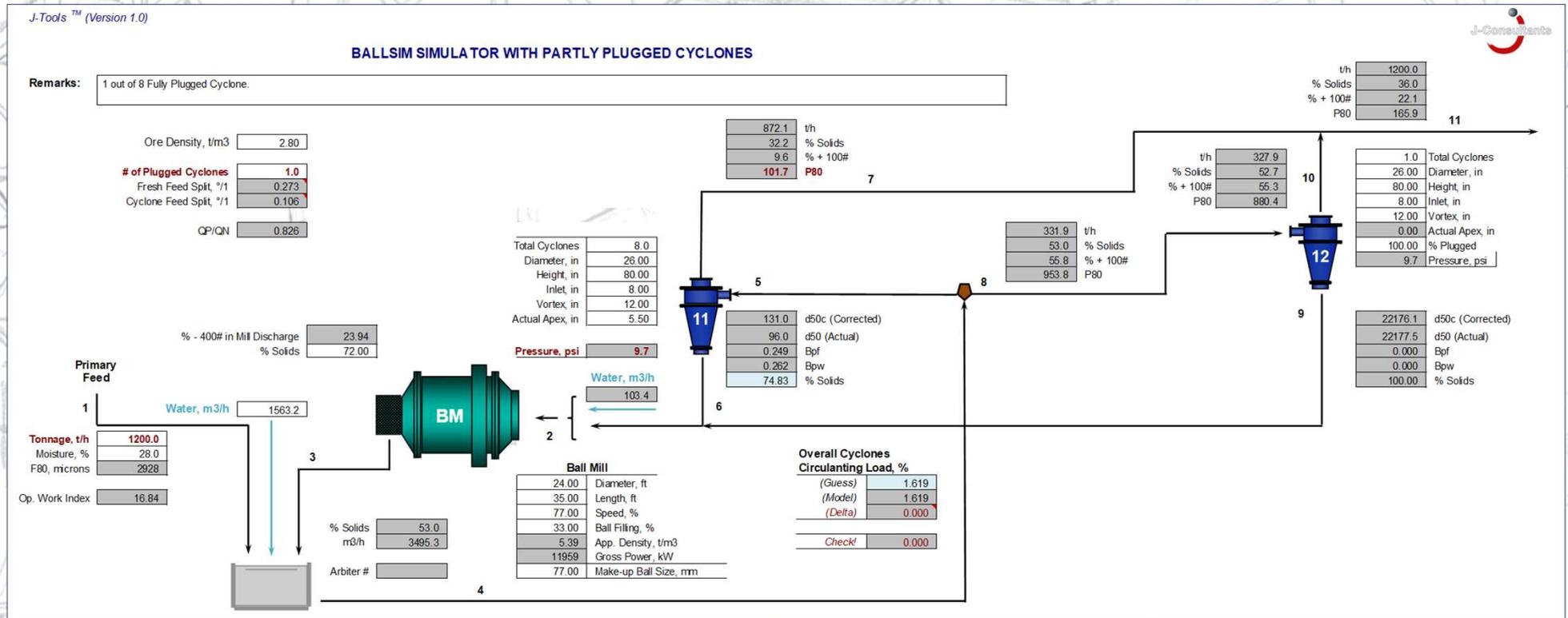
ACORDONAMIENTO/BLOQUEO (A/B) DE CICLONES

% + 65#



- Bajo condiciones de **obstrucción total**, el producto de alimentación al ciclón obstruido (demasiado grueso para ser flotado eficientemente) es desviado en su totalidad por el rebalse del hidrociclón hacia la etapa de **Flotación** aguas abajo, con un impacto muy negativo sobre la **Recuperación**.

Simulación Digital ACORDONAMIENTO/BLOQUEO (A/B) DE CICLONES

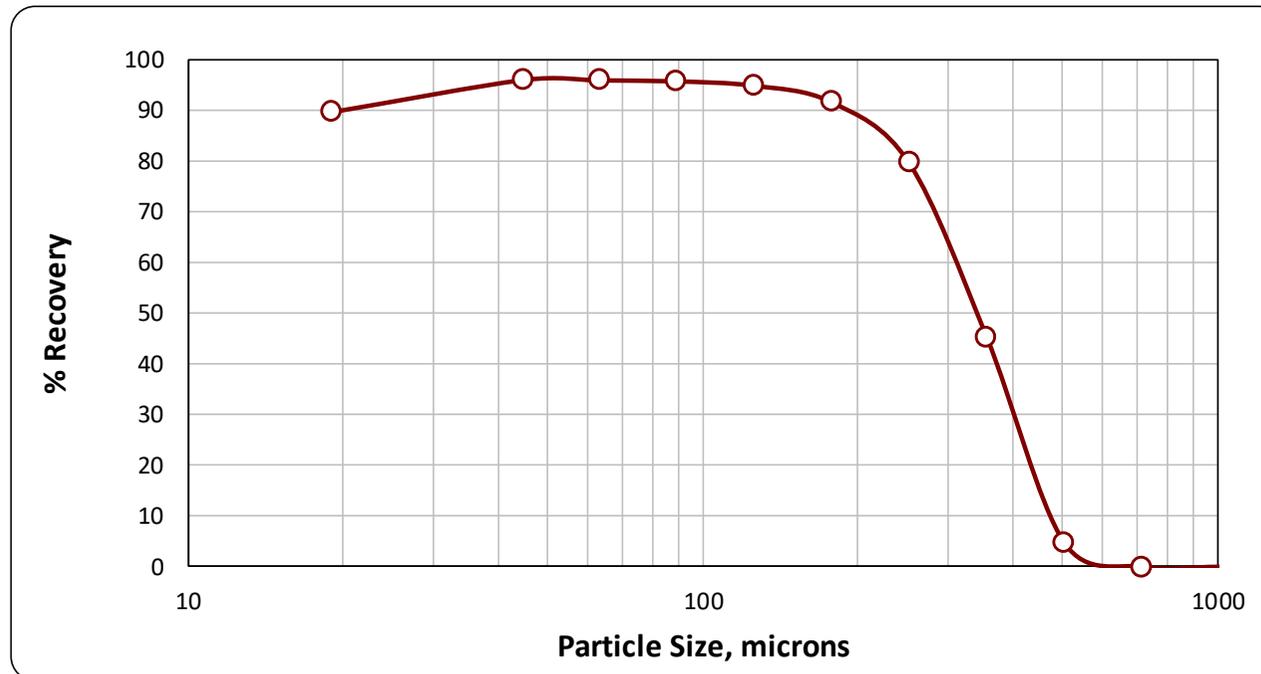


❑ El **Acordonamiento/Bloqueo (A/B)** de ciclones pueden ser realistamente simulado con las herramientas disponibles en el software **J-Tools 1.0**.

Acordonamiento/Bloqueo (A/B) de Ciclones

IMPACTO SOBRE LA RECUPERACION

- ❑ La simulación detallada del evento (**por fracción granulométrica**) permite proyectar el **potencial impacto** de un bloqueo sobre la **Flotación** para un proceso que obedezca una típica relación **Tamaño/Recuperación** como la aquí ilustrada (**Curva Elefante**):



Acordonamiento/Bloqueo (A/B) de Ciclones IMPACTO SOBRE LA RECUPERACION

- En el ejemplo, el bloqueo total de **1** de **8** ciclones en la batería ocasionaría una pérdida de **7.4%** en **Recuperación**, mientras la condición anormal se mantenga sin ser detectada.
- Nótese que **1** de **8** ciclones (**12.5%**) captaría, en caso de estar bloqueado, un flujo equivalente al **27%** del tonelaje de alimentación fresca.

% Plugged				
0	25	50	75	100

Fresh Tonnage Split, °/1

Abnormal Cyclones	0.125	0.180	0.199	0.222	0.273	↑
Normal Cyclones	0.875	0.820	0.801	0.778	0.727	↓

Cyclone Feed Flowrate Split, °/1

Abnormal Cyclones	0.125	0.111	0.107	0.106	0.106	↓
Normal Cyclones	0.875	0.889	0.893	0.894	0.894	↑

Cyclone Feed Flowrate, m³/h/Cyclone

Abnormal Cyclones	522	443	428	420	413	↓
Normal Cyclones	522	509	508	506	499	↓

Operating Conditions

Circulating Load, °/1	2.06	1.88	1.83	1.77	1.62	↓
Op. Work Index, kWh/t	15.28	15.44	15.63	15.89	16.84	↑

Normal Cyclone O'Flow

t/h	1050	984	961	933	872	↓
Cyclone Pressure, psi	10.35	9.97	9.94	9.88	9.70	↓
P80	143	134	126	118	102	↓
% +100#	18.40	16.48	14.91	13.18	9.64	↓

Plugged Cyclone O'Flow

t/h	150	216	239	267	328	↑
Cyclone Pressure, psi	10.35	9.97	9.94	9.88	9.70	↓
P80	143	195	246	322	880	↑
% +100#	18.40	30.20	38.28	45.11	55.27	↑

Combined Cyclone O'Flow

t/h	1200	1200	1200	1200	1200	↑
P80	143	145	148	152	166	↑
% +100#	18.40	18.95	19.57	20.27	22.11	↑

% Recovery	90.22	90.03	89.18	87.48	82.82	↓↓
-------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	----

- ❑ El **Test de Grubbs** permite la detección de valores fuera de rango o “**outliers**” como, por ejemplo, la señal **PST** de un ciclón acordonado o totalmente bloqueado con respecto a las señales de los demás ciclones operando normalmente en la misma batería.
- ❑ Para el caso en referencia, el **Test de Grubbs** se aplica a la diferencia entre la máxima señal Y_{MAX} y el promedio Y_{AVE} de todo el conjunto de señales, incluyendo Y_{MAX} :

$$G = (Y_{MAX} - Y_{AVE}) / \sigma \quad (\text{one-sided})$$

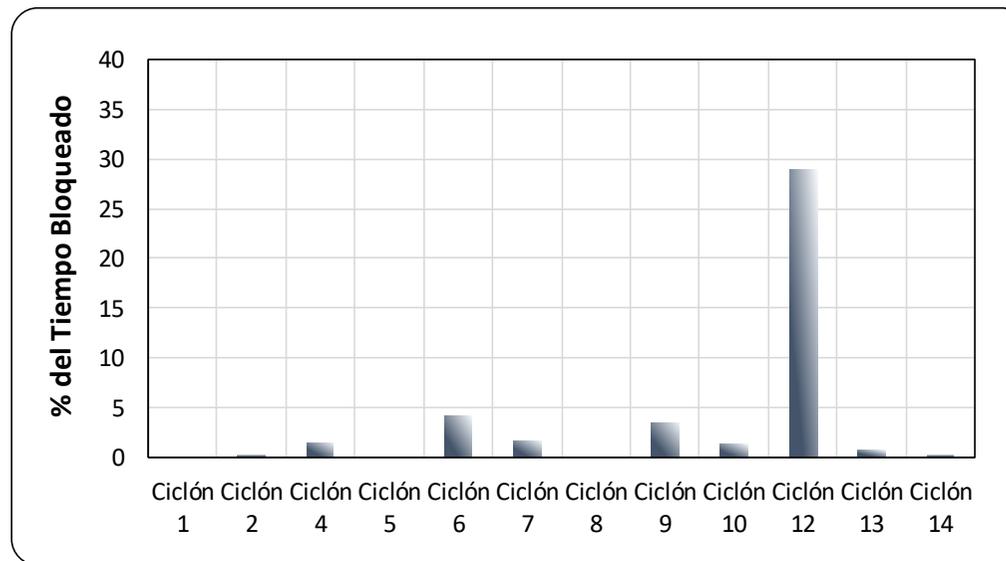
donde σ es la desviación estándar del conjunto de señales.

- ❑ Y_{MAX} será rechazado como “**outlier**”, para un nivel de significancia estadística α , si:

$$G > (N-1) t / N^{0.5} / (N - 2 + t^2)^{0.5}$$

donde t denota el valor crítico superior de la distribución **t-Student** con **N - 2** grados de libertad y un nivel de significancia α/N .

- Aplicando el **Test de Grubbs** para la detección estadística de valores fuera de rango, se observó que el **Ciclón 12** en esta aplicación particular presentó una alta frecuencia de **A/B**, cercana al **30%** del tiempo en operación:



- En su conjunto, uno o más de los **14 ciclones** de la batería estuvieron en condición **A/B** un **42% (!)** del tiempo.

Acordonamiento/Bloqueo (A/B)

IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DEL PRODUCTO

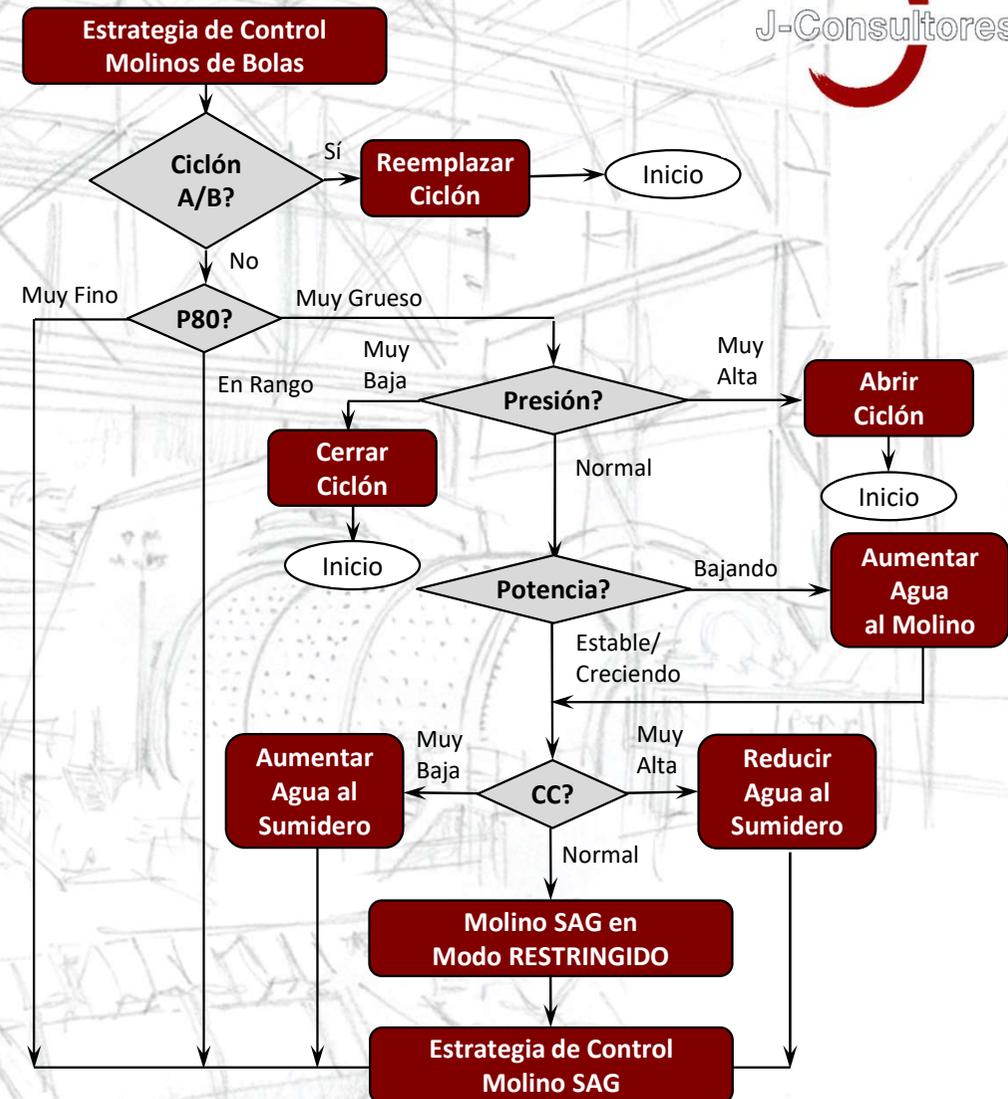


Ciclón 12 Bloqueado?	% del Tiempo	# Ciclones Operando	Presión Alimentación	Alim. SAG 1	% + 60# en Rebalse			Razón +80#/ +60#
					Todos	C12	excl. C12	
Si	31.31	8.3	8.9	2736	13.15	31.87	10.63	1.71
No	68.69	7.5	9.5	2411	10.17	10.28	10.13	2.15

- ❑ La comparación de los promedios segmentados, bajo la condición “**Ciclón 12 Bloqueado**” o “**Ciclón 12 Normal**”, indica que el **Tonelaje** es incluso mayor con el **Ciclón 12** bloqueado (**2736 vs 2411 t/h**), lo que entrega un producto a **Flotación** más grueso (**13.15% vs 10.17% +60#**), aunque posiblemente no detectado o mal interpretado por el sistema de control como un cambio en la dureza del mineral.
- ❑ Cabe destacar que, al mismo tiempo, el frecuente **A/B** del **Ciclón 12 (31.31% del tiempo)** produce un “**achatamiento**” de la curva granulométrica del producto a **Flotación**, reflejada en una notable reducción de la **Razón (% +80# / % +60#)**; es decir, aumenta la proporción relativa de **partículas gruesas a Flotación (+60#)** en desmedro de los **finos (-80#)**, lo que impacta muy negativamente sobre la **Recuperación** alcanzable en la **Flotación** posterior.

ESTRATEGIA INTEGRAL DE CONTROL SUPERVISOR EXPERTO

- ❑ El **Tamaño de Producto P80** (o alguna malla de referencia) de cada ciclón es medido, en línea, separadamente por el **PST**.
- ❑ El **Nivel del Sumidero** es controlado en un rango deseable con la **Velocidad de la Bomba**.
- ❑ Si el **P80** está en el rango deseado o demasiado fino, se traspasa el control al **Molino SAG** con el mandato de incrementar **Tratamiento**.
- ❑ Si el **P80** está muy grueso, se actúa sobre las demás condiciones críticas del circuito (**Presión Ciclon, Potencia y Carga Circulante**). Si ello no fuese suficiente para retrotraer el **P80** al rango deseado, se traspasa el control al **Molino SAG**, bajo modo **RESTRINGIDO**, lo que significa que en éste se buscarán formas de disminuir su capacidad para no sobrecargar los **Molinos de Bolas**.



COMENTARIOS FINALES

- ❑ La disponibilidad de un sistema confiable de medición del **Tamaño de Producto Molido** es fundamental para el **Control Optimizante** de procesos de molienda/clasificación; particularmente en aquellos casos en que las etapas aguas abajo sean sensibles a la distribución de tamaño de las partículas.
- ❑ Los beneficios potenciales aportados por la **Tecnología PST** solo pueden ser materializados mediante la incorporación de sus señales a la **Lógica Experta de Control**.
- ❑ La tecnología **PST** permite monitorear separadamente la respuesta de cada hidrociclón individual, en línea, lo que permite establecer criterios para la **detección y corrección inmediata de ciclones bloqueados**, evitándose así los importantes daños causados por los gruesos en la etapa de **Flotación** posterior.



WEBINAR DE CONMINUCIÓN

**CONTROL EXPERTO DE LA MOLIENDA SECUNDARIA
EN BASE A MEDICIONES EN LINEA DEL TAMAÑO DE PRODUCTO A FLOTACION**

Dr. Jaime E. Sepúlveda

Con el gentil auspicio de: **MOLYCOP**

