



# 17<sup>o</sup> E-ICES

ENCUENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

. 1 AL 4 DE NOVIEMBRE .  
. MODALIDAD VIRTUAL .

## LA OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO PREDICTIVA EN LA PLANIFICACIÓN DE MINA.

Marina Romero, Gilda Neyra, Daniel Chuk.

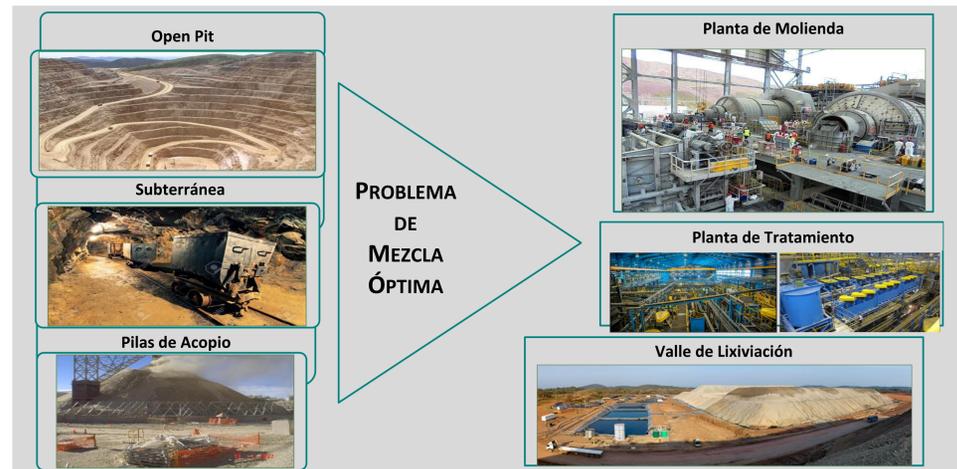


Instituto de Investigaciones Mineras - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de San Juan

### INTRODUCCIÓN

#### PROGRAMACIÓN DE LA MEZCLA DE DIVERSAS FUENTES DE MINERAL

Necesidad de lograr una *mezcla óptima* para obtener el máximo rédito económico con producción a lo largo del tiempo.  
Optimización/maximización del Valor Actual Neto VAN (sinónimo del rédito global) del proceso. Suele estar acompañado por un cierto perfil de producción a lo largo de un determinado período propuesto en Oz/mes del metal/metales objetivo.



Cada fuente de mineral (veta, pila de acopio, botadero), tiene un determinado contenido del metal que se desea extraer, pero también límites en cada volumen de extracción. Y las plantas de procesamiento poseen una determinada capacidad que no puede ser excedida.

#### Restricciones

- Impuestas por factores técnicos: Capacidades máximas de extracción y tratamiento de las operaciones unitarias involucradas
- Factores económicos: tasas de disminución máxima de las pilas de acopio, como la cantidad de paradas de planta por factores técnicos y/o laborales.
- Complejidad de las interrelaciones entre variables y restricciones involucradas.
- Dificultad para determinar cuál es el valor de dichas variables de decisión que permite maximizar el rédito económico.

IMPRESCINDIBLE UN PROCEDIMIENTO SISTEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

### DESARROLLO

Existen herramientas computacionales comerciales de optimización, pero poseen rigidez a la hora de describir el proceso por lo cual no siempre es posible adaptarlo a necesidades específicas. Además, los proveedores no dan información sobre cómo se realiza el cálculo por lo que es difícil determinar cuán óptimo es el resultado; sumado al elevado costo de esos soft para emprendimientos de mediana envergadura. Por ello, se resuelve el problema con una fuerte componente intuitiva o heurística valiéndose del uso iterativo de herramientas limitadas como el algoritmo Solver de Excel (Everett, 2010).

El resultado entonces, es un mayor contenido metálico en las colas y por lo tanto un rédito acotado para del proceso, que puede ser mejorado.

En este ejemplo, se propone la maximización del Valor Actual Neto VAN en una operación minera metalífera de oro y plata hasta el agotamiento de las reservas a los Nc meses posteriores. Nc será el tiempo de vida del emprendimiento.

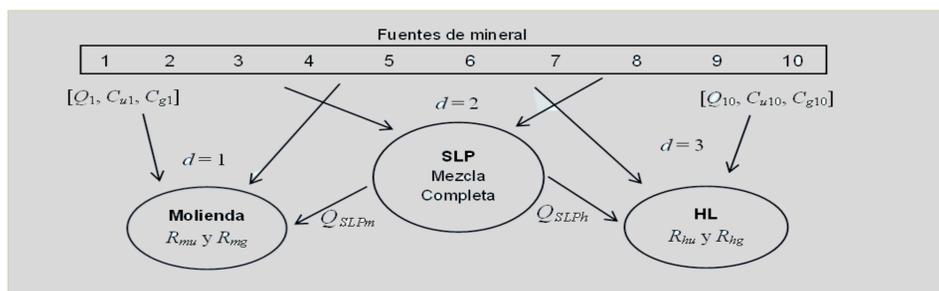


Figura 1: Esquema mina - plantas a optimizar

Se parte en forma generalizada de 10 fuentes de mineral:

- cada una con cierta cantidad de Reservas estimadas [tn]
- caracterizadas por una ley de oro Cu [gr/tn] y de plata Ag [gr/tn] pudiendo variar ambas a lo largo de los Nc meses.

**FORMULACIÓN MULTIOBJETIVO PREDICTIVA:** Cuando hay más de una función objetivo para optimizar las funciones objetivo compiten entre sí, por lo cual se trata de encontrar un grupo de soluciones óptimas. *El Conjunto Óptimo de Pareto (Pareto Optimal Set)*

POR SUPUESTO QUE EL PROBLEMA ES TOTALMENTE GENERALIZABLE PARA OTRAS FUENTES DE MINERAL Y PRODUCTOS DEL PROCESO.

#### SUPERVISIÓN PREDICTIVA

La supervisión óptima predictiva toma dos ideas básicas:

- la de realizar un control óptimo en el sentido de la minimización de un funcional de costo
- la de extender el cálculo hacia adelante en el tiempo basándose en el conocimiento del modelo del proceso

**Tabla 1:** Vector de funciones de evaluación (1) a ser minimizadas, consta en primer lugar del VAN, además de otras medidas que hacen a la estabilidad del proceso en el tiempo y el uso de las reservas. Todas tienen un carácter predictivo, pues evalúan el modelo matemático hacia adelante en el tiempo

Funciones de Evaluación	Objetivo
$f_1(x) = VAN = -\sum_{j=1}^{Nc} P(j)$	Maximización de VAN, donde P(j) es el rédito en el mes j.
$f_2(x) = \sum_{j=1}^{Nc} \ Q(j) - Q(j-1)\ _2$	Límite a los cambios en caudales
$f_3(x) = \sum_{j=1}^{Nc} 1 \forall d_i(j) \neq d_i(j-1)$	Conteo de cambios por cada veta
$f_4(x) = \sum_{j=2}^{Nc} (P(j) - P(j-1))^2 \forall P(j) < P(j-1)$	Crecimiento monótono de P
$f_5(x) = \sum_{j=1}^{Nc} (VolSLP(j) - \min VolSLP)^2 \forall VolSLP(j) < \min VolSLP$	Límite inferior minVolSLP del volumen de pila VolSLP hasta el mes Ncb
$f_6(x) = (VolSLP(Nc))^2$	Agotamiento del stock SLP al cierre de la operación.
$f_7(x)$ a $f_{16}(x)$ , para cada veta i : $f(6+i) = (Reservas(i) - \sum_{j=1}^{Nc} Q_i(j))^2, \forall \sum_{j=1}^{Nc} Q_i(j) < Reservas(i)$ $f(6+i) \rightarrow \infty$ en otro caso.	Agotamiento de las reservas

**Tabla 2:** restricciones técnico/económicas

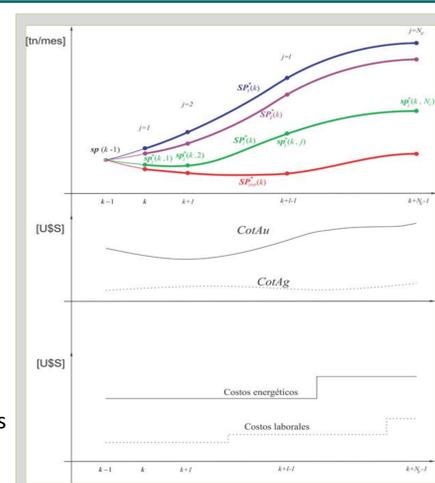
Funciones de Restricción	Objetivo
$g_1(x) = \sum_{j=1}^{Nc} (Q_{scmb} - Q_{mill}(j)) \forall Q_{scmb} < Q_{mill}(j)$	No superar la capacidad de planta de Molienda $Q_{scmb}$
$g_2(x) = \sum_{j=1}^{Nc} (Q_{schb} - Q_{HL}(j)) \forall Q_{schb} < Q_{HL}(j)$	No superar la capacidad de planta de Heap Leaching $Q_{schb}$
$g_3(x) = \sum_{j=1}^{Nc} (VolSLP(j)) \forall VolSLP < 0$	Ninguna instancia de VolSLP puede ser negativa
$g_4(x)$ a $g_{13}(x)$ , del tipo $g_i(x) = Reservas(i) - \sum_{j=1}^{Nc} Q_i(j)$	Consumo limitado a las reservas: $\sum_{j=1}^{Nc} Q_i(j) < Reservas(i)$

### CONCLUSIONES

La **SUPERVISIÓN MULTIOBJETIVO PREDICTIVA** permite encontrar un Conjunto Óptimo de Pareto de trayectorias. Entre las mismas, debe elegirse una "solución preferida" entre todas las trayectorias posibles. (Figura a la derecha)

- Se han elaborado soluciones del problema recurriendo a algoritmos genéticos multiobjetivo como también a algoritmos de optimización de colonias de hormigas.

A fin de apreciar la capacidad del algoritmo se plantea un ejemplo de aplicación. En el que se considera un horizonte de Nc= 24 meses a partir del momento de la optimización, leyes crecientes en orden con las fuentes de mineral, pero con una fuerte caída en las previsiones de las mismas en el mes 8 y un incremento en la cotización del oro del 13% en el mes 16.



Se supone que la planta de molienda tiene una capacidad de Qscmb = 50000 tn/mes y HL de Qschm = 100000 tn/mes y se le impone a la pila SLP que no descienda de 20000 tn hasta el mes 20, cuando se inicia el cierre de mina. Se pretende que al llegar a los meses de vida de la mina, se hayan agotado las reservas. La evolución en el tiempo se presenta en las Figuras a continuación.

