



# **Desafíos hacia la Automatización Integrada de Operaciones Mineras**

**Luis G. Bergh**

**CASIM, Centro de Automatización y Supervisión para la Industria Minera**

**Universidad T. F. Santa María**

**Valparaíso, Chile**

# Contenido



- Diagnóstico general
- Aporte de nuevas tecnologías
- Requerimientos básicos para la integración
- Restricciones limitantes del potencial
- Casos ejemplos, posibles soluciones
- Reflexiones finales

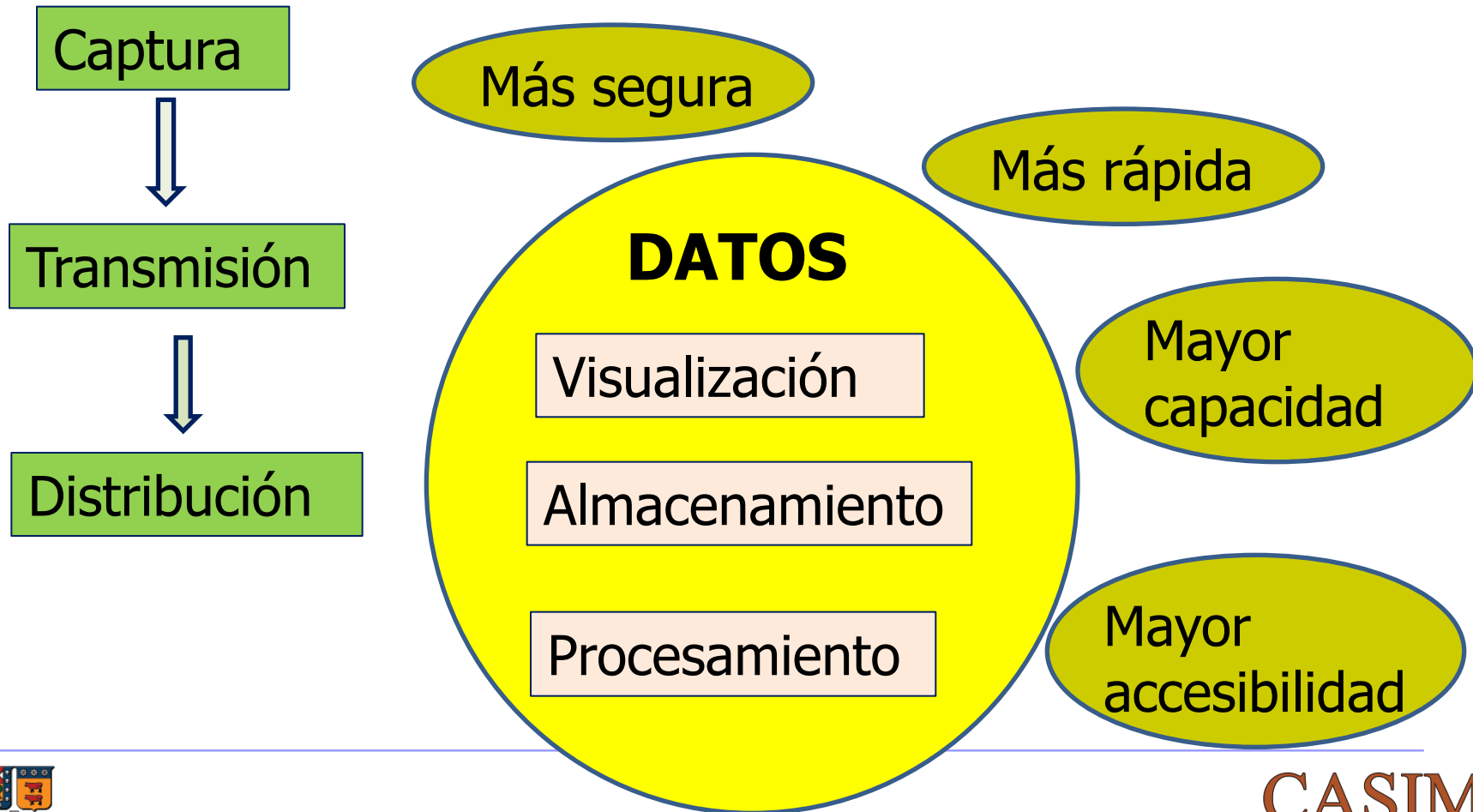


# Experiencia de trabajos realizados en:

- Doña Inés de Collahuasi
- BHP (Escondida)
- Codelco Chile (Chuquicamata, Salvador, Andina, Caletones, Colón)
- Anglo American (Mantos Blancos, Chagres, El Soldado, Los Bronces, Las Tórtolas)
- AMSA (Pelambres)
- Teck (Carmen de Andacollo)



# Impacto de las TICAs: potenciar



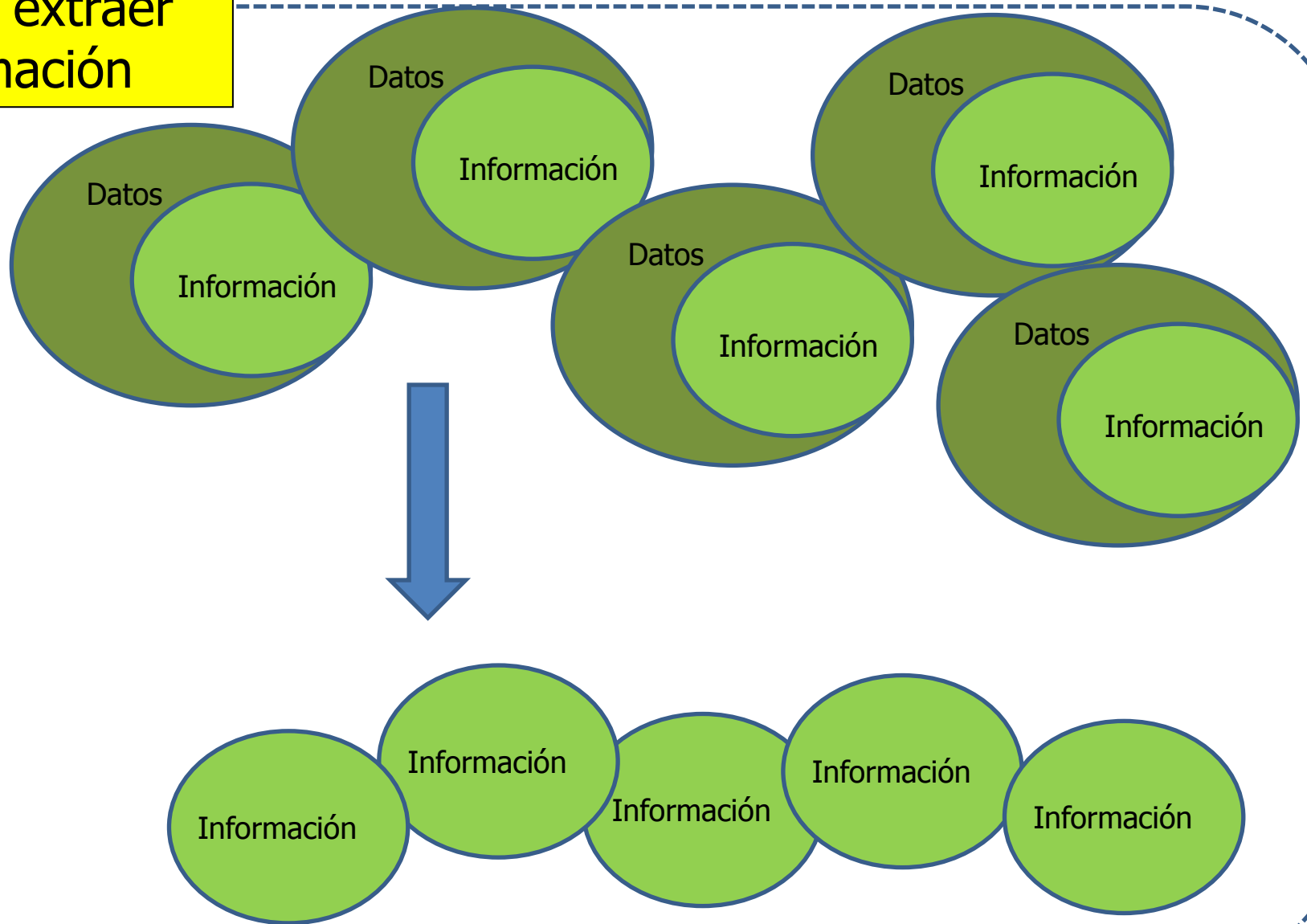
La calidad de las decisiones gerenciales y operacionales depende fuertemente de la calidad de la información en que se basan

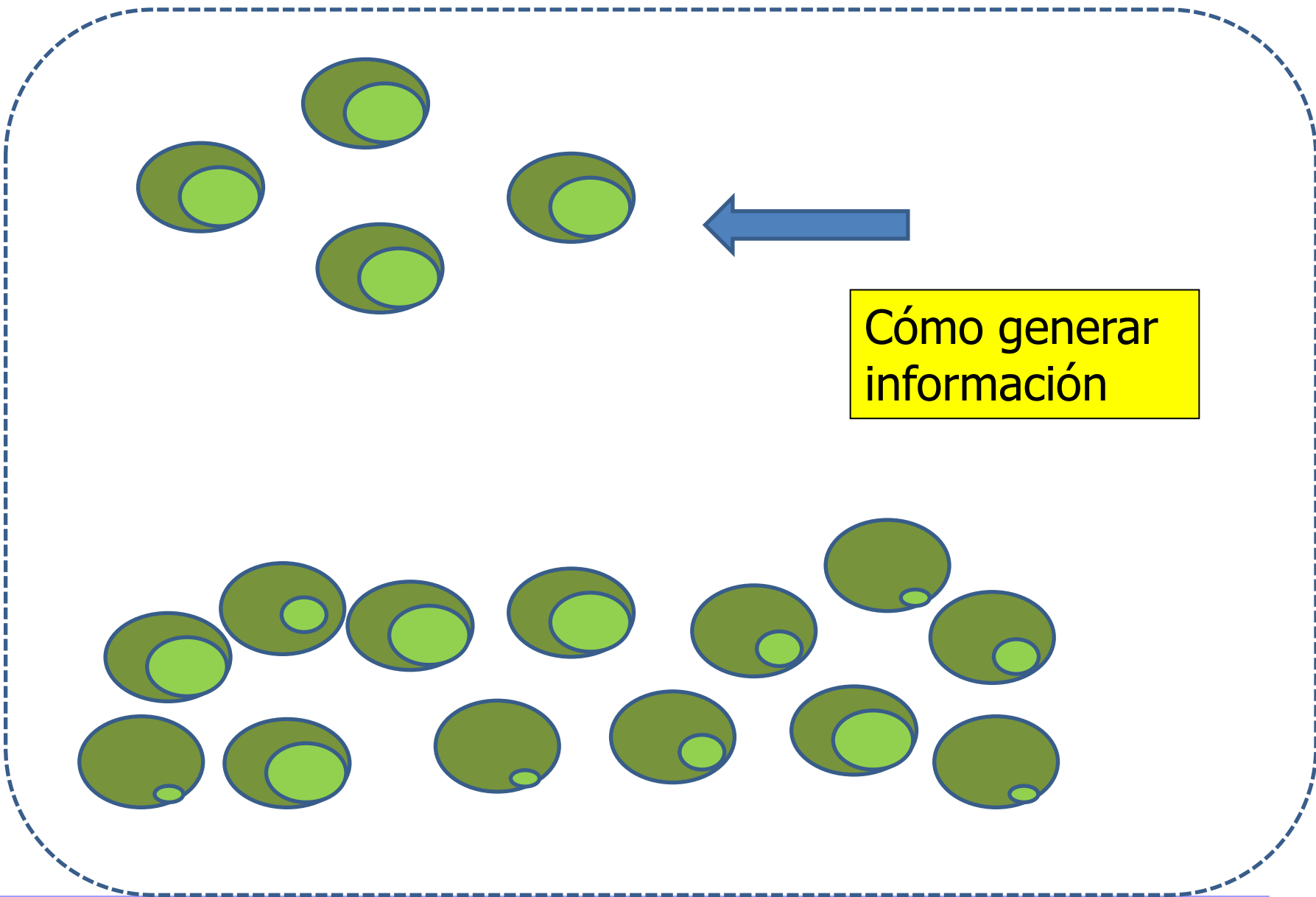
Confusión generalizada:  
Dato es equivalente a información

Procesar datos (en pantallas, SCADA, archivos históricos) puede llevar a situaciones confusas y decisiones de dudoso valor agregado



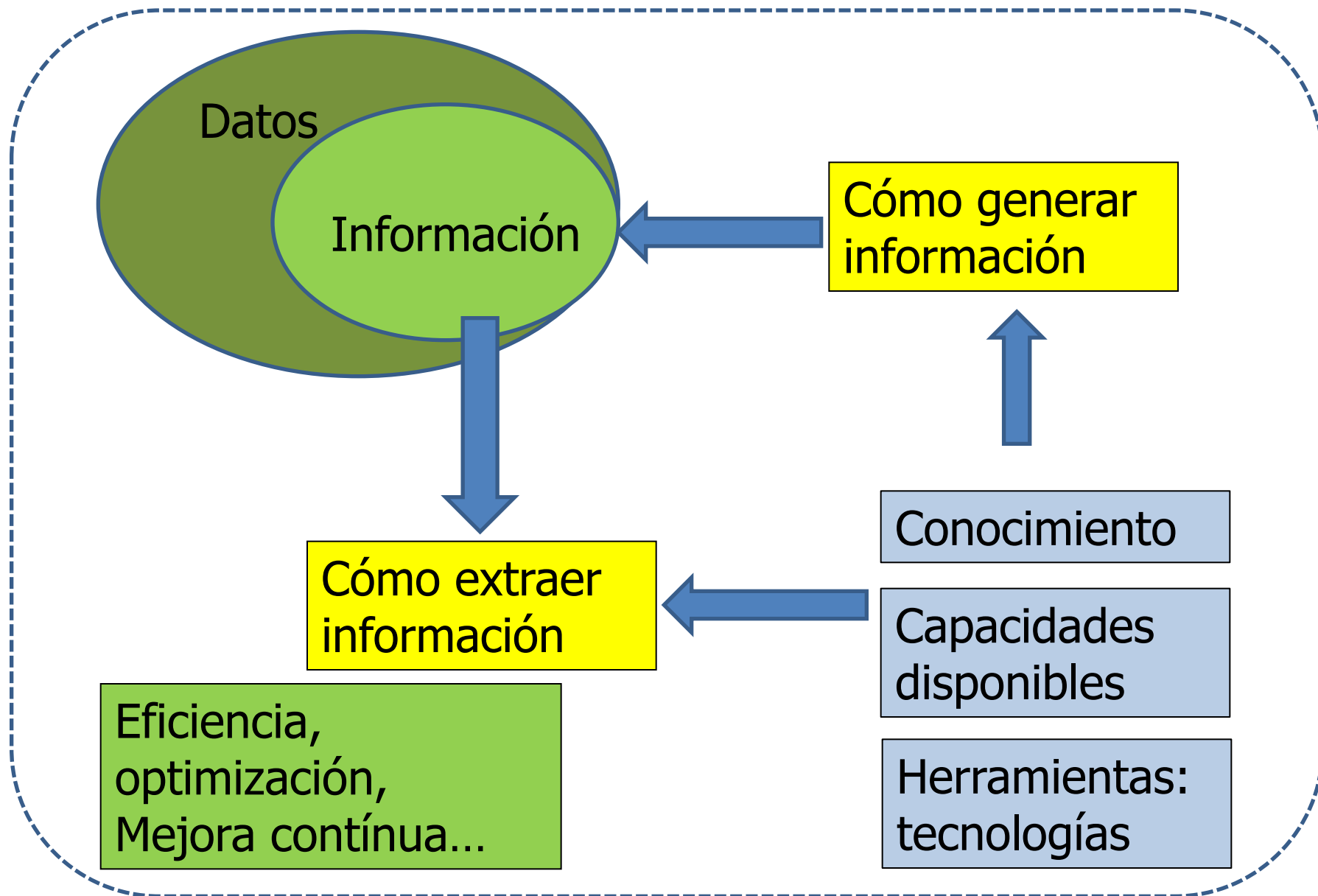
# Cómo extraer información



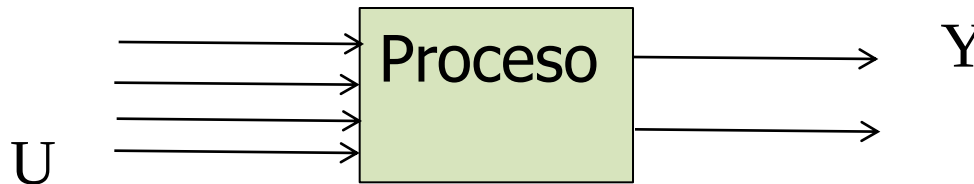
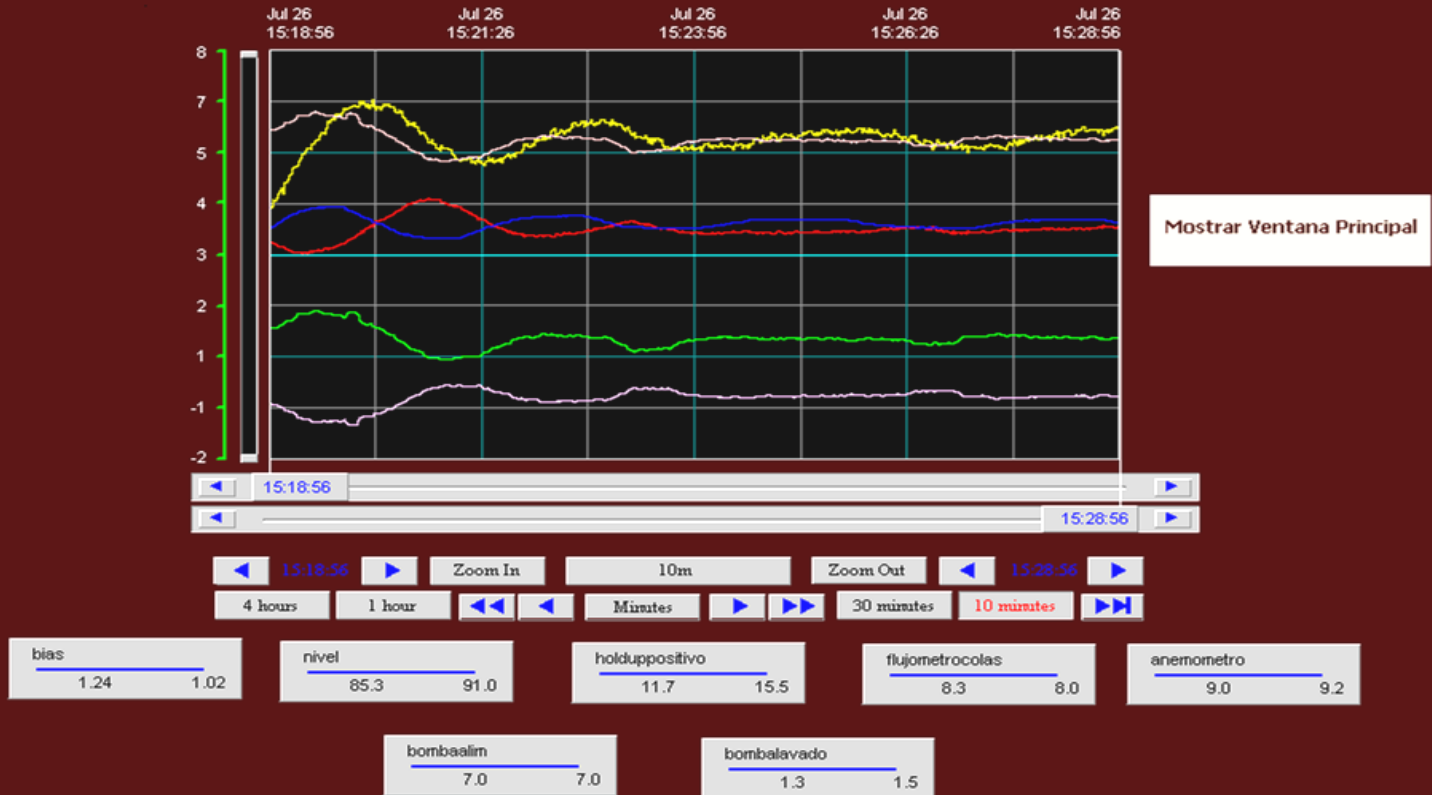


Cómo generar  
información

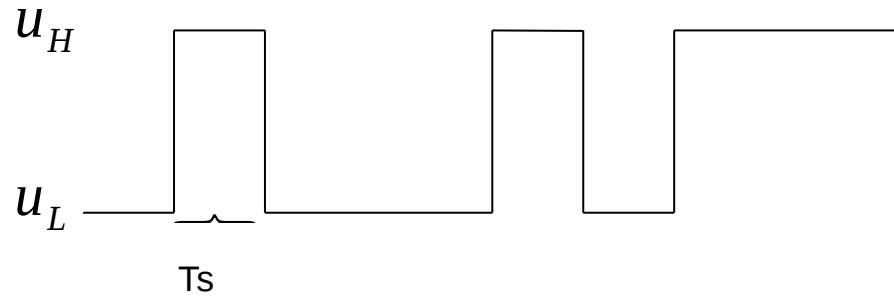




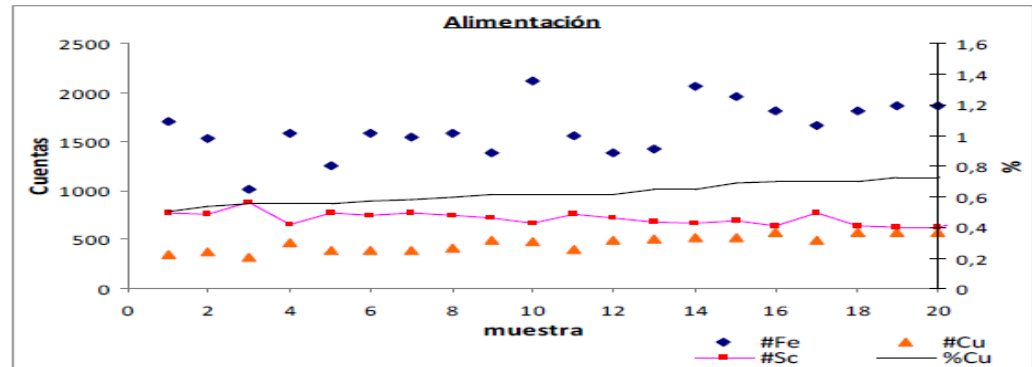
## Registro Histórico de Datos



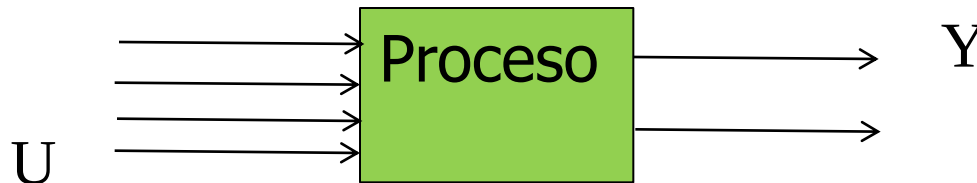
# Diseño de U



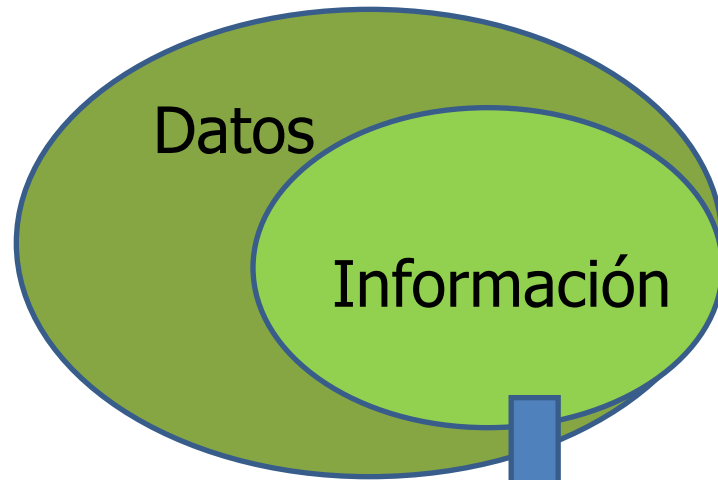
## Observe Y



## Bajo ciertas condiciones de $x_1 \dots x_k$



Este ciclo virtuoso no es espontáneo, hay que generarlo con acciones



Cómo generar información

Conocimiento

Capacidades disponibles

Herramientas: tecnologías

Cómo extraer información

Eficiencia,  
optimización,  
Mejora continua...



Mina

Chancado

Molienda

Un problema de  
integración: desarrollar  
una estrategia de control

Lixiviación

SX

EW

Cátodos

Flotación

Filtrado

Secado

Concentrado

Fundición

Electrólisis

Cátodos



# Idea central de control



# Objetivos

**Planta 1**

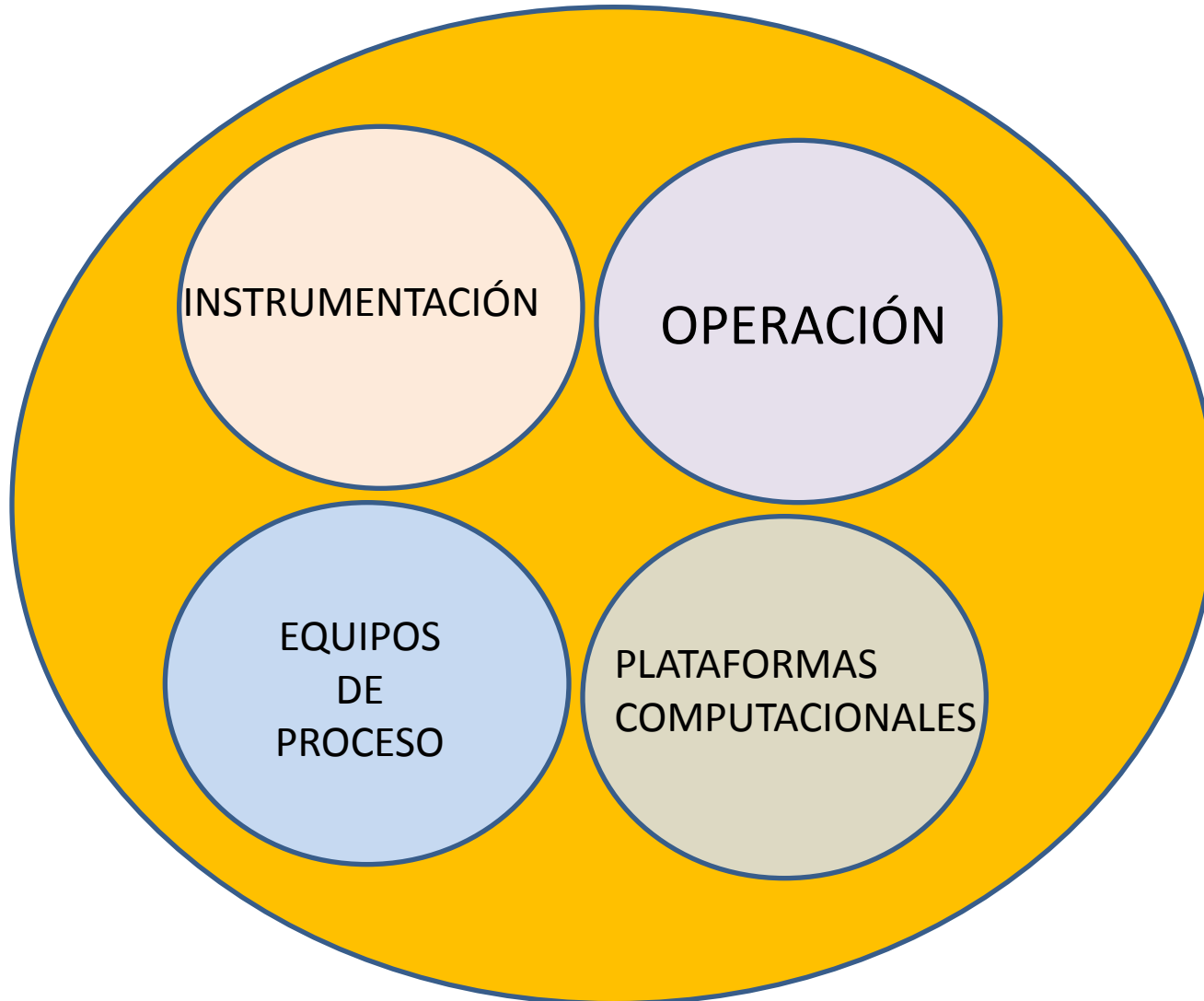
**Intermedios (max  $\eta$ , min var%,  
min consumo reactivos, min  
consumo potencia, ... )**

**Locales (nivel, flujo, % aire, % reactivos, % Cu, ... )**

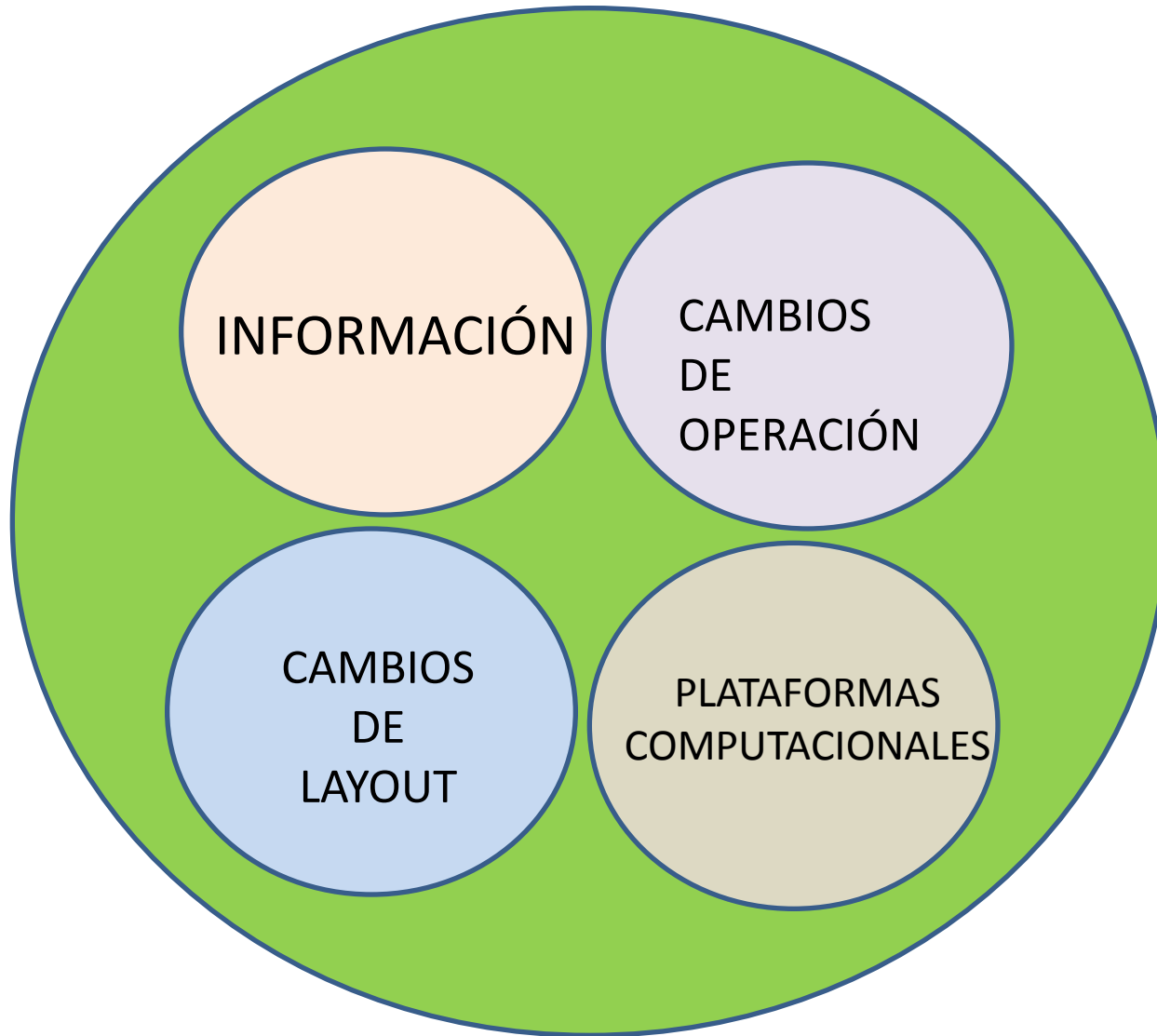




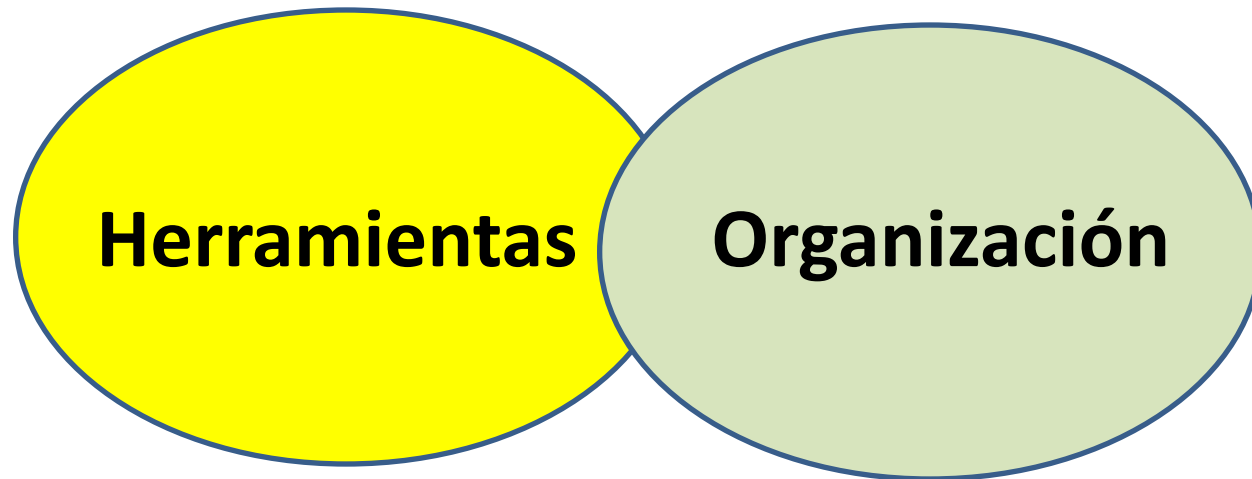
# Restricciones



# Recursos



# Solución de problemas complejos



**Restricciones  
de la planta**

## **Estrategia de control de una planta:**

- Coordinar estrategias de control de secciones de la planta
- Control de objetivos intermedios
- Control de objetivos locales

**Restricciones  
organizativas**

## **Herramientas de control:**

- Información SCADA
- Control PID
- Control Predictivo
- Sistemas Expertos (difusos)



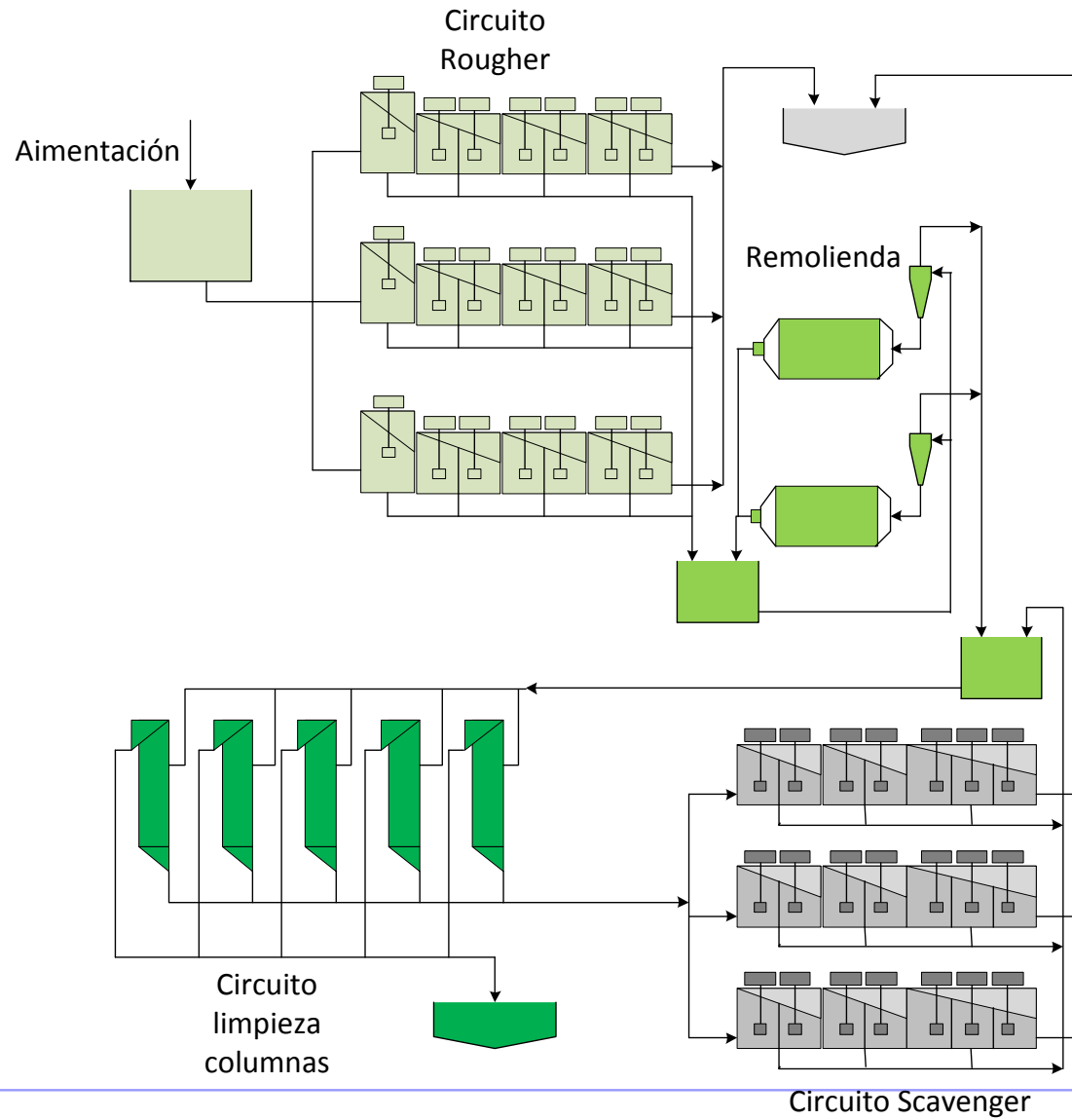
# Pilares fundamentales



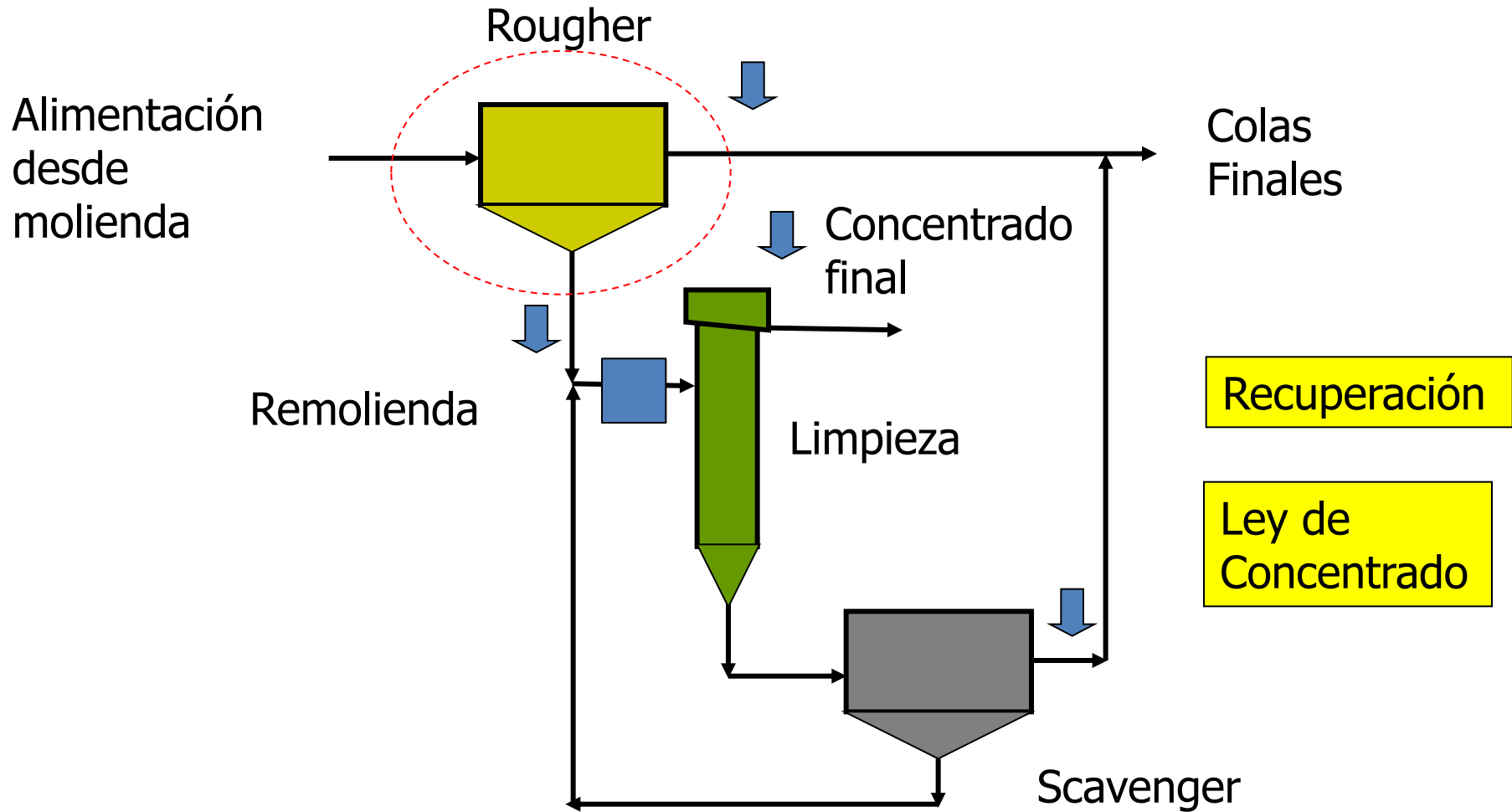
# Pilares fundamentales



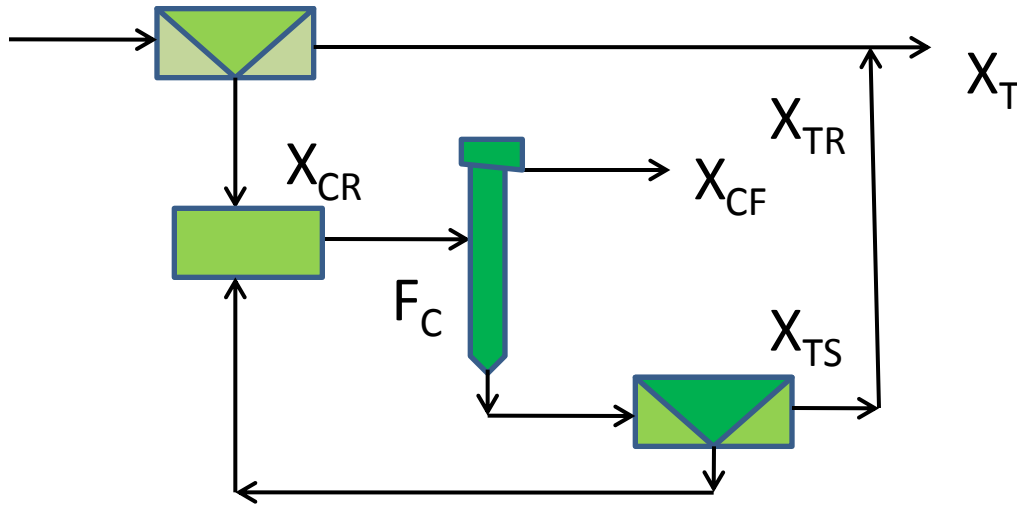
# Ejemplo Planta de Flotación



# Planta de flotación simplificada: R-C-S



# Objetivos Globales



Min  $X_T$  usando dosificación reactivos, perfiles de niveles (velocidades descarga)

Sujeto a:  $X_T^- < X_T < X_T^+$  ;  $X_{CR}^- < X_{CR} < X_{CR}^+$  ;  $F_C < F_C^+$  ; otras

Max  $F_C$  usando flujo de aire, flujo de agua y profundidad de espuma, (espumante)

Sujeto a:  $X_{CF}^- < X_{CF} < X_{CF}^+$  y  $R_C > R_C^-$  y evitar problemas en remolienda

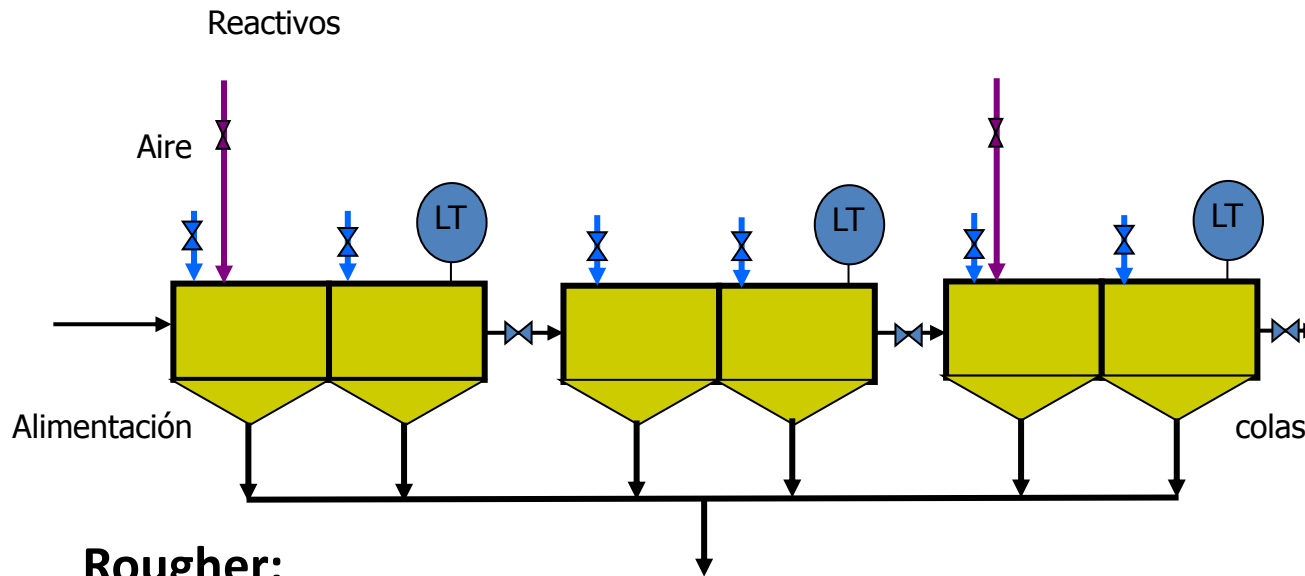
Min  $X_{TS}$  usando perfiles de niveles, (reactivos)

Sujeto a: capacidad de remolienda (carga circulante, granulometría, potencia)

Donde los límites máximos y mínimos son función de cada escenario



# Objetivos locales



## Rougher:

Distribución entre líneas

Elección de perfiles de nivel

Elección de formas de modificar perfiles (aumentar o disminuir  $X_i$ )

Elección de uso de velocidades de descarga (incluye otros factores como  $J_g$ , reactivos, %sol, db, pero es más local)

Recuperación colección:  $J_g$ , db, %sol, colectores, espumantes, potencia, granulometría, tiempo residencia,...

Recuperación espuma: db, espumante, geometría y largo rebases, profundidad de espuma,  $J_g$ , (velocidad de descarga, estabilidad)<sub>i</sub>,...

Actuación: dosificación reactivos por unidad de masa alimentada y su distribución, y posición de tapones en bancos (a veces flujo de aire)



# Objetivos locales

## Limpieza en columnas:

Distribución entre columnas

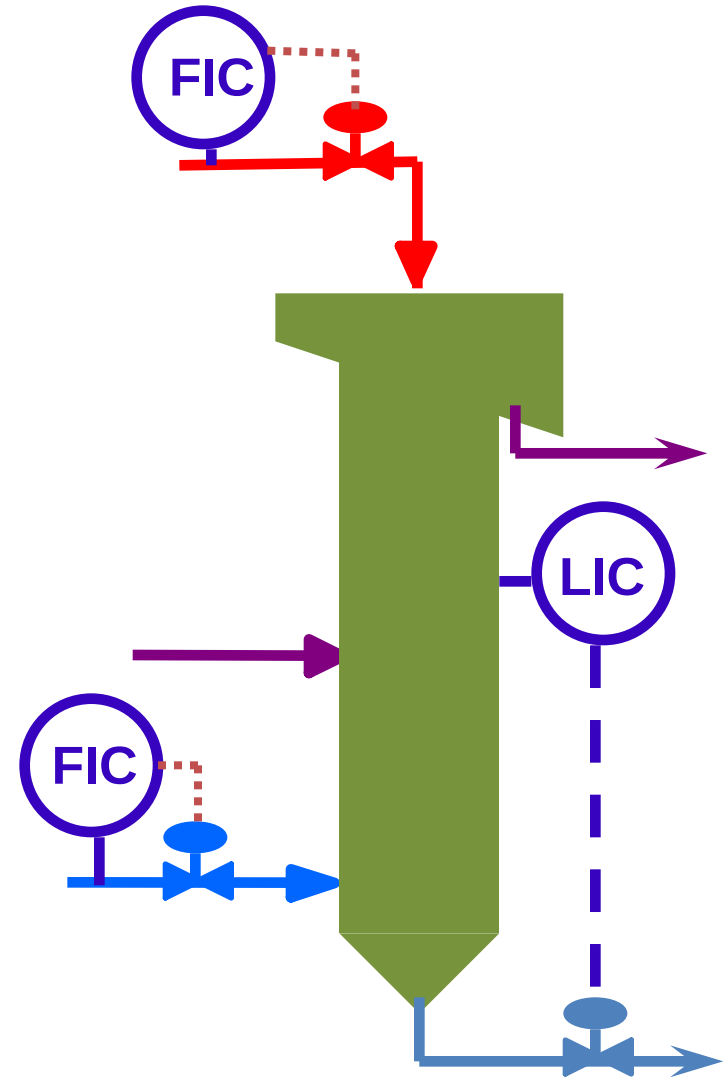
Recursos sp de: profundidad de espuma, flujos de aire y agua de lavado, (ocasionalmente espumante), flujo másico de alimentación (que a su vez es una restricción)

Elección de algoritmos para usar  $Z$ ,  $J_g$  y  $J_w$  para:

(1) Satisfacer objetivos de calidad ( $X_{CF}$  y  $R_{min}$ )

(2) Maximizar  $F_C$  ( $\min X_T$ )

Actuación:  $J_T$ ,  $J_g$ ,  $J_w$ ,  $F_C$



# Pero no olvidar que ....



# Problemas:

## Control sub-óptimo, por baja calidad de mediciones:

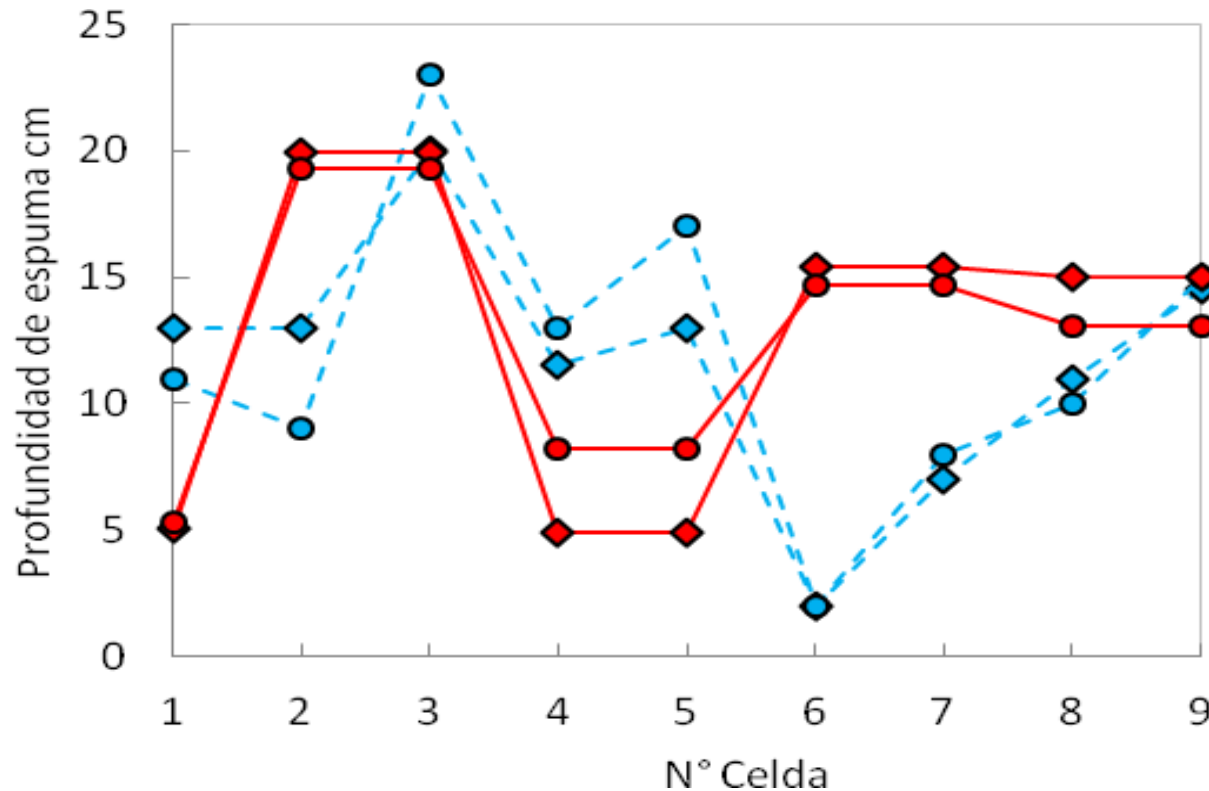
- Leyes (objetivos intermedios)
- Flujos de aire
- Niveles (velocidad de descarga)
- Flujos de agua de lavado

## Control sub-óptimo, por mal estado de equipos de:

- Generación de distribución de tamaño de burbujas
- Distribución homogénea de agua en superficie
- Descarga de concentrado
- Actuación (válvulas de control)

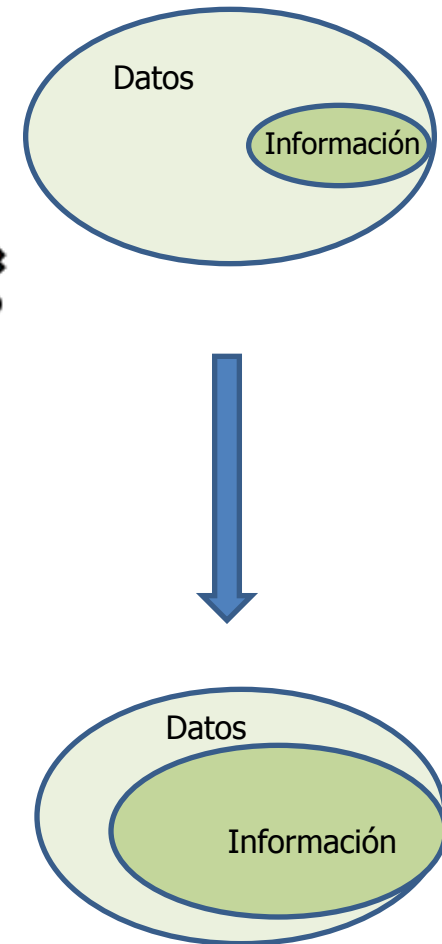


# Contrastación de niveles en circuito Rougher

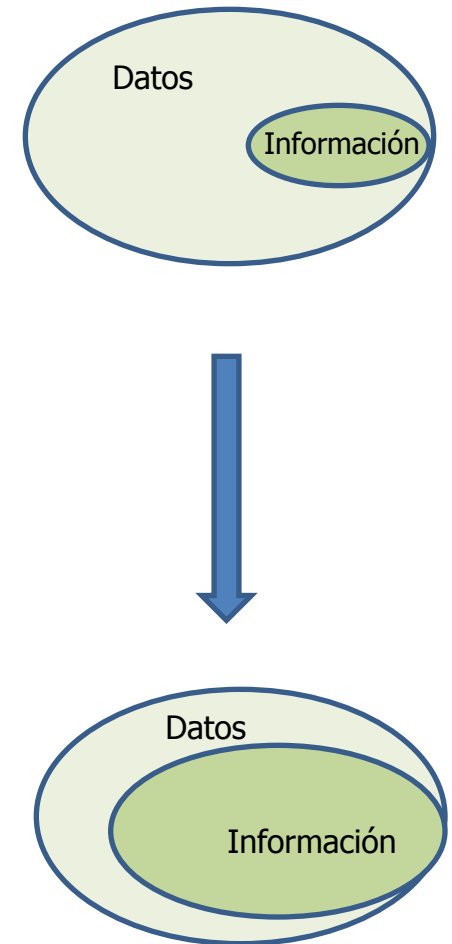
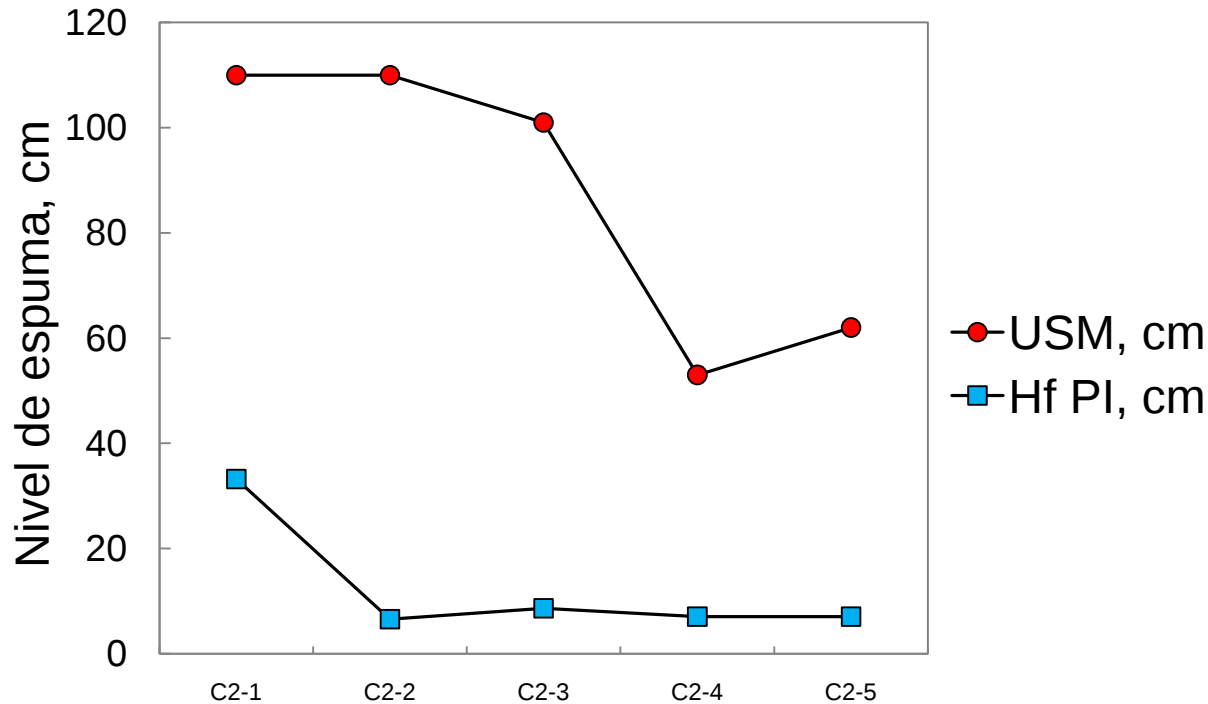


Azul: real

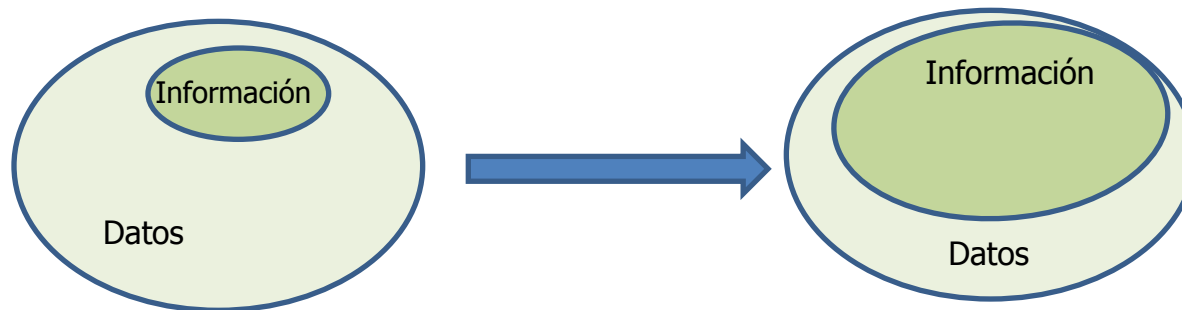
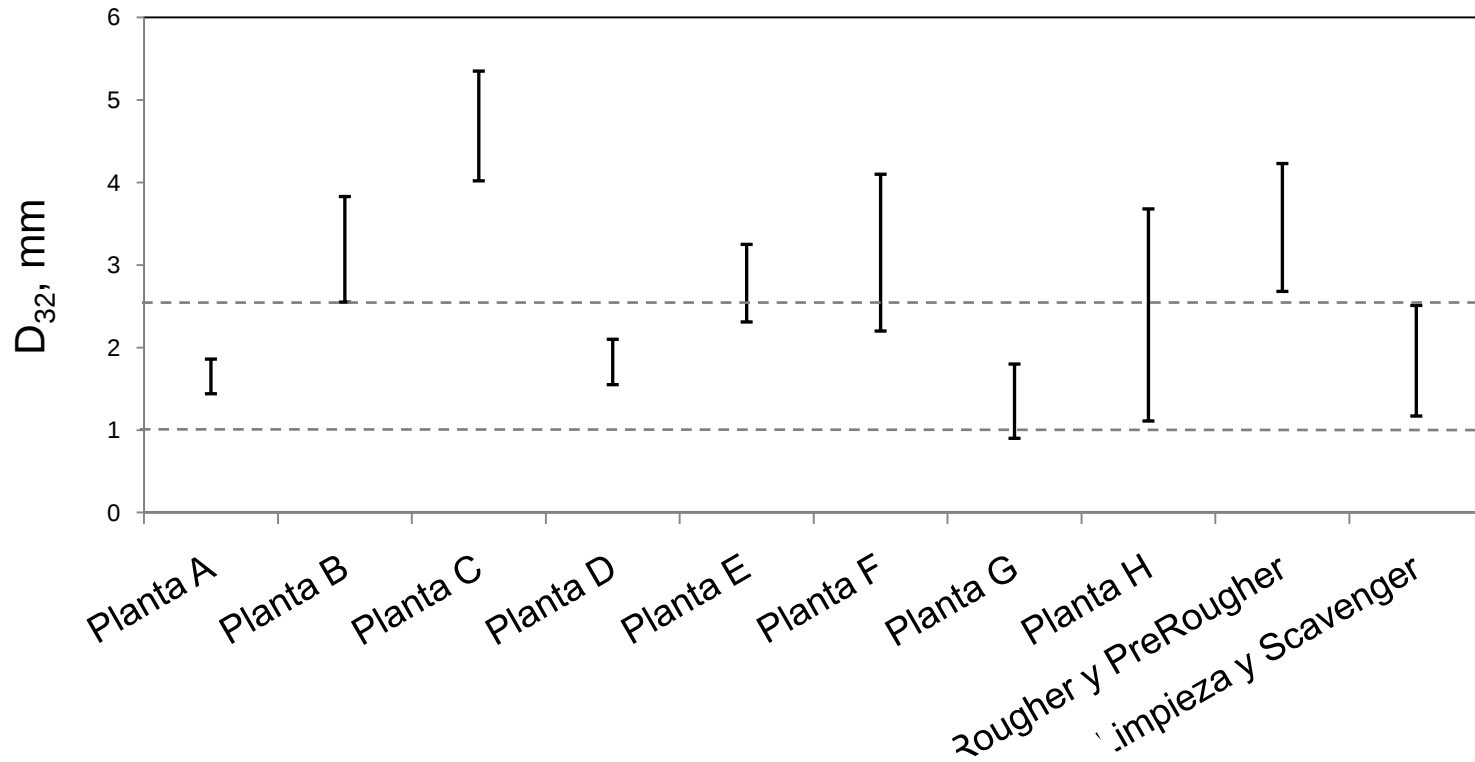
Rojo: sistema SCADA



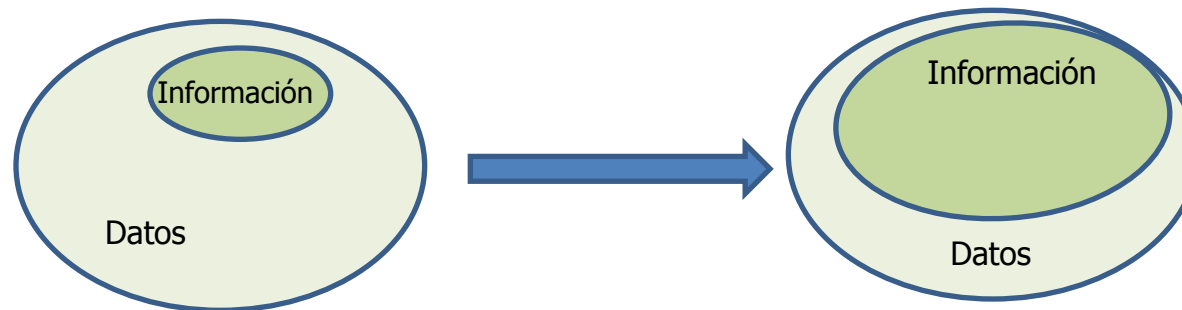
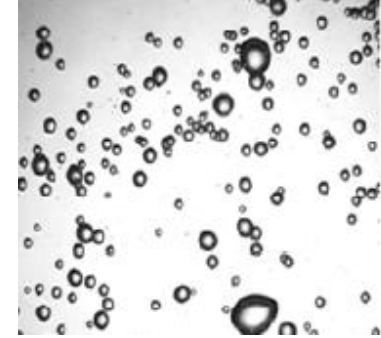
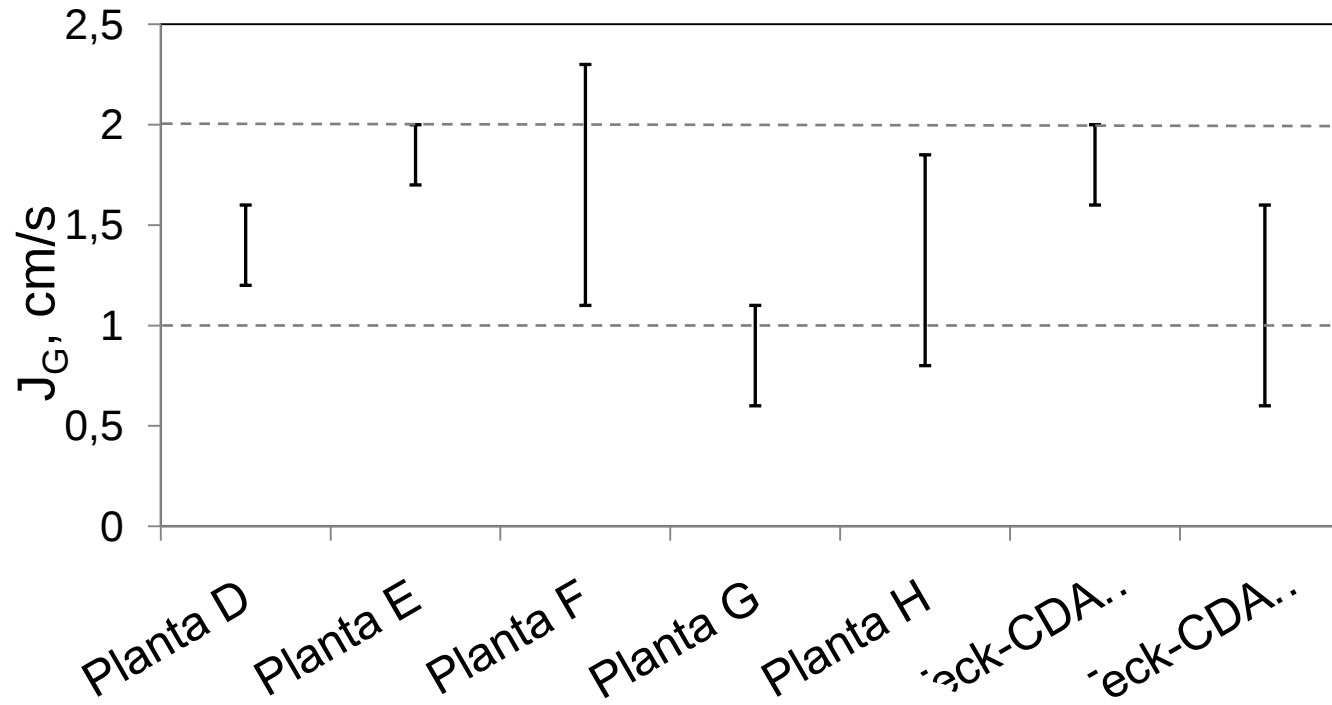
# Contrastación de niveles en columnas

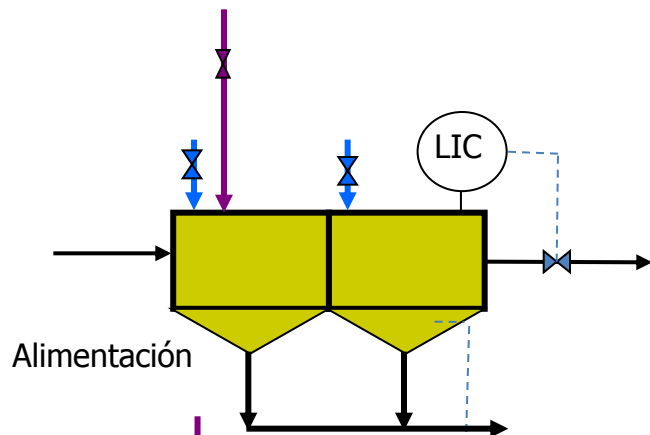


# Benchmarking tamaño de burbujas



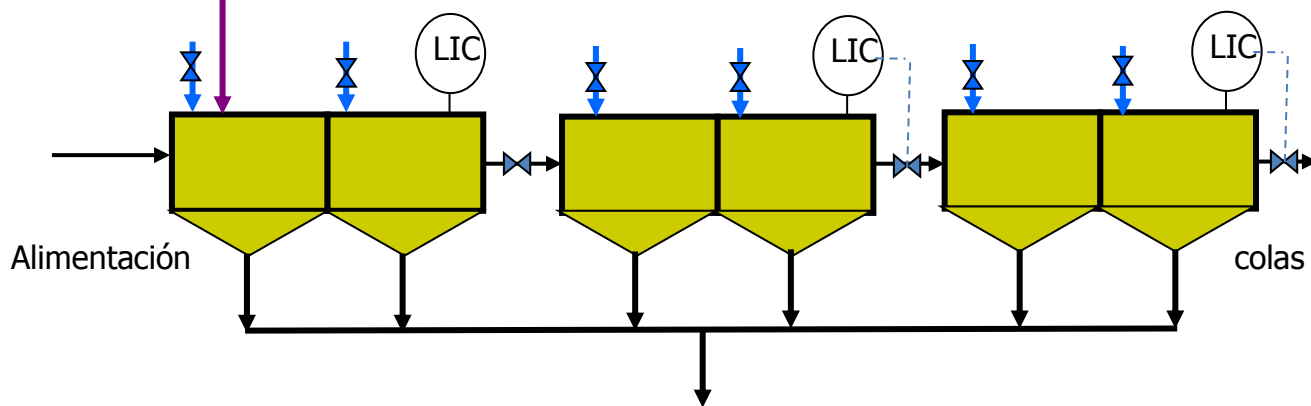
# Benchmarking velocidad superficial de aire





Si un objetivo local: control de nivel no puede lograrse

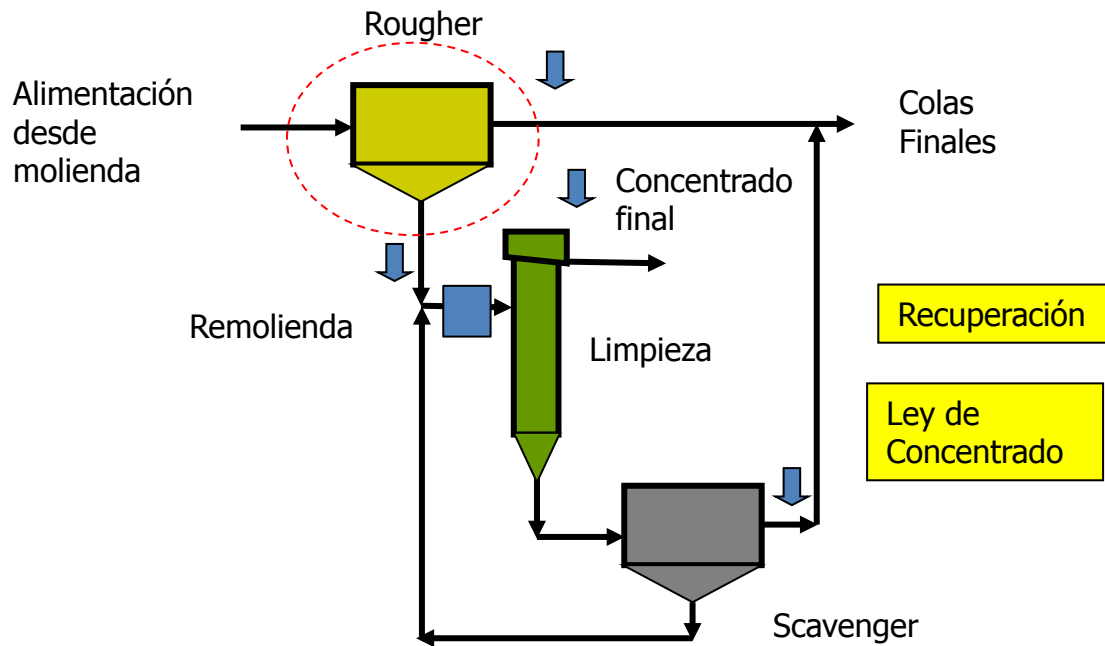
¿Cómo podría lograrse implementar un perfil de niveles?



¿Y si las características del concentrado resultante limita la operación de las siguientes etapas?

Y si un perfil de niveles no puede implementarse cómo se podría lograr maximizar la recuperación del circuito





¿Y si la operación de la flotación no puede seguir la estrategia de control de la planta, cómo puede integrarse con la de molienda o la de filtrado?

¿El problema es falta de tecnología o falta de organización de personal entrenado para el aseguramiento de calidad?



Si el aseguramiento de calidad es un soporte fundamental para:

1. El control local de unidades
2. El control intermedio de unidades
3. El control global de una planta
4. El control integrador con otras plantas

¿Cuál es la organización que permite esto?

¿Cuáles son las competencias requeridas?

¿Quién puede formar estos tipos de profesionales?

¿Qué se está haciendo?

¿O el aumento de producción (expansión) es prioritario a la optimización de la operación?



# **Desafíos hacia la Automatización Integrada de Operaciones Mineras**



**Luis G. Bergh**

**CASIM, Centro de Atomatización y Supervisión para la Industria Minera  
Universidad T. F. Santa María, Valparaíso, Chile**