Módulo 4 – Tema 3 –

Estrategias para minimizar la filtración y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de las TSF.

- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence

Cómo se mueve el agua y por dónde se filtra en una Instalación de Almacenamiento de Relaves (TSF)

La filtración se define como el movimiento de agua de proceso (agua que ha estado en contacto con los relaves mineros) a través y alrededor del terraplén o muro de la TSF.

El principal objetivo del control de la filtración, que se estudia desde las etapas de ingeniería de la TSF, es mantener la estabilidad segura del muro al disminuir la línea freática (o línea superior de corriente)

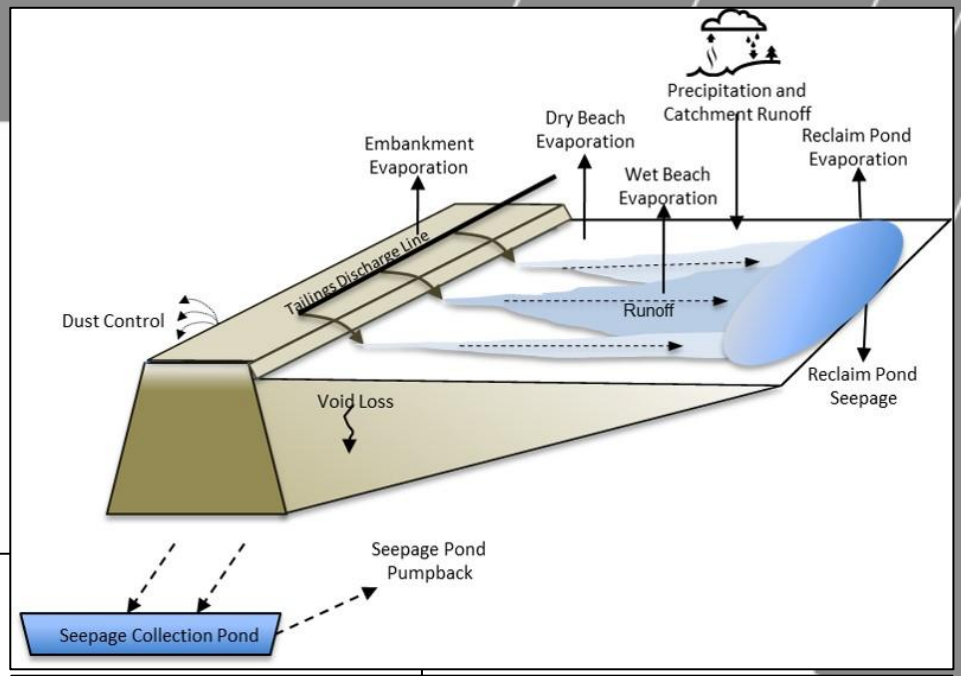


Figura 1. Esquema del balance hídrico de una instalación de almacenamiento de relaves

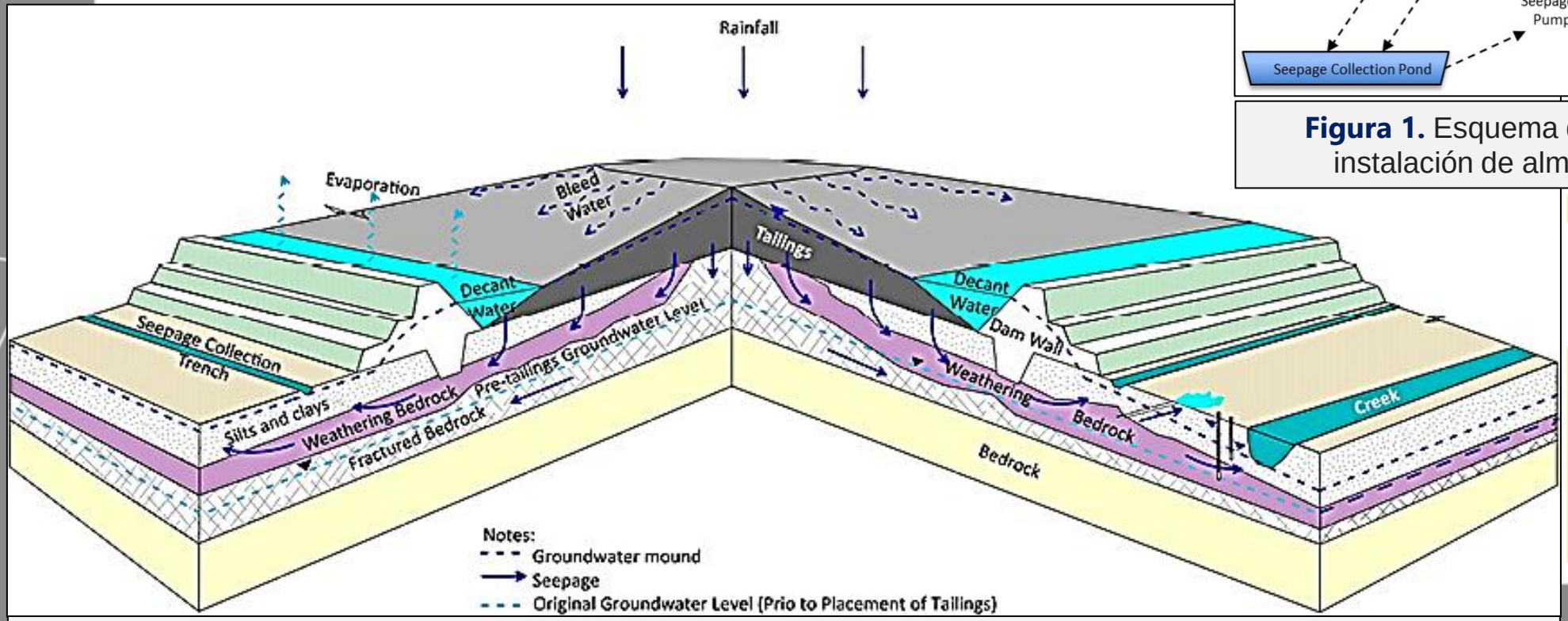


Figura 1. Modelo conceptual de flujo y filtraciones en una TSF (corte transversal).

Factores que afectan el flujo y la ruta de la filtración

- Características de la TSF
- Zona No Saturada
- Profundidad del Acuífero
- Condiciones Kársticas
- Características de los Relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

Gestión operacional del agua: laguna, playa, drenaje y recuperación

Tabla 1. Gestión operacional del agua y estrategias para minimizar la filtración

Eje / Componente	Objetivo	Prácticas clave	Parámetros y umbrales de control	Monitoreo y evidencia	Respuesta ante desviaciones
Laguna de agua clara y playa de relaves	Bajar la línea freática y la carga hidráulica; reducir filtración hacia el muro	Mantener la laguna alejada del muro; asegurar revancha (borde libre) adecuada; formar y sostener playa seca extensa	Revancha mínima (por ejemplo, ≥ 2 m); distancia mínima a muro (por ejemplo, ≥ 500 m cuando el muro no fue diseñado para retener agua); **longitud mínima de playa** definida por objetivos de desempeño	Levantamiento de posición, distancia, tamaño, forma y batimetría de la laguna; verificación diaria de la longitud de playa	Si la playa está por debajo del mínimo o la laguna se acerca al muro por más de dos semanas, **reubicar descargas**, bajar el nivel de la laguna, redistribuir depositación y activar plan de respuesta escalonado
Drenes de pie de presa y filtros	Conducir la filtración inevitable y proteger contra erosión interna	Drenes bajo el muro y filtros manta aguas abajo; limpieza y mantenimiento planificado	Capacidad hidráulica libre; gradiente controlado; criterios de filtración y granulometría conforme al diseño	**Caudal y turbidez** en salidas de dren; inspección visual de humedad en talud; piezometría	Si hay turbidez inusual o caída de caudal por obstrucción, ejecutar **mantenimiento correctivo inmediato** y evaluar estabilidad; si se confirma erosión interna, bajar la laguna y reforzar drenaje
Recuperación y recirculación de agua	Maximizar agua de proceso recuperada; reducir demanda externa	Torres de captación, bombeo superficial o sifoneo desde laguna; captación de filtraciones en drenes, zanjas y pozos	Metas de porcentaje de recirculación; balance diario de volúmenes recuperados	Medición de caudales de recuperación y retorno a planta	Si cae la recirculación, optimizar captación y revisar pérdidas; priorizar recuperación por su **costo muy inferior** al suministro externo (referencia: ~0,41 USD/m³ frente a ~4,1 USD/m³ para desalinización)
Deshidratación y clasificación en origen	Reducir el agua que ingresa al depósito (control de fuente)	Ciclones, espesadores y filtros prensa; centrifugado y secado cuando aplique	Operar ciclones a presión óptima (por ejemplo, hasta ~150 kPa); metas de sólidos en subflujo y humedad en torta	Ensayos de humedad; densidad de pulpa; rendimiento de filtros	Si la humedad supera el objetivo, ajustar presión, dosificación y tiempos de ciclo; priorizar **apilamiento en seco** cuando sea técnica y económicamente viable
Modelación del balance hídrico y optimización	Definir niveles seguros de laguna y ventanas de mitigación; cuantificar pérdidas	Modelo integral que incluya precipitación, evaporación, infiltración, recirculación y depositación	Niveles objetivo de laguna; superficie de playa y laguna; metas de recuperación	Validación con mediciones reales; **cuantificación de evaporación** (idealmente con tecnología satelital) e infiltración	Si las pérdidas por evaporación (a menudo > 40 % del total) o infiltración crecen, **ajustar operación**: reducir espejo de agua, ampliar playa, reprogramar depositación y reforzar recuperación
Gobernanza, controles críticos y respuesta	Asegurar disciplina operativa y decisiones basadas en evidencia	Sistema de manejo de relaves con **Manual de operación, mantenimiento y monitoreo** específico del sitio	Controles críticos definidos (operacionales, de ingeniería y de monitoreo) con **indicadores medibles** y umbrales	Piezómetros, pozos de monitoreo, sentinas de drenes; inspección visual y registros trazables	Cuando un indicador sale del rango esperado, activar **Plan de respuesta a acción o comportamiento crítico** con niveles (verde, amarillo, naranja, rojo) y medidas predefinidas

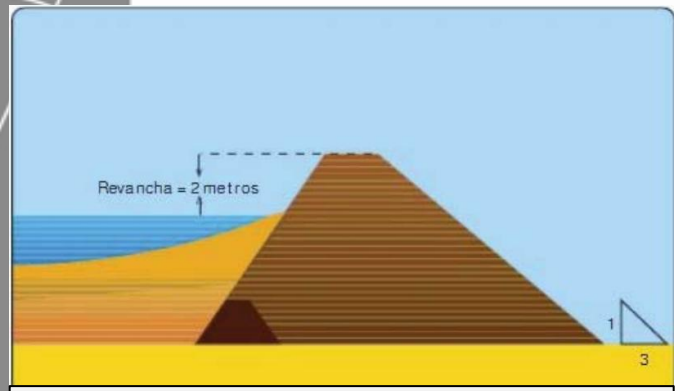


Figura 2. Revancha (bordo libre) del Muro y riesgo de inestabilidad debido a la proximidad de la laguna al muro

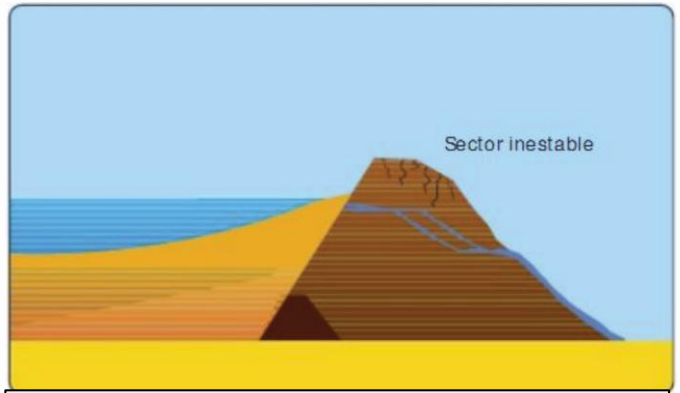


Figura 3. Riesgo de la laguna cerca del muro

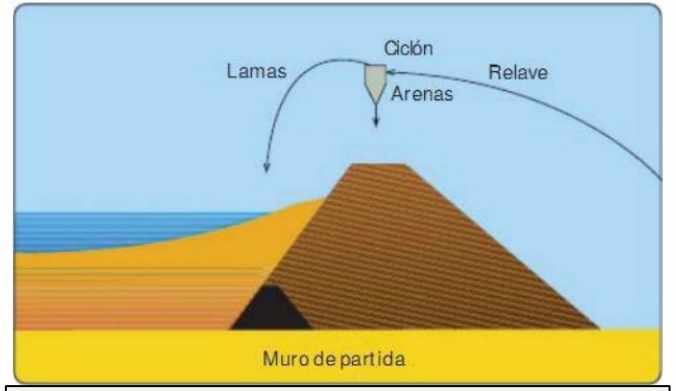


Figura 4. Ciclonaje en el muro del tranque

RelaveNet
A Community of Excellence

Barreras pasivas de baja permeabilidad: geomembranas, GCL/CCL y obras de fundación

Tabla 2. Barreras de baja permeabilidad (pasivas) para minimizar la filtración

Estrategia / Componente	Ubicación típica y objetivo	Materiales y parámetros clave	Ventajas principales	Limitaciones y compatibilidad	Control de calidad y pruebas
Geomembranas poliméricas (polietileno de alta densidad, polietileno lineal de baja densidad, policloruro de vinilo) y **geomembrana bituminosa**	Cara aguas arriba de la presa, fondo del embalse y superficies de roca expuesta; contener y desviar la filtración	Polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), policloruro de vinilo (PVC), geomembrana bituminosa (BGM). Permeabilidad del polímero intacto del orden de 10^{-14} a 10^{-17} m/s. Las fugas provienen de **defectos**	Alta estanqueidad, instalación rápida, resistencia química; LLDPE más flexible ante asentamientos; PVC muy manejable (menos costuras); BGM con alta resistencia a punción y desempeño a baja temperatura	Requieren subrasante bien preparada y **contacto íntimo**; vulnerables a daños puntuales y arrugas; deben combinarse con drenaje aguas abajo	Uniones por termosoldadura con **doble pista** y canal de aire para prueba no destructiva; pruebas no destructivas (caja de vacío, aire a presión) y destructivas; reparación con cordón de extrusión o parches del mismo polímero
Revestimiento de suelo compactado (CCL)	Base del vaso y canales; limitar percolación hacia fundación	Suelos arcillosos (puede incluir bentonita). Conductividad hidráulica típica ≤ 10^{-6} a 10^{-7} cm/s (≈10^{-8} a 10^{-9} m/s)	Uso de materiales locales; buen control si está bien compactado	Sensible a secado, agrietamiento y compatibilidad química; puede requerir grandes espesores	Control de compactación (humedad, energía), ensayos de permeabilidad y compatibilidad química
Revestimiento geosintético de arcilla (GCL)	Base del vaso y capas intermedias; alternativa o complemento al suelo compactado	Bentonita entre dos geotextiles; requiere hidratación adecuada y confinamiento	Baja permeabilidad con menor espesor y rápida instalación	**Baja resistencia al corte** si no está confinado; sensible a intercambio catiónico y a hidratación deficiente	Verificar masa de bentonita, hidratación previa, continuidad y confinamiento; ensayos de permeabilidad
Sistema compuesto (geomembrana + CCL o GCL)	Base y talud aguas arriba; **barrera principal**	Geomembrana en **contacto íntimo** con CCL o GCL; evitar capas drenantes intermedias o arrugas	**Mucho más efectivo** que capas simples; el sustrato "amortigua" fugas en defectos	La acción compuesta se **anula** si hay arrugas, separación o una capa drenante entre estratos	Control de planicidad, eliminación de arrugas, pruebas de continuidad; percolaciones reportadas tan bajas como ~2 mm/año con GCL laminado
Zanja de corte (cutoff trench)	Bajo el eje de la presa en suelos finos; cortar caminos preferentes	Excavación 1,5–6,0 m de profundidad hasta material de baja conductividad; puede requerir bombeo en construcción	Solución simple y eficaz en suelos finos; costo moderado	**No apta** para roca fracturada; limitada por profundidad y napa	Control de alineamiento, sellado y continuidad; monitoreo de caudales interceptados
Muro pantalla de concreto plástico (plastic concrete slurry wall)	Bajo el eje en suelos finos o saturados; crear barrera vertical	Profundidad típica ~12 m; conductividad hidráulica hasta ~10^{-7} cm/s	Barrera continua y durable en suelos finos	**No adecuada** para roca madre fracturada; requiere control estricto de mezcla	Ensayos de abatimiento, resistencia y permeabilidad; verificación de verticalidad y unión a capas de baja k
Cortina de inyecciones (grout curtain)	En roca fracturada bajo la presa	Lechadas de cemento, silicato o resinas; profundidades hasta ~30 m; permeabilidades hasta ~10^{-8} cm/s	Sella fisuras en macizos rocosos; adaptable en profundidad	Eficacia depende del **mapeo de fracturas**; puede requerir campañas sucesivas	Ensayos Lugeon, control de consumos y rechazos; verificación postinyección
Compatibilidad con el método constructivo	Inserción bajo aguas abajo o eje central; integración con drenajes y recolección	—	Integrables con presas construidas **aguas abajo** y **eje central**	**No compatibles** con presas de construcción **aguas arriba**	Diseñar siempre con **sistemas de recolección de filtraciones** para evitar "embalsamiento"
Aseguramiento y control de calidad en soldaduras e instalación	Toda la obra geosintética	Plan de Control y Aseguramiento de Calidad de Fabricación y Construcción; pruebas de todas las costuras y reparaciones	Reduce fugas por defectos; desempeño a largo plazo	Requiere supervisión especializada y trazabilidad	Pruebas no destructivas en **100 %** de costuras; destructivas por lotes; atención especial a **penetraciones** y uniones a concreto y acero



Figura 5. Ejemplo de uso de revestimiento geosintético en la zona de una TSF en contacto con roca

RelaveNet
A Community of Excellence

Drenaje y control de presiones: filtros y drenes para un talud seco y estable

Tabla 3. Drenaje y control de presiones en instalaciones de almacenamiento de relaves

Componente o estrategia	Objetivo principal	Ubicación típica	Criterios de diseño clave	Riesgos que mitiga	Monitoreo y mantenimiento
Sistema integral de drenaje	Deprimir la línea freática y controlar rutas de filtración	En el muro de contención, la fundación y el depósito de relaves	Integración de drenajes internos y de base con filtros compatibles y caminos de recolección	Inestabilidad de taludes por presiones de poro elevadas; erosión interna	Inspección periódica, medición de caudales, turbidez y niveles hidráulicos
Dren de base o manto filtrante	Mantener seco el talud aguas abajo y descargar filtraciones internas	A lo largo del talud aguas abajo del muro	Material filtrante bien graduado; continuidad, espesor y pendiente hacia puntos de descarga	Pérdida de estabilidad del terraplén; sifonamiento	Verificar caudal estable y baja turbidez; limpieza si hay colmatación
Dren chimenea (vertical)	Acelerar el descenso del nivel freático dentro del cuerpo del muro	Núcleo interno del muro, conectado a dren de base	Transición filtrante compatible con materiales del muro; continuidad hasta el manto	Presiones de poro elevadas y gradientes internos	Instrumentación de niveles de agua; inspección de desempeño
Dren de pie del muro	Interceptar y conducir la filtración bajo el muro	En la base del talud aguas abajo	Sección y permeabilidad suficientes; accesos para limpieza	Talud húmedo, gradientes altos y erosión en el pie	Es un control crítico: limpiar ante obstrucción; registrar caudal y turbidez
Filtros bien graduados	Evitar arrastre de finos y erosión interna	En contacto con relaves, materiales del muro y drenes	Compatibilidad granulométrica y criterio de retención; continuidad sin ventanas	Piping, socavación interna, pérdida de función del dren	Turbidez como indicador temprano; reemplazo/localizado si falla
Trincheras y pozas de recuperación	Captar y almacenar filtraciones para recirculación	Al pie del muro y en la cuenca de influencia	Red de zanjas colectoras y conductoras con geotextil y grava; cámaras y bombeo	Migración no controlada de filtraciones; pérdidas de agua útil	Medición de niveles y caudales; retorno confiable a planta de proceso
Instrumentación hidrogeotécnica	Verificar que el nivel freático y presiones estén bajo control	Piezómetros, pozos de monitoreo, puntos de muestreo	Red representativa por zonas; series temporales y umbrales	Cambios no detectados en régimen de flujo	Calibración, mantenimiento y análisis de tendencias
Programa de mantenimiento	Evitar colmatación y pérdida de funcionalidad	Todos los drenajes y filtros	Rutinas preventivas y correctivas según desempeño	Falla súbita de controles críticos	Planes de acción escalonados y trazabilidad de intervenciones

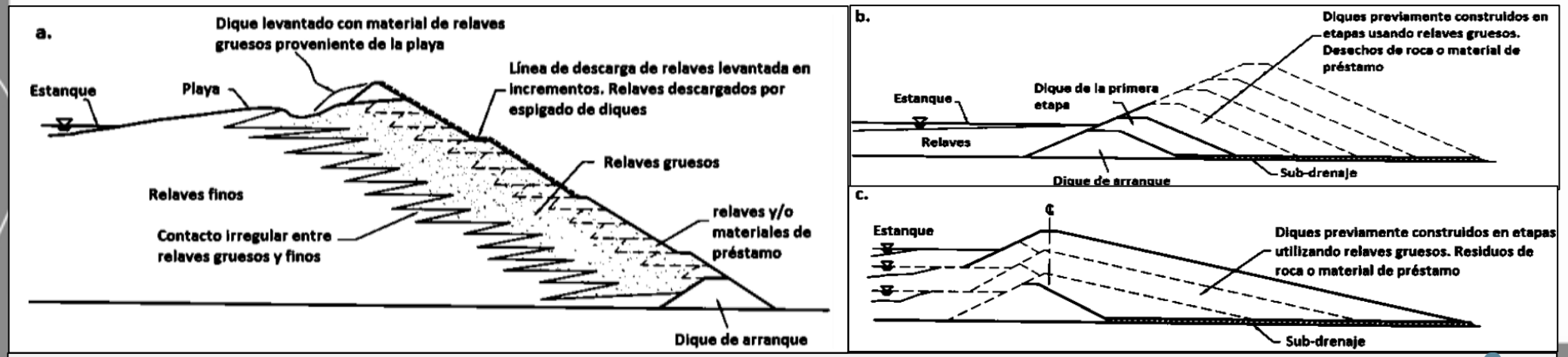


Figura 6. Métodos de construcción, a) aguas arriba, b) aguas abajo, y c) eje central

RelaveNet
A Community of Excellence

Barreras hidráulicas activas y verificación de desempeño: captura, retorno y piezometría

Tabla 4. Barreras hidráulicas activas y verificación de desempeño

Estrategia o componente	Propósito central	Diseño y ubicación típica	Parámetros de dimensionamiento y operación	Indicadores de desempeño a vigilar	Instrumentación y verificación	Riesgos que mitiga	Respuesta y mantenimiento
Pozos de bombeo en barrera	Interceptar la filtración aguas abajo y deprimir el nivel freático	Baterías de pozos alineadas aguas abajo del muro de la instalación de almacenamiento de relaves	Caudal total superior al flujo de infiltración estimado; por ejemplo, siete pozos entre cuarenta y dos y setenta y ocho metros de profundidad con sesenta y siete litros por segundo de capacidad total frente a veinticinco litros por segundo de infiltración	Caudal bombeado estable, cono de abatimiento adecuado, descenso sostenido del nivel freático	Medidores de caudal, registro continuo de niveles de agua, curvas de abatimiento	Inestabilidad de taludes por niveles freáticos altos; migración de penachos de contaminantes	Ensayos de bombeo periódicos, rehabilitación de pozos, limpieza y control de arenas
Drenes subterráneos y estanques de recolección	Captar filtraciones y conducirlas a puntos de bombeo	Red de drenes enterrados y cámaras de recolección al pie del muro	Sección hidráulica suficiente; pendientes hacia cámaras; protección con geotextiles	Caudal captado y claridad del agua; ausencia de reboses	Inspecciones visuales, medición de niveles en cámaras	Pérdida de agua útil; descarga no controlada	Limpieza para evitar colmatación; reposición de material filtrante
Retorno y recirculación a proceso	Aprovechar el agua recuperada y cerrar el circuito	Impulsión desde sentinas hacia el depósito o la planta	Confiabilidad de bombas y tuberías; calidad del agua recuperada	Porcentaje de agua recuperada frente a consumo de agua fresca	Contadores de volumen, análisis de calidad, balances hídricos	Consumo excesivo de agua fresca; costos elevados	Mantenimiento preventivo de bombas y líneas; planes de contingencia
Piezometría (piezómetros de cuerda vibrante)	Verificar presiones de poro y niveles de agua	Aguas arriba, dentro del muro y aguas abajo	Red representativa por estratos y distancias; registro continuo	Tendencias de presión de poro y nivel freático; respuesta a eventos	Descargas de datos, validación y análisis de tendencias	Cambios no detectados en régimen de flujo	Calibración, respaldo de datos y reemplazo programado
Pozos de observación de aguas subterráneas	Medir niveles manualmente y muestrear calidad	Secciones aguas arriba y aguas abajo del depósito	Profundidad y filtros según acuífero objetivo	Nivel estático, gradiente hidráulico, química del agua	Sondas eléctricas, muestreos con cadena de custodia	Pluma de contaminación no detectada	Desarrollo y purga adecuados; control de integridad
Medición de caudales de filtración	Validar captura y comparar con estimaciones	En drenes, cámaras y líneas de retorno	Medidores adecuados al rango de caudales	Caudales anómalos frente a series históricas	Medidores de caudal, aforos, registro en tiempo real	Subcaptura de filtración; excedencia del diseño	Revisión de capacidad e incorporación de pozos o drenes
Monitoreo de calidad (turbidez, sulfatos, cloruros y otros)	Comprobar que no hay degradación ambiental	En filtraciones, laguna, pozos y descargas	Plan de muestreo y laboratorio con métodos validados	Turbidez, sólidos en suspensión, iones mayoritarios y trazas	Turbidímetro en campo; análisis de laboratorio	Erosión interna (piping); contaminación química	Acciones correctivas según planes de respuesta escalonados
Tecnologías no intrusivas (por ejemplo, método geofísico electromagnético transitorio de muy alta resolución conocido como NANOTEM)	Detectar cambios en el subsuelo sin excavación	Perfiles en superficie sobre zonas críticas	Mallas de medición y repetición temporal	Anomalías de resistividad asociadas a humedad	Adquisición y procesamiento geofísico especializado	Vías de fuga ocultas	Campañas recurrentes y contraste con piezometría

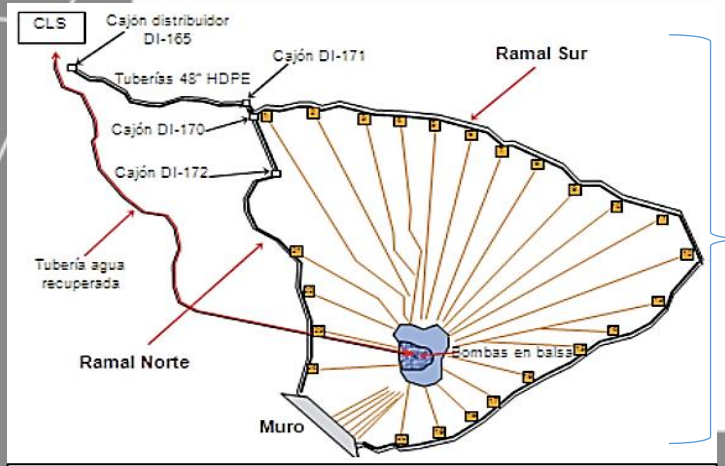


Figura 7. Diagrama Tranque de Relaves (ej. Laguna Seca)

En el tranque de Relaves Laguna Seca:
Existe una serie de controles en el tranque de relaves para cumplir con la normativa ambiental, los cuales buscan el control de la infiltración de aguas hacia napas subterráneas, el control de la laguna respecto al muro y ver la calidad de las aguas. El decreto regulador más importante es el Decreto N°86/60 regulado por el SERNAGEOMIN. Para el control de la infiltración se utiliza una "batería de pozos", la cual se encuentra aguas abajo del muro del depósito de relaves con el fin de interceptar el flujo de infiltraciones generado por la poza de decantación.

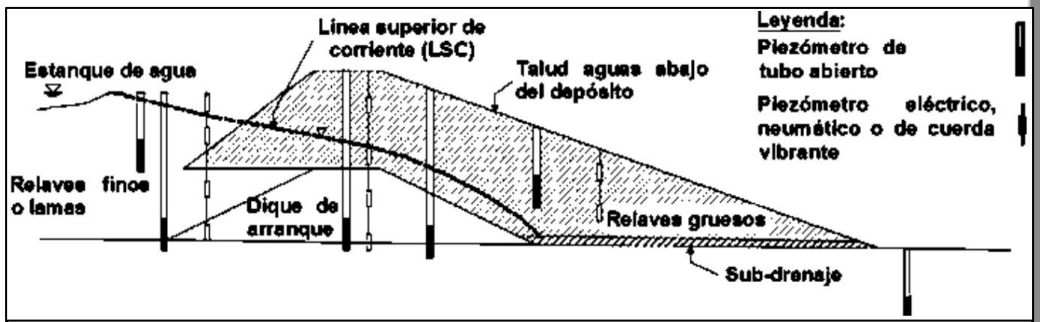


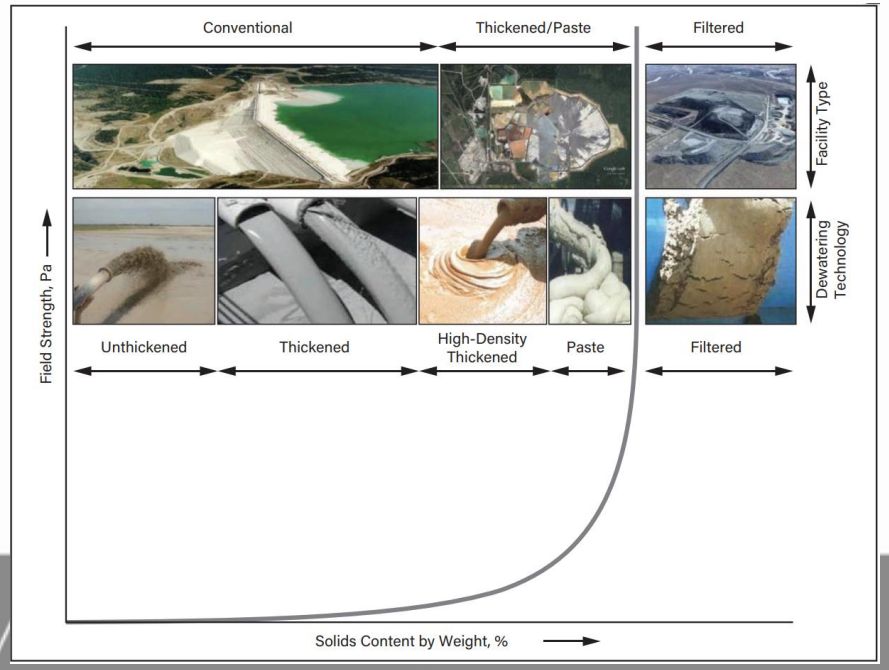
Figura 8. Sección de un esquema de monitoreo piezométrico en un depósito construido con el método del eje central

RelaveNet
A Community of Excellence

Deshidratación en el origen: espesamiento, relaves en pasta, filtración y centrifugación

Tabla 5. Deshidratación de relaves para minimizar la filtración

Tecnología	Objetivo y principio	Equipo principal	Contenido de sólidos por peso (Cw) y resistencia a la fluencia	Recuperación de agua típica	Impacto en filtración y estabilidad	Sensibilidades y notas operativas
Espesamiento (relaves espesados)	Concentrar la pulpa por gravedad para elevar Cw antes del transporte y la depositación	Espesadores convencionales y de alta tasa	Cw ≈ sesenta a setenta por ciento; resistencia ≈ veinte a cien pascales	Puede remover hasta setenta por ciento del agua de proceso; rebose prístino	Menor volumen de agua a la Instalación de Almacenamiento de Relaves; reducción moderada de filtración	Paso previo esencial a la filtración; desempeño sensible a la granulometría y a los floculantes
Relaves en pasta	Incrementar densidad con presión hidrostática adicional (tanque alto, cono profundo)	Espesadores de pasta (cono profundo)	Cw ≈ setenta a ochenta y cinco por ciento (a veces ochenta a noventa); resistencia ≈ cien a ochocientos pascales	Aumenta significativamente la recuperación de agua; casos reportan setenta por ciento en circuitos de lavado	Disminuye percolación; mejora estabilidad por menor nivel freático interno	Requiere control de reología y bombeo; trazado de depositación para mantener playas
Filtración y apilamiento en seco	Forzar el paso a través de un medio poroso por presión o vacío	Filtros prensa de placas, filtros de banda, filtros de vacío	Cw > ochenta y cinco por ciento (frecuente > noventa); resistencia > ochocientos pascales	Recuperación de agua del orden de ochenta y cinco a noventa por ciento	Mínimo drenaje de tortas; estructura autosoportante; fuerte reducción del riesgo geotécnico y de la huella	Requiere logística de transporte, extendido y compactación; control de polvo con supresores; gestión de telas filtrantes
Centrifugación	Separar por diferencias de densidad usando aceleración centrífuga	Centrífugas decantadoras	Cw alto (variable según mineralogía); resistencia elevada	Casos reportan recuperación de hasta noventa por ciento del agua procesada	Reduce notablemente el agua que llega a la Instalación de Almacenamiento de Relaves; similar efecto que filtración en minimización de percolación	Alta tasa de tratamiento y operación continua; menor propensión a obstrucción que filtración; sensible a finos y arcillas



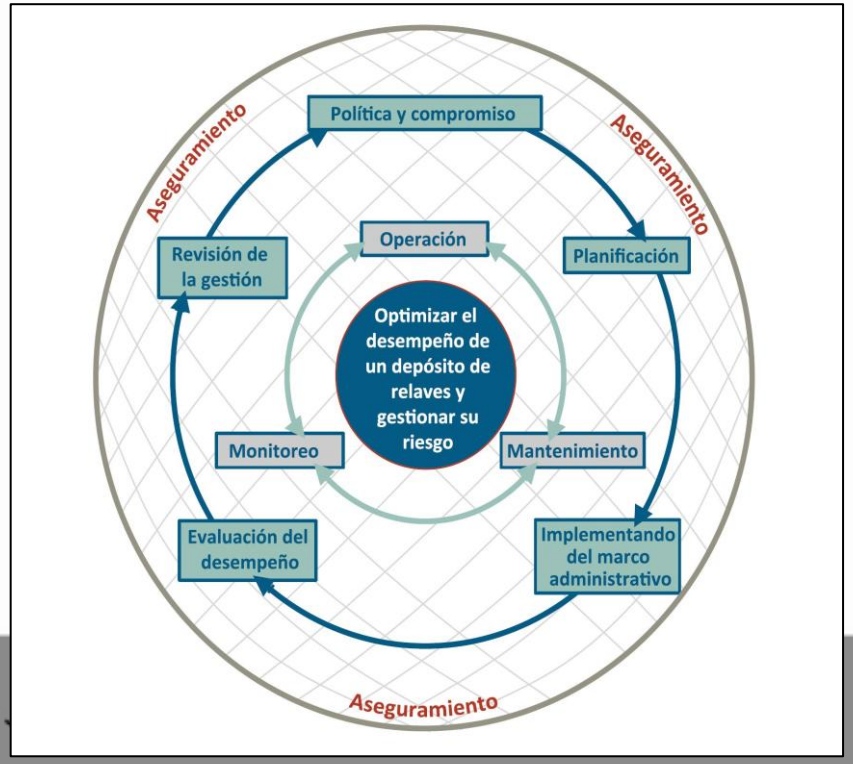
El continuo de relaves deshidratados varía desde lodos convencionales (fluido, ~25-40% de sólidos) hasta relaves espesados (~40-65% de sólidos), relaves en pasta (~65-80% de sólidos) y relaves filtrados (apilados en seco) (>80% de sólidos), cada uno de los cuales requiere diferentes instalaciones de almacenamiento. La lechada convencional se almacena en instalaciones de relaves convencionales, los relaves espesados en espesadores de alta densidad o alta capacidad, la pasta en instalaciones de relaves de pasta o tanques especializados, y los relaves filtrados en instalaciones de pila seca.

RelaveNet
A Community of Excellence

Sistema de manejo: Manual de Operación, Mantenimiento y Monitoreo (OMS) y Plan de Respuesta a Acción o Comportamiento Crítico (TARP)

Tabla 6. Gestión proactiva con Manual de Operación, Mantenimiento y Monitoreo y Plan de Respuesta a Acción o Comportamiento Crítico

Componente	¿Qué es?	Objetivo principal	Controles y métricas clave (filtración y estabilidad)	Umbrales y respuestas	Responsables y frecuencia	Evidencias y registro
Manual de Operación, Mantenimiento y Monitoreo	Documento específico del sitio que guía la operación diaria, el mantenimiento y el monitoreo	Operar conforme a la intención de diseño, cumplir requisitos legales y reducir el riesgo	Longitud mínima de la playa de relaves; borde libre y distancia de la laguna de agua clara al muro; niveles piezométricos; caudal y turbidez de filtraciones; funcionalidad de drenajes de pie de presa y mantos filtrantes; disponibilidad y calibración de instrumentación	Define objetivos de desempeño, límites operacionales y acciones ante desvíos	Operación, mantenimiento, monitoreo, Ingeniería y medio ambiente; frecuencias diarias, semanales, mensuales y campañas especiales	Bitácoras operativas, reportes de inspección, hojas de datos de instrumentos, partes de mantenimiento, reportes de laboratorio
Plan de Respuesta a Acción o Comportamiento Crítico	Mecanismo que vincula resultados de monitoreo con acciones predefinidas	Evitar pérdida de control y escalar respuestas proporcionalmente al riesgo	Umbrales por indicador: por ejemplo, distancia mínima de laguna al muro, límites de caudal y turbidez de filtración, niveles piezométricos admisibles, disponibilidad de drenajes	Verde: en rango; Amarillo: aumentar frecuencia de monitoreo y ajustes menores; Naranja: medidas correctivas y apoyo del Ingeniero de Registro; Rojo: detener actividades en el área y activar el Plan de Respuesta a Emergencias	Jefatura operativa y de geotecnia, Ingeniero de Registro, medio ambiente; revisión en cada evento y en comités de riesgo	Actas de activación, evidencia fotográfica, curvas tiempo–historial, trazabilidad de decisiones
Gestión del cambio	Proceso formal para introducir y controlar cambios	Mantener el perfil de riesgo dentro de tolerancias y evitar la complacencia	Actualización de objetivos y controles críticos; revalidación de supuestos de diseño; reconfiguración de instrumentación	Cambios se aprueban con análisis de riesgo; revisión anual como buena práctica	Dirección del depósito, Ingeniería y operación; revisión programada y ad hoc	Versionado del manual, matriz de decisiones, auditorías internas



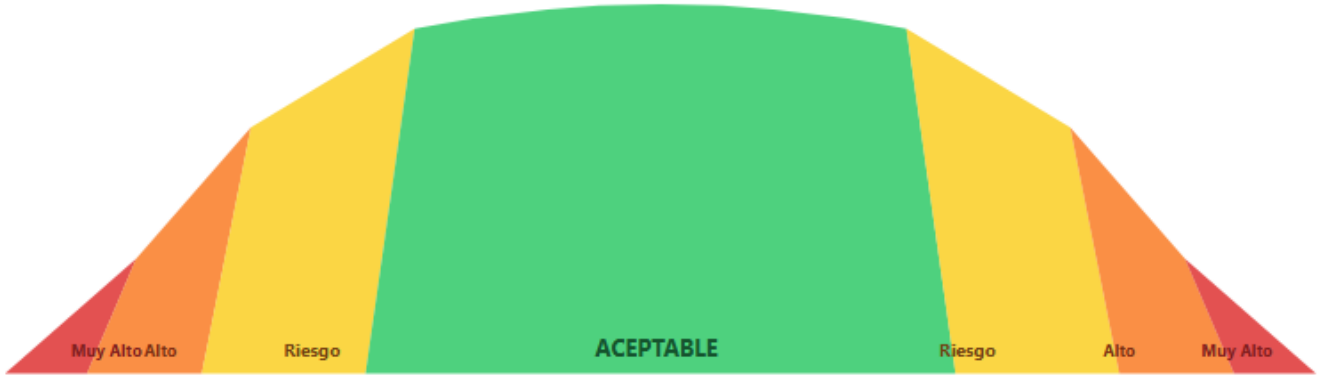
RelaveNet
A Community of Excellence

Sistema TARP - Control de Filtraciones

Trigger Action Response Plan para Depósitos de Relaves Mineros

Nota: Los valores mostrados son ejemplos ilustrativos. Los umbrales específicos deben determinarse según las características particulares de cada instalación, considerando condiciones geotécnicas, hidrológicas y operacionales del sitio.

Distribución de Niveles de Riesgo



El desempeño puede ubicarse en extremos de la distribución, requiriendo respuesta inmediata

Parámetros Técnicos de Referencia

Parámetro	Unidad	Aceptable	Riesgo	Alto Riesgo	Muy Alto
Caudal	L/s	< 5	5-10	10-20	> 20
Turbidez	NTU	< 50	50-100	100-200	> 200
Velocidad	cm/s	< 2	2-5	5-10	> 10
Presión Poros	kPa	< 30	30-50	50-80	> 80

** Valores ilustrativos. Deben ajustarse según condiciones específicas del sitio.*

Consideraciones Importantes

- Los sistemas geosintéticos (geomembranas, geotextiles) son elementos críticos en el control de filtraciones
- El monitoreo debe incluir inspección visual de la integridad de geosintéticos y sistemas de drenaje
- Cualquier daño en geomembranas debe ser evaluado y reparado inmediatamente
- Los piezómetros y sistemas de detección de fugas deben estar operativos en todo momento
- El TARP debe revisarse y actualizarse periódicamente según el desempeño del sistema

Situación Aceptable

La filtración es limpia. Se registra filtración en ubicaciones históricas. La velocidad de filtración está dentro de los límites de diseño y el rango de tendencias históricas.

Indicadores:

- Filtración limpia y clara
- Ubicaciones conocidas y monitoreadas
- Velocidad dentro de parámetros de diseño
- Tendencias estables

Situación de Riesgo

La filtración es turbia. Se registra filtración en nuevas áreas y/o ubicación con resultados históricos. La filtración es superior a las tendencias históricas.

Indicadores:

- Filtración turbia o con sedimentos
- Nuevas áreas de filtración detectadas
- Velocidad superior a tendencias históricas
- Cambios en patrones establecidos

Situación de Alto Riesgo

Similar a situación de riesgo, pero con un aumento en la velocidad de filtración actual en comparación con las tendencias históricas.

Indicadores:

- Incremento acelerado en velocidad
- Filtración turbia persistente
- Expansión de áreas afectadas
- Desviación significativa de históricos

Situación de Muy Alto Riesgo

La acumulación o combinación de situaciones moderadas podría dar lugar a una situación de alto riesgo. En este caso, los umbrales de riesgo deben evaluarse en consecuencia.

Indicadores:

- Múltiples indicadores críticos simultáneos
- Incremento exponencial de filtración
- Arrastre visible de material fino
- Signos de tubificación (piping)
- Compromiso de estabilidad estructural

RelaveNet
A Community of Excellence

Cierre por diseño y sostenibilidad a largo plazo: coberturas, estabilidad geoquímica, consolidación y monitoreo post-cierre

Tabla 7. Cierre y sostenibilidad a largo plazo (“Closure by Design”)

Pilar de cierre	Objetivo a largo plazo	Estrategias y criterios clave	Indicadores verificables	Riesgos que mitiga
Coberturas para minimizar infiltración	Reducir al mínimo la percolación hacia los relaves	Coberturas de balance hídrico con evapotranspiración; coberturas multicapa con geomembrana y geosintético de arcilla; capas compactadas de baja permeabilidad con conductividad hidráulica saturada objetivo entre 1×10^{-8} y 1×10^{-7} m/s; ruptura capilar intencional	Espesor efectivo del medio de crecimiento entre 1,5 y 2,0 metros; flujo neto bajo la cobertura próximo a cero en modelación; estabilidad superficial y control de erosión	Infiltración crónica; aumento del nivel freático; activación de drenaje ácido
Estabilidad geoquímica (control de drenaje ácido de mina)	Evitar la oxidación de sulfuros y la liberación de contaminantes	Mantener altos niveles de saturación cerca de la superficie; limitar el acceso de oxígeno; depositación subacuática donde sea aplicable; reclamación progresiva	Grado de saturación objetivo; potencial de oxidación reducido; calidad de agua sin tendencia a acidificación	Generación de drenaje ácido; movilidad de metales
Modelado de consolidación y asentamiento	Garantizar la integridad física de la cobertura y el drenaje superficial	Modelado de consolidación a gran deformación; estimación de asentamientos totales y diferenciales; cronograma de instalación de la cobertura	Curvas de asentamiento versus tiempo; umbrales para reperfilado; pendientes funcionales conservadas	Fisuración de coberturas; encharcamiento; rutas preferenciales de infiltración
Monitoreo y tratamiento post-cierre	Confirmar desempeño y corregir desvíos	Red de monitoreo de estabilidad, filtración y calidad de agua; verificación de barreras físicas; tratamiento pasivo o activo si corresponde	Series de tiempo de niveles piezométricos, caudales y calidad; cumplimiento de límites; operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento	Bypass de filtración; degradación de calidad de agua; pérdida de funcionalidad del sistema

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 4 – Tema 3 –

Estrategias para minimizar la filtración y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de las TSF.

- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence