Módulo 6 – Tema 2 –
Indicadores de sostenibilidad y desarrollo de estrategias de uso eficiente del agua.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**

Gestión Hídrica y Uso Eficiente del Agua

CONTEXTO CRÍTICO: CHILE Y PERÚ



- **Zonas áridas** (Precipitaciones mínimas: norte chileno 1-3 mm/año)
- **Cuencas sobreexplotadas**/restricción por sequía
- **Comunidades rurales** dependientes de agua superficial/subterránea
- **Presión ambiental** y demandas de transparencia
- **Historia de fallas de tranques** (Brasil, Canadá, China) pone los TSFs en el centro de la discusión.

EL CORAZÓN DEL PROBLEMA Y LA SOLUCIÓN: DEPÓSITOS DE RELAVES (TSFs)



ESTRATEGIA HÍDRICA = ESTRATEGIA DE SEGURIDAD



Reducción radical del agua embalsada.
Mientras **MÁS SECO** es un relave, **MÁS ESTABLE** es el depósito.

MIGRACIÓN HACIA LA EFICIENCIA HÍDRICA Y SEGURIDAD



Eficiencia del agua es un **imperativo técnico, económico y social.**

- Evitar conflictos socioambientales
- Cumplir regulaciones y lineamientos internacionales
- Garantizar estabilidad Física
- Asegurar continuidad/expansión de la operación

RelaveNet
A Community of Excellence

KPIs Operacionales

Tabla 1. Tasa de Recuperación/Recirculación Hídrica

TECNOLOGÍA DE DISPOSICIÓN	RANGO TÍPICO DE RECUPERACIÓN HÍDRICA	OBSERVACIONES
Relaves Convencionales (Lodos diluidos)	<50%	Gran parte del agua se pierde por evaporación y filtración.
Relaves Espesados (TTD)	Hasta **70%** del agua contenida.	Permiten un mejor retorno de agua y reducen la huella superficial.
Relaves Filtrados (FTD) / Apilamiento Seco	Típicamente entre **85% y 95%** del agua total en los relaves.	Logran la máxima recuperación de agua, reduciendo drásticamente la demanda de agua fresca.
Apilamiento Hidráulico Deshidratado (HDS)	Aproximadamente **80%**.	Tecnología innovadora que logra alta recuperación sin necesidad de filtros de presión.
Promedio Gran Minería (Chile)	Hasta **76.5%** (reportado en 2017), con un promedio que se aproxima al **74%**.	Demuestra la tendencia de la industria hacia sistemas de circuito cerrado exitosos.

La Tasa de Recuperación Hídrica (TRR o WRR) mide el volumen de agua de proceso recuperado, típicamente de la laguna de decantación del TSF, que es devuelto para su reutilización en la planta concentradora. Esta métrica es fundamental para la circularidad interna del agua y para medir la reducción de la dependencia de fuentes externas.

Información adicional:

- Los filtros prensa o filtros de disco se utilizan para la deshidratación, obteniendo un sólido filtrado con menos del 20% de humedad, lo que permite la reutilización del agua extraída.
- El agua recuperada (también conocida como agua decantada o reclaimed water) es el agua sobrenadante que se toma del estanque en la parte superior del TSF para ser reutilizada, evaporada o tratada y liberada.

RelaveNet
A Community of Excellence

KPIs Operacionales

Tabla 2. Consumo Específico de Agua Fresca (CEA) / Make-up Water Requirement (MWR)

Tecnología / Operación	Rango Típico de MWR (m3/t)	Comparación de Eficiencia
Relaves de Lodos Convencionales	0.7 m3/t.	Es el rango más alto y requiere una gran cantidad de agua de reposición.
Rango Operacional General (Convencional)	**0.35–0.70** m3/t.	La práctica convencional en minería.
Operaciones con Recirculación (Chile)	Levemente bajo 0.45 m3/t.	Indica una eficiencia mejorada gracias a la recirculación.
Sistemas Avanzados de Espesamiento (SSSTT)	0.30–0.40 m3/t.	Muestra las ganancias de eficiencia obtenidas con la inversión en desaguado.
Apilamiento Seco (Dry Stacking)	0.2 m3/t.	El más bajo, logrando la máxima reducción en el consumo de agua fresca, incluso para grandes producciones (ma´s de 100,000 mtpd).

El Consumo Específico de Agua Fresca (CEA) o Requerimiento de Agua de Reposición (MWR) es un KPI primario que determina la intensidad del uso hídrico. Se calcula como el volumen de agua fresca extraída de fuentes externas por tonelada de mineral procesado (m3/t).

Datos específicos de consumo:

- Los cálculos para el TSF de Pampa de Pabellon en el norte de Chile estimaron que el agua de reposición necesaria para la planta de procesamiento variaba entre 0.61 m3/ton y 0.65 m3/ton de mineral procesado.
- Un modelo para una TMF sin revestimiento en clima seco indicó que las extracciones de agua podrían reducirse de 0.70 m3/tonne a 0.18 m3/tonne mediante el aumento del contenido de sólidos.

RelaveNet
A Community of Excellence

KPIs Operacionales

Tabla 3. KPI Contenido de Sólidos de los Relaves

Método de Disposición	Contenido de Sólidos (Fase Sólida)	Contenido de Agua (Humedad)	Propósito de Estabilidad
Relaves Convencionales	20% a 40%	Alto (Comportamiento de suspensión acuosa)	Requiere construcción de muros de contención fuertes.
Relaves Espesados	60% a 65%	~35% a 40% de agua.	Reduce la huella y mejora la estabilidad respecto al convencional.
Relaves Ultra Espesados	60% a 75%	Menor, pero aún manejable por tuberías.	Permite el apilamiento con ángulos de talud mayores.
Relaves Filtrados / Seco	Mínimo **80%**.	Menos del **20%** de humedad.	**Máxima estabilidad**, minimizando el riesgo de falla por licuefacción.
Relaves en Pasta (PTD)	Pulpa no segregante y viscosa.	Entre **10% y 25% de agua**.	Se utiliza como relleno o se dispone sin necesidad de compactación.

Este indicador es fundamental porque vincula directamente la eficiencia hídrica con la estabilidad geotécnica y la mitigación del riesgo de licuefacción. El objetivo de las tecnologías de desaguado avanzado es alcanzar un contenido de humedad mínimo en la torta de relave.

Importancia del contenido de sólidos en la operación:

- Para que la pulpa de relaves escurra bien por la tubería de transporte sin embancamiento, pero sin saturar rápidamente la cubeta, un rango práctico aceptado de sólidos en peso es entre 35% y 45%.
- Si la razón S:A (sólidos a agua) es menor que 50%, la pulpa se comporta como una suspensión acuosa y se produce segregación de partículas. Si la razón es igual o mayor a 55%, la pulpa comienza a comportarse como un lodo viscoso y disminuye fuertemente la segregación.

RelaveNet
A Community of Excellence

Indicadores Geotécnico: Humedad / % Sólidos

El vínculo entre agua y seguridad es directo.
Lo que está en juego es la **estabilidad del depósito de relaves**.

A mayor humedad → mayor agua libre → mayor presión de poros → menor resistencia al corte → mayor riesgo de licuefacción.

En tecnologías avanzadas buscamos <20% de humedad.
Los relaves filtrados logran tortas de 15–18% de humedad.
Los relaves espesados quedan con 60–65% en sólidos (~35–40% de humedad).

Este KPI no solo habla de eficiencia hídrica, sino de prevención de fallas catastróficas, uno de los objetivos del Estándar Global de Relaves (GISTM).

RelaveNet
A Community of Excellence

Fuentes No Convencionales: Desalinización

En Chile una solución hídrica clave es la desalinización.
80% del agua desalinizada del país se usa en minería.

Para 2030, más del 50% del agua minera será desalinizada.

Ventajas:
- Reduce presión sobre acuíferos.
- Estabiliza el suministro.
- Reduce conflicto social.

Desventajas:
- Alta energía.
- Manejo de salmuera.

Sin embargo, el costo de no tener agua es mucho más alto. Por eso, Escondida, Spence, Codelco y Los Bronces están construyendo sistemas masivos de desalación.

RelaveNet
A Community of Excellence

Indicadores Ambientales y de Riesgo Contextual (Huella Hídrica)

HUELLA HÍDRICA (Water Footprint)

La Huella Hídrica mide el volumen de agua dulce consumido o contaminado a lo largo de toda la cadena productiva.

HH Azul (HHAR)

Consumo neto de agua azul superficial o subterránea.
Incluye:

- Evaporación
- Agua incorporada
- Agua no retornada

HHAR es el KPI estratégico clave en minería.

HH Gris (HHG)

Volumen de agua necesario para diluir contaminantes hasta límites legales.
Depende de:

- Calidad de efluentes
- Tratamiento previo

HH Verde (HHV)

Agua de lluvia evaporada o incorporada en vegetación.
Poco relevante en minería debido a la baja interacción vegetal.

HUELLA DEL AGUA (ISO 14046)

Evalúa impactos ambientales potenciales asociados al uso del agua, no solo el volumen utilizado.

Dimensión Directa

Impactos dentro de la operación minera:

- Consumo
- Descargas
- Degradación local del recurso hídrico

Dimensión Indirecta

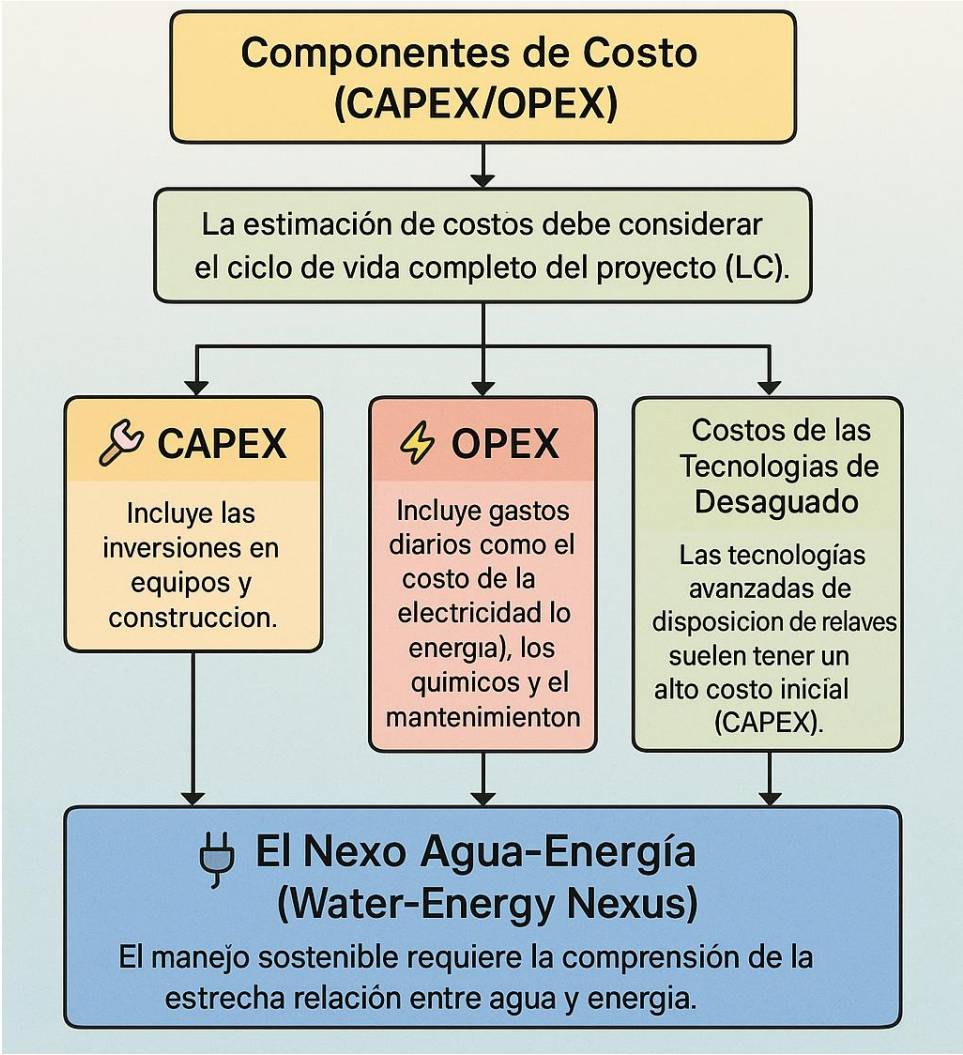
Impactos fuera de la operación minera asociados a:

- Suministro eléctrico
- Transporte
- Insumos y químicos
- Procesos de proveedores

RelaveNet
A Community of Excellence

Indicadores Operacionales de Costo y Energía (CAPEX y OPEX)

Los KPIs de costo y energía evalúan la viabilidad económica y el nexo agua-energía de las tecnologías de gestión de relaves. Los dos componentes de costo más importantes en la gestión de relaves son el gasto de capital (CAPEX) y el gasto operacional (OPEX).



RelaveNet
A Community of Excellence

Conclusiones



LINEAMIENTOS INTERNACIONALES

Banco Mundial

CEPAL

PNUMA

PNUMA

ICMM

EVIDENCIA ACADÉMICA

PILAR 1
MAXIMIZAR RECIRCULACION INTERNA

Pilar 1

70 %

80%

Filtra

90-95%

PILAR 2
DIVERSIFICAR FUENTES HIDRICAS

Uso desalano

Tratãoe urban tratadat

Menor costa

CASOS REALES

ANTAMINA

CODELCO

98.5%
de recirculación

Perspectivas con agua de desalinizada

ANGLO AMERICAN

0 agua dulce para 2030

PERSPECTIVA TECNICA

Maximiżar recuperacion y reducir agua embalsada

PERSPECTIVA ECONOMICA

Menor costo total y continuidad operativa

DE POLÍTICAS PUBLICAS

PERSPECTIVA AMBIENTAL

Protección de ecosisternas y estabilidad fisica

PERSPECTIVA DE POLITICAS PUBLICA

Licencia social y cumplimiento normativo

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 6 – Tema 2 –
Indicadores de sostenibilidad y desarrollo de estrategias de uso eficiente del agua.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**