Módulo 3 – Tema 2

# Prácticas recomendadas para la gestión del agua en TSF: Reducción de pérdidas de agua por evaporación e infiltración


- **Ing. Danny Flores Cruz**


RelaveNet
A Community of Excellence

# INTRODUCCIÓN

**Tabla 1.** Metodologías de gestión de relaves y aporte de agua promedio (pérdidas de agua en el TSF).

| Tailings Management Methodology | Tailings Storage Facility Name | Country | TSF Disposal and Water Management Parameters | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Production Rate (mtpd) | PSD $d_{50}$ (μm) | Solids Content Cw (%) | Average Make-Up (m3/mt) |
| FWS—WRCT | Pampa Pabellon TSF | Chile | 170,000 | 52 | 52 (TT) | 0.70 |
| FWS—WRCT | Talabre TSF | Chile | 180,000 | 70 | 55 (TT) | 0.64 |
| FWS—WRCT | Los Quillayes TSF | Chile | 115,000 | 36 | 40 (SL) | 0.35 |
| FWS—WRCT | Mauro TSF | Chile | 205,000 | 36 | 40 (SL) | 0.35 |
| FWS—WRCT | Candelaria TSF | Chile | 75,000 | 65 | 51 (TT) | 0.34 |
| FWS—WRCT | Candelaria (Los Diques TSF) | Chile | 75,000 | 65 | 51 (TT) | 0.34 |
| FWS—WRCT | Carmen de Andacollo TSF | Chile | 55,000 | 70 | 53 (TT) | 0.44 |
| SWS—WRCT | Laguna Seca TSF | Chile | 370,000 | 65 | 50 (TT) | 0.66 |
| SWS—WRTT | Esperanza (Centinela TSF) | Chile | 95,000 | 45 | 65 (TT) | 0.50 |
| SWS—WRTT | Sierra Gorda TSF | Chile | 110,000 | 40 | 60 (TT) | 0.50 |
| SWS—WRTT | Cerro Negro Norte TSF | Chile | 20,000 | 75 | 65 (TT) | 0.45 |
| FWS—WRPTT | Las Cenizas (Chinchorro TSF) | Chile | 2500 | 44 | 65 (TT) | 0.39 |
| FWS—WRPTT | ENAMI (Delta Plant TSF) | Chile | 2000 | 25 | 60 (TT) | 0.48 |
| FWS—WRPTT | Coemin TSF | Chile | 8000 | 50 | 60 (TT) | 0.42 |
| FWS—WRPTT | Alhue TSF | Chile | 3000 | 55 | 65 (TT) | 0.40 |
| FWS—WRFT | La Coipa TSF | Chile | 20,000 | 68 | 80 (TT) | 0.22 |
| FWS—WRFT | El Peñon TSF | Chile | 3000 | 62 | 84 (TT) | 0.20 |
| FWS—WRFT | Mantos Verde TSF | Chile | 12,000 | 57 | 82 (TT) | 0.23 |
| FWS—WRHT | Mantos Blancos TSF | Chile | 12,000 | 86 | 82 (TT) | 0.28 |
| FWS—WRHT | Caserones (La Brea/Sand TSF) | Chile | 90,000 | 74 | 60 (TT) | 0.37 |
| FWS—WRFT | Cerro Lindo TSF | Peru | 7000 | 65 | 88 (SL) | 0.20 |
| FWS—WRCT | Quebrada Enlozada TSF | Peru | 120,000 | 45 | 40 (SL) | 0.38 |
| FWS—WRCT | Quebrada Linga TSF | Peru | 240,000 | 45 | 40 (SL) | 0.38 |
| FWS—WRCT | Quebrada Honda TSF | Peru | 150,000 | 75 | 37 (SL) | 0.62 |
| FWS—WRCT | Quebrada Cortadera TSF | Peru | 127,500 | 75 | 45 (TT) | 0.40 |

**Nota:** Los siguientes términos significan: TT: Relaves Totales, SL: Lodos (distribución del tamaño de partículas finas de los relaves totales), FWS: Suministro de Agua Dulce y SWS: Suministro de Agua de Mar

Cada mejora tecnológica aplicada en un TSF (espesamiento, filtrado, impermeabilización, monitoreo) está directamente relacionada con la reducción de evaporación e infiltración. Esto convierte al manejo del agua en TSF no solo en un requisito ambiental, sino en un factor de eficiencia operativa y competitividad en minería moderna.

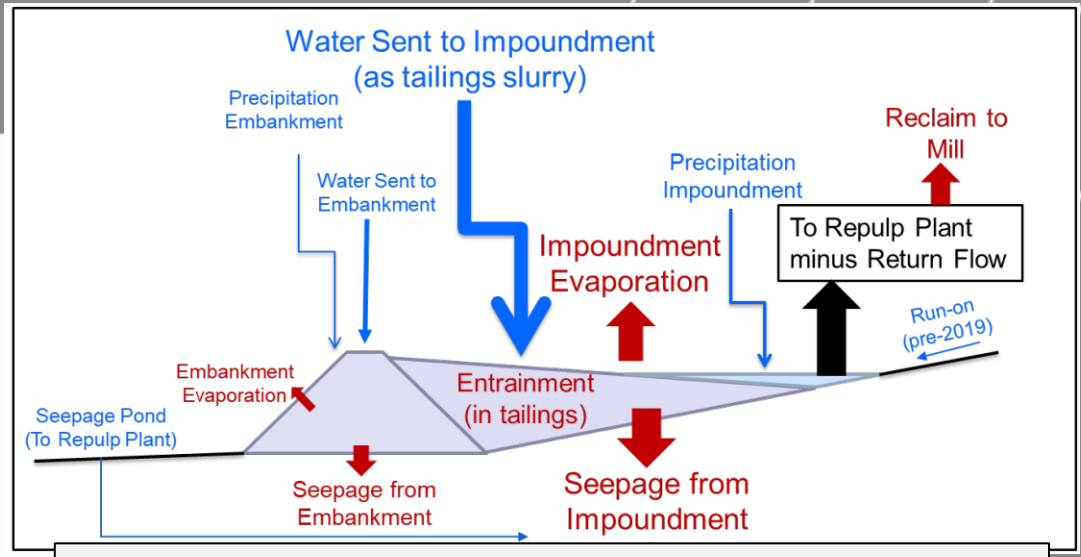


**Figura 2.** Esquema general de entradas y salidas de agua en un tranque de relaves

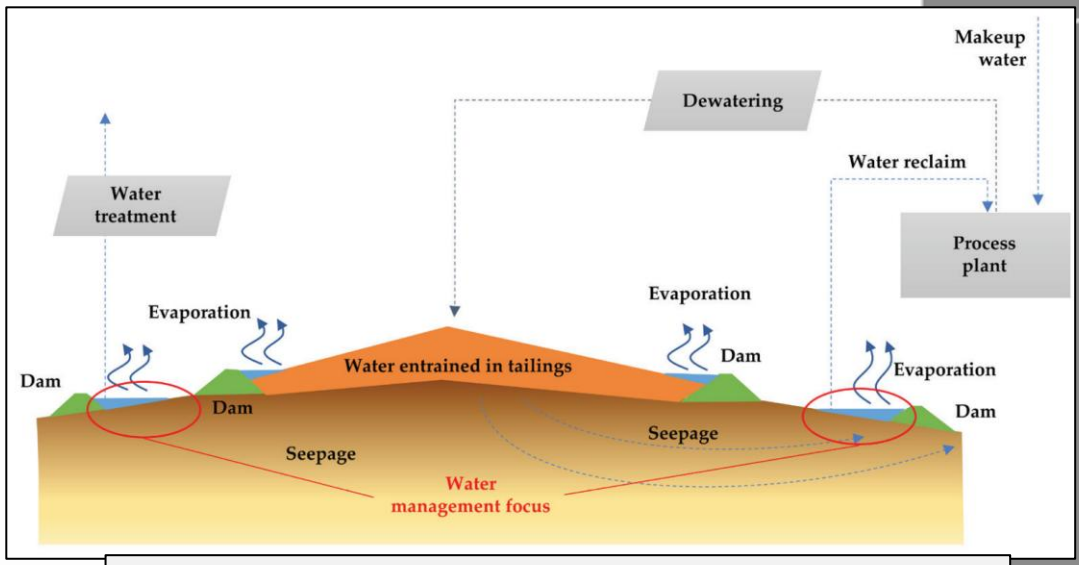


**Figura 3.** Balance hídrico en un depósito de relaves espesados (TTSF)

RelaveNet
A Community of Excellence

# INTRODUCCIÓN

**Tabla 2.** Comparación de recuperación de agua entre diferentes tecnologías de disposición de relaves (producción: 100.000 t/día)

| Descripción | Unidad | Relaves Convencionales | Relaves Espesados | Relaves HC-HVS | Relaves Filtrados |
|---|---|---|---|---|---|
| Producción de relaves | t/día | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 |
| % Sólidos antes del espesamiento (Cw) | % | 28 | 28 | 28 | 28 |
| Agua contenida en relaves convencionales | L/s | 2.976 | 2.976 | 2.976 | 2.976 |
| % Sólidos después del espesamiento/filtrado (Cw) | % | 50 | 60 | 70 (*) | 80 |
| Agua en relaves dispuestos | L/s | 1.157 | 772 | 496 | 289 |
| Agua recuperada en equipos de espesamiento/filtrado | L/s | 1.819 | 2.205 | 2.480 | 2.687 |
| Agua recuperada desde el depósito (TSF) | L/s | 382 | 255 | 164 | 95 |
| **Recuperación total de agua** | L/s | **2.201** | **2.459** | **2.644** | **2.782** |
| **Eficiencia de recuperación** | % | **74** | **83** | **89** | **93** |

La tabla no solo muestra un aumento progresivo en la eficiencia de recuperación de agua, sino que muestra cómo la adopción de tecnologías más avanzadas está directamente relacionada a la reducción de pérdidas por evaporación e infiltración, que son dos fuentes de ineficiencia hídrica en las instalaciones de relaves.

RelaveNet
A Community of Excellence

# CONSIDERACIONES PARA EVAPORACIÓN EN TSF



**Figura 4.** Estación Surface Renewal al inicio de las observaciones en playa de relaves



**Figura 5.** Estación Surface Renewal durante la etapa final de deposición de relaves

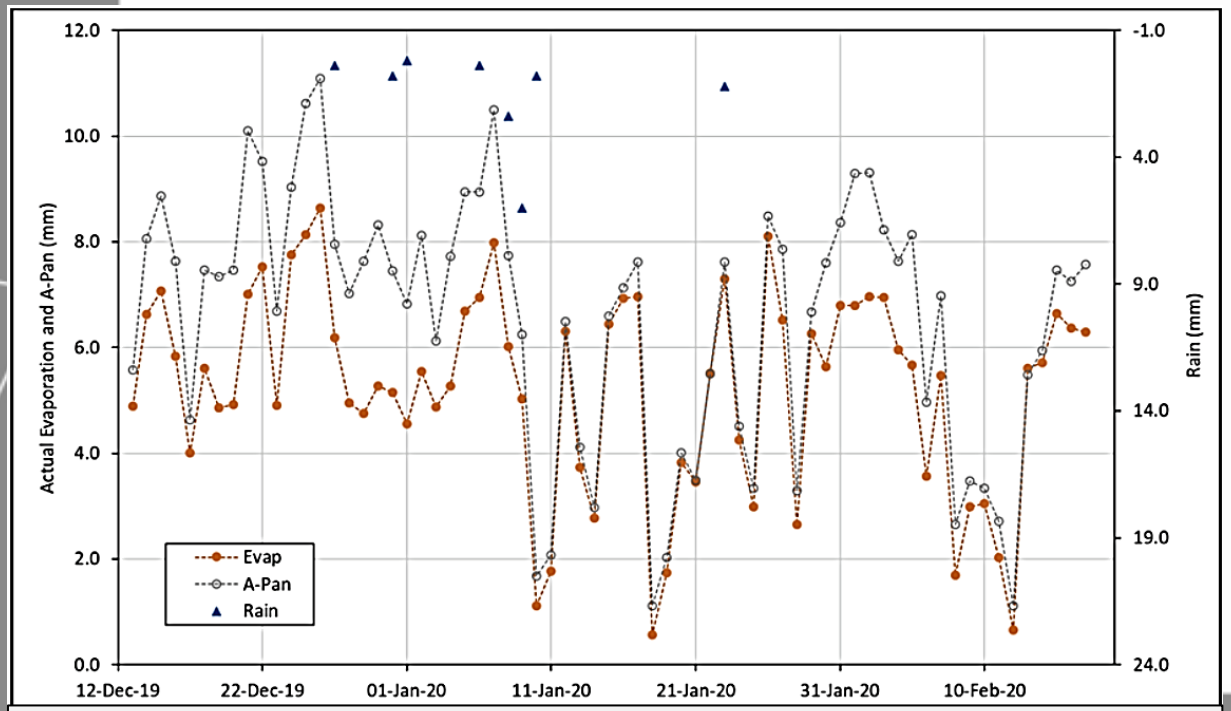


**Figura 6.** Comparación entre evaporación real y evaporación potencial en playa de relaves

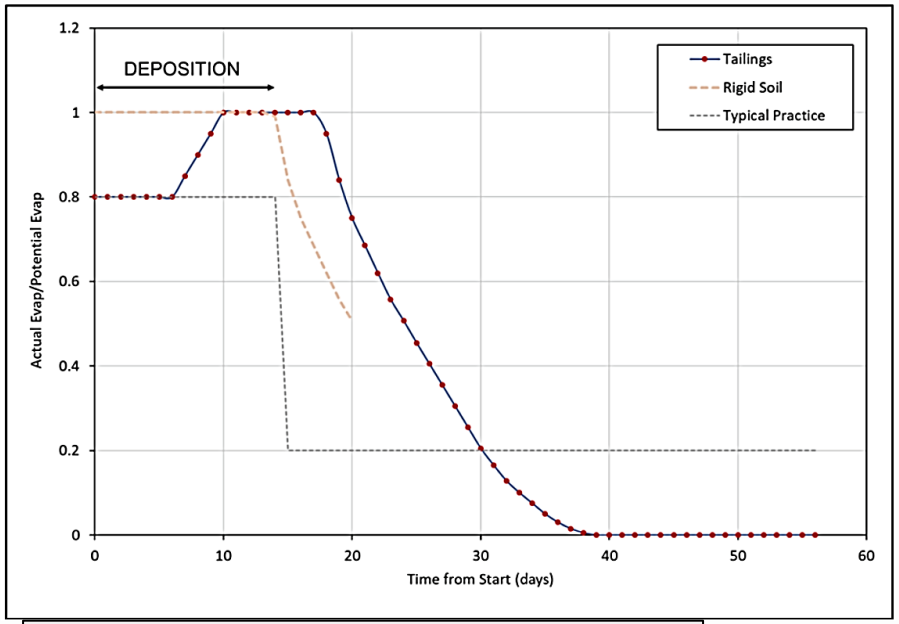


**Figura 7.** Evolución de la relación evaporación real/potencial en el ciclo de deposición y secado.

RelaveNet
A Community of Excellence

# CONSIDERACIONES PARA INFILTRACIÓN EN TSF

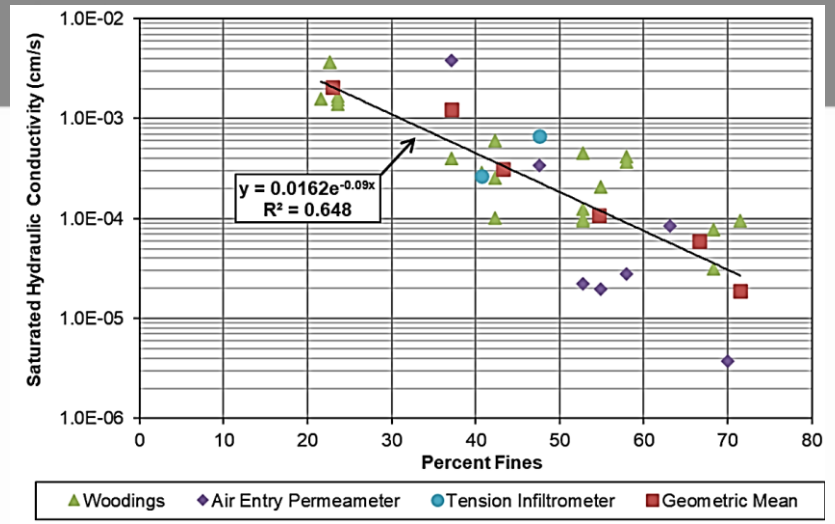


**Figura 8.** Conductividad hidráulica saturada (Ksat) vs. % de finos.

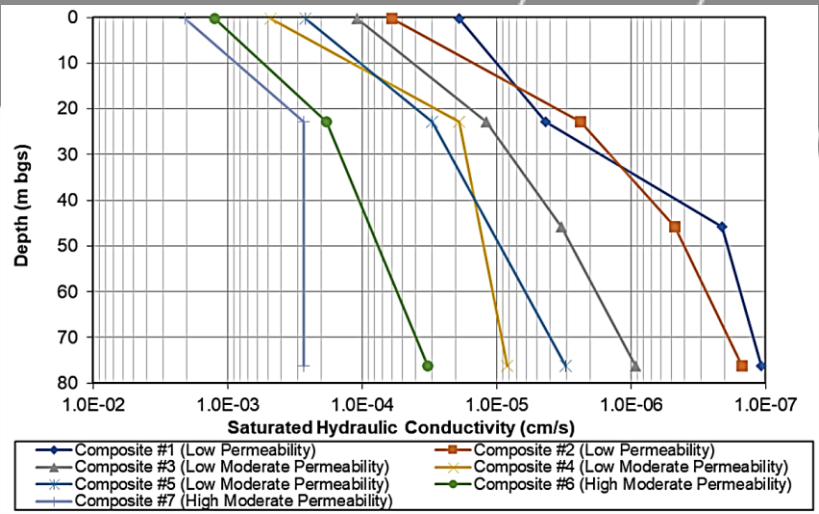


**Figura 9.** Conductividad hidráulica saturada (Ksat) vs. profundidad.

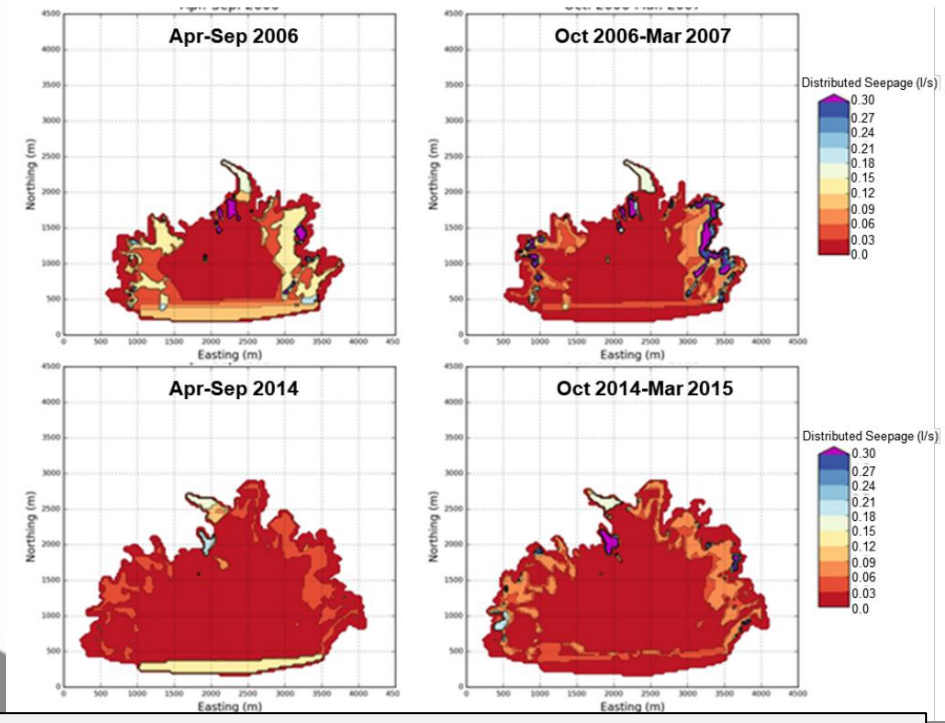


**Figura 10.** Distribución espacial del seepage en el TSF.

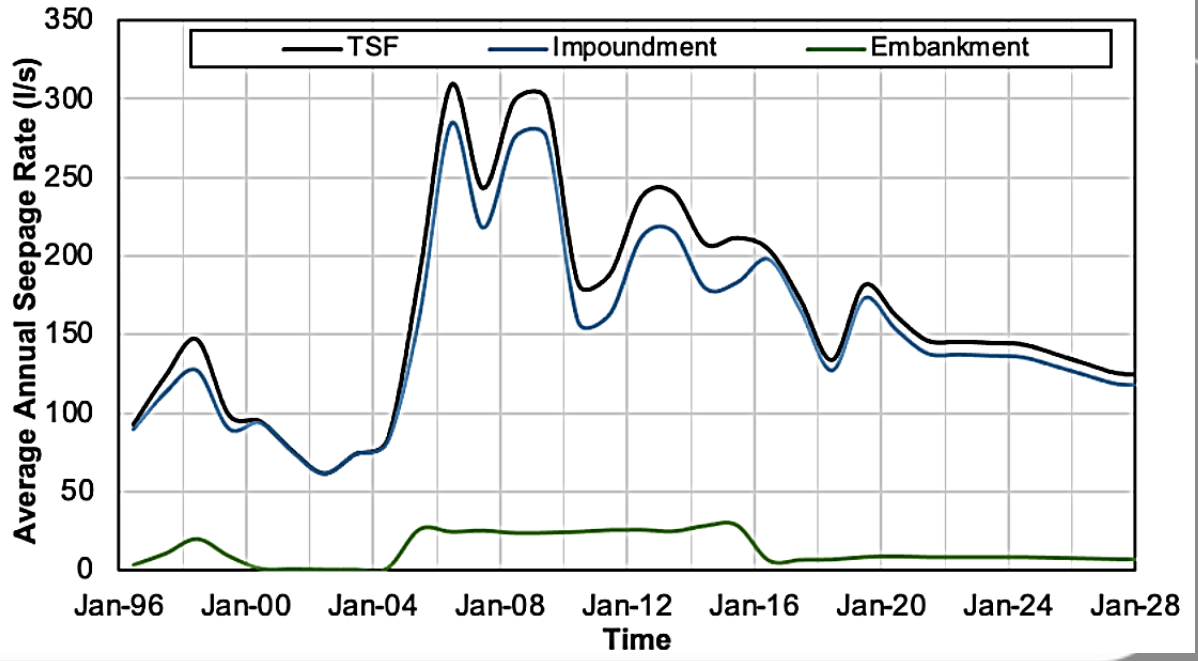


**Figura 11.** Predicción de tasas de infiltración promedio anual.

RelaveNet
A Community of Excellence

# CONSIDERACIONES GENERALES

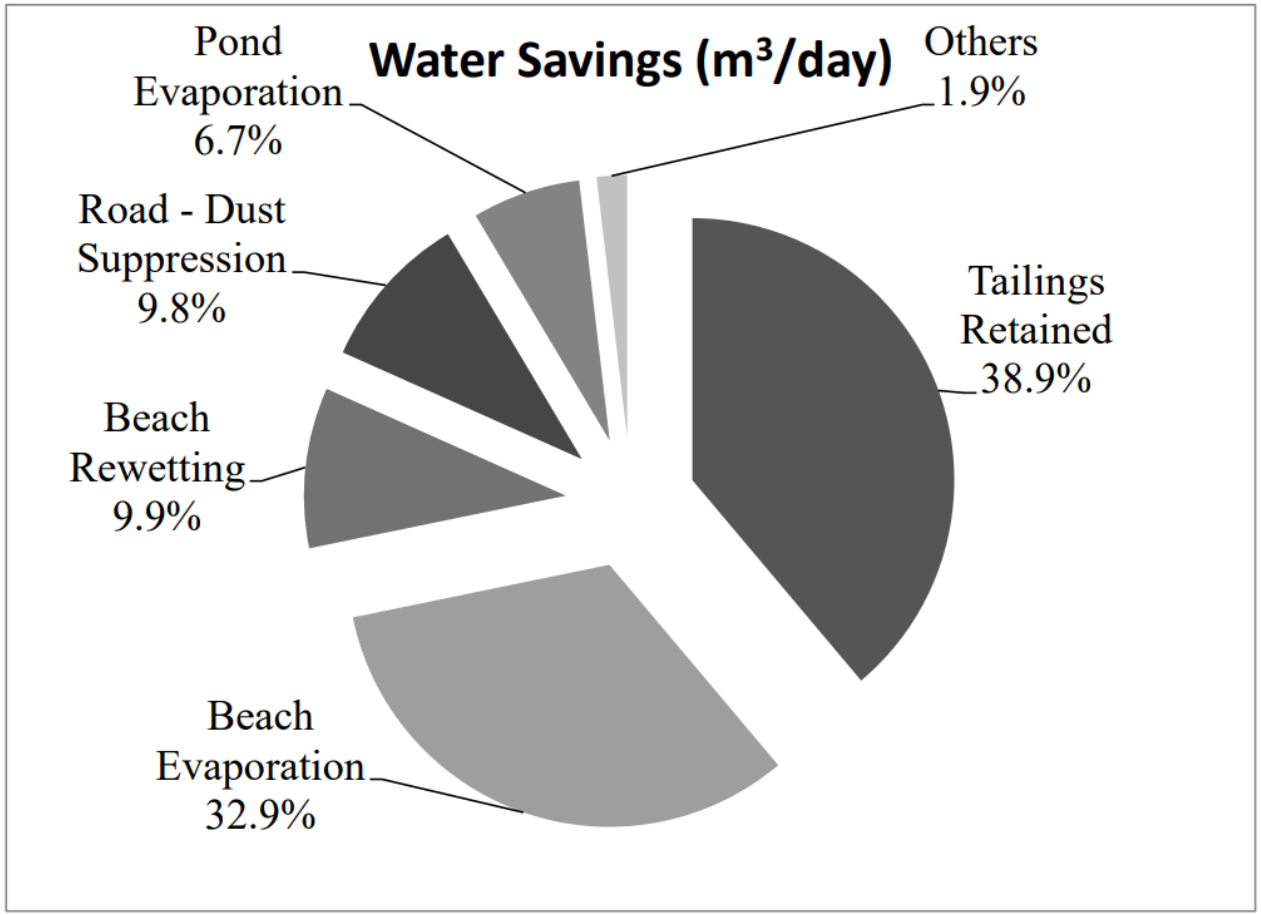


**Figura 12.** distribución de los ahorros de agua por fuente de pérdida en un escenario específico

RelaveNet
A Community of Excellence

# CONSIDERACIONES GENERALES

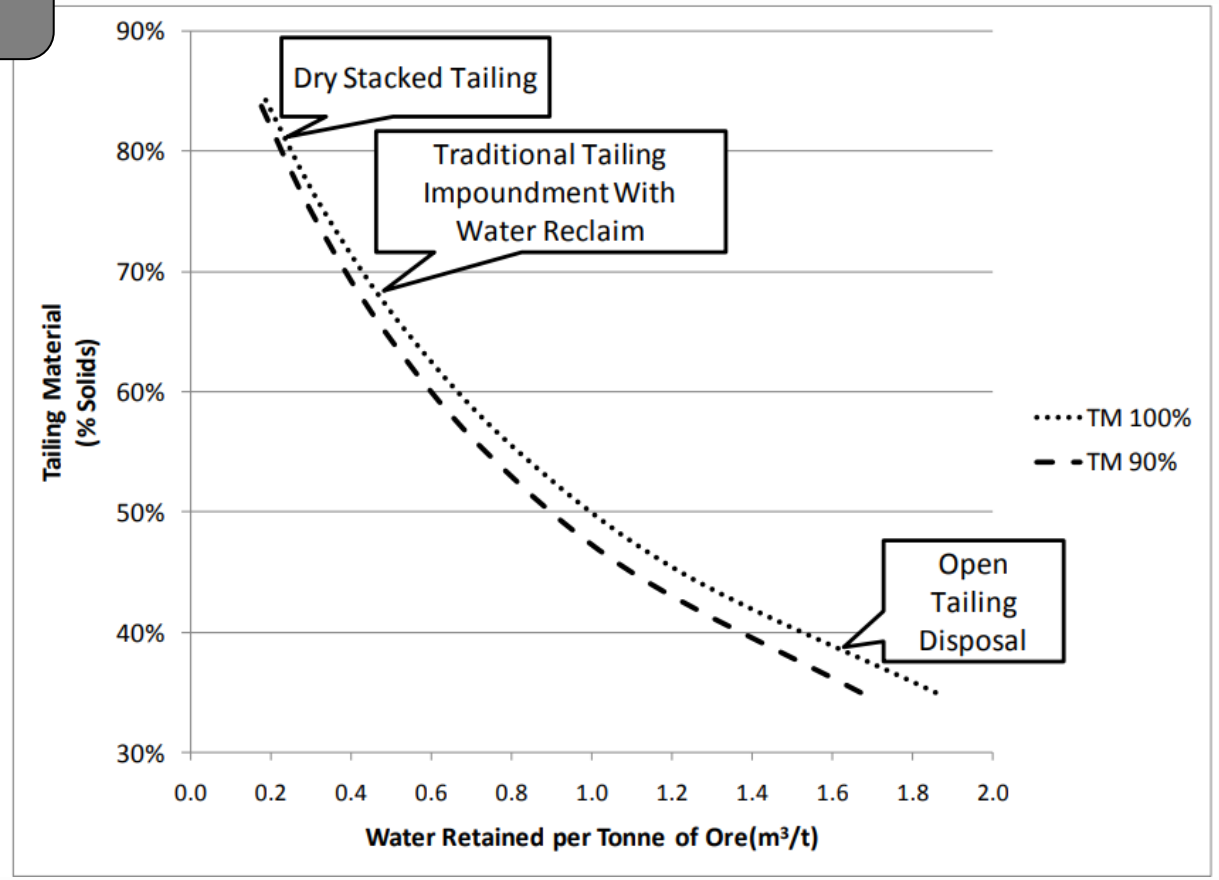


**Figura 13.** Contenido de sólidos en los relaves y cantidad de agua retenida en el TSF

RelaveNet
A Community of Excellence

# CONSIDERACIONES PARA INFILTRACIÓN EN TSF

**Tabla 3.** Escenarios de reducción de agua

| Escenario | Descripción | % de sólidos en relaves | Agua fresca requerida ($m^3$/d) | Makeup water ($m^3$/t mineral) | % Reducción respecto al caso base |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Convencional | Operación base, relaves convencionales | 35 % | 77.928 | 1,30 | 0 % |
| 2. Relaves espesados | Espesamiento al 55 % sólidos; recirculación desde el TSF | 55 % | 46.440 | 0,77 | 40,8 % |
| 3. Relaves en pasta | Espesamiento al 70 % sólidos; mínima superficie mojada | 70 % | 24.096 | 0,40 | 69,2 % |
| 4. Relaves filtrados | Filtrado al 88 % sólidos; disposición en seco | 88 % | 7.536 | 0,13 | 90,0 % |

**Tabla 4.** Resumen de escenarios de uso de agua

| Escenario | Descripción | % de sólidos en relaves | Agua fresca requerida ($m^3$/d) | Makeup water ($m^3$/t mineral) | % Reducción respecto al caso base |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Convencional | Operación base, relaves convencionales | 35 % | 77.928 | 1,30 | 0 % |
| 2. Relaves espesados | Espesamiento al 55 % sólidos; recirculación desde el TSF | 55 % | 46.440 | 0,77 | 40,8 % |
| 3. Relaves en pasta | Espesamiento al 70 % sólidos; mínima superficie mojada | 70 % | 24.096 | 0,40 | 69,2 % |
| 4. Relaves filtrados | Filtrado al 88 % sólidos; disposición en seco | 88 % | 7.536 | 0,13 | 90,0 % |

RelaveNet
A Community of Excellence

# CONSIDERACIONES PARA INFILTRACIÓN EN TSF

**Tabla 5.** Prácticas recomendadas para reducir pérdidas de agua por evaporación e infiltración en TSF

| Fuente de pérdida | Mecanismo principal | Consecuencias | Prácticas recomendadas | Impacto esperado |
|---|---|---|---|---|
| **Evaporación** | Exposición de playas y lagunas con agua libre | Alta pérdida de agua en climas áridos; mayor makeup water | - Espesamiento (55–70 % sólidos)- Relaves en pasta (>70 %)- Relaves filtrados (>80 %, disposición en seco)- Sectorización de playas y control de pond | Reducción hasta 90 % de evaporación; mayor recirculación de agua |
| **Infiltración (Seepage)** | Percolación hacia el subsuelo por alta permeabilidad | Contaminación de acuíferos, pérdida de recurso y riesgo de inestabilidad | - Geomembranas y GCLs- Drenes de base y cutoff walls- Monitoreo piezométrico e hidroquímico- Aprovechar consolidación natural de relaves | Seepage reducido a niveles mínimos; protección de aguas subterráneas |
| **Agua entrampada en relaves** | Retención de humedad en poros y partículas | Pérdida de agua no recuperada; mayor makeup | - Espesamiento y filtrado previo a disposición- Sistemas de dewatering (HC-HVS, filtros prensa, discos, bandas) | Recuperación de 40–90 % del agua; menor makeup (0,13–0,40 $m^3/t$) |
| **Gestión operativa** | Falta de control y monitoreo | Ineficiencia hídrica; riesgo de fallas | - Estaciones Surface Renewal (evap.)- Modelos hidrogeológicos (Keller)- Balance hídrico probabilístico (Gunson, Morrison)- Mantenimiento de drenes y pond control | Decisiones basadas en datos reales; reducción de incertidumbre y riesgos |
| **Valor estratégico** | Uso ineficiente del agua | Alta dependencia de fuentes externas y conflicto social | - Integrar prácticas tecnológicas + operacionales- Priorizar eficiencia hídrica en diseño y operación | Menor consumo de agua fresca; mayor sostenibilidad y licencia social |

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 3 – Tema 2

# Prácticas recomendadas para la gestión del agua en TSF: Reducción de pérdidas de agua por evaporación e infiltración


- **Ing. Danny Flores Cruz**


RelaveNet
A Community of Excellence