Módulo 5 – Tema 1 –
Riesgos asociados a eventos climáticos extremos y su influencia en la gestión de recursos hídricos en la minería.

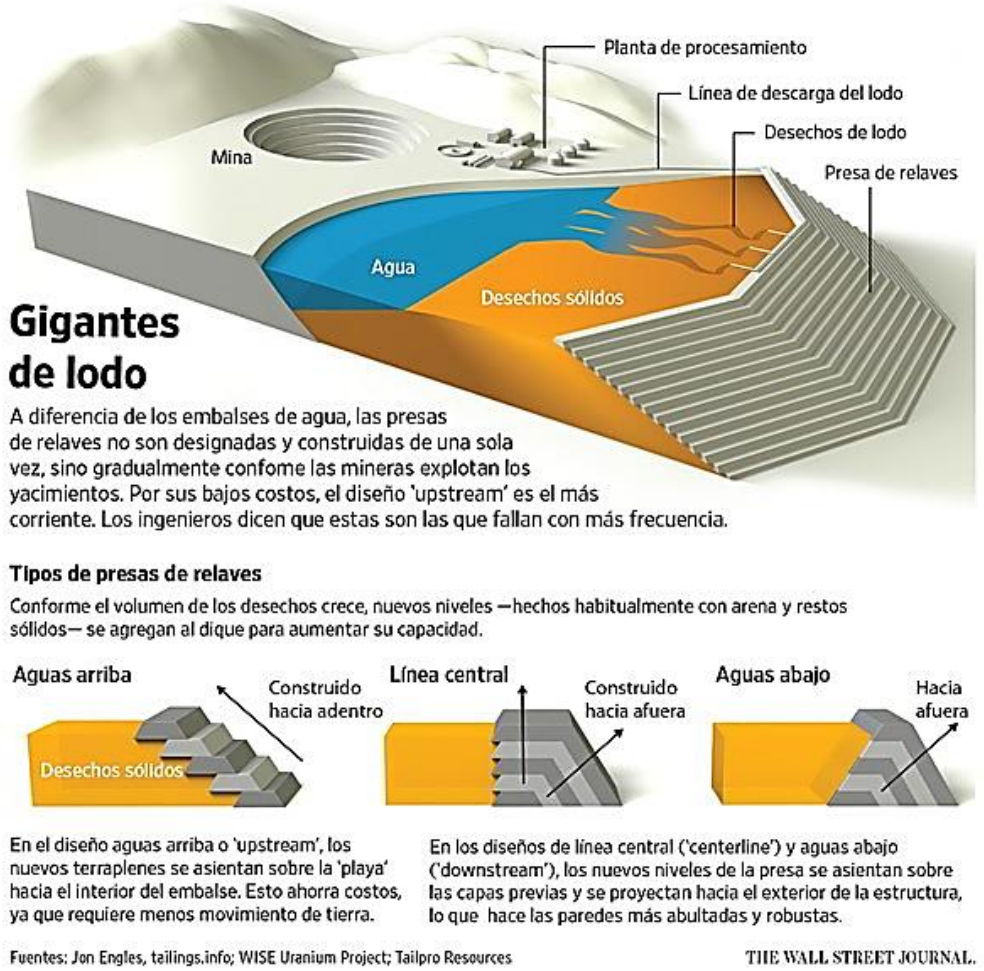
- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence

Introducción



Figura 1. Intensas lluvias que afectan actividad minera (Caso Mina Gerais – Brasil)



Cerca del 25% de las fallas globales de presas de relaves registradas hasta 2022 fueron provocadas por el cambio climático, principalmente debido a fuertes lluvias.

Los eventos meteorológicos causaron la mayoría de las fallas de presas de relaves, siendo los eventos sísmicos la segunda causa más común.

RelaveNet
A Community of Excellence

Relación entre clima, hidrología e hidrogeología en los TSF.

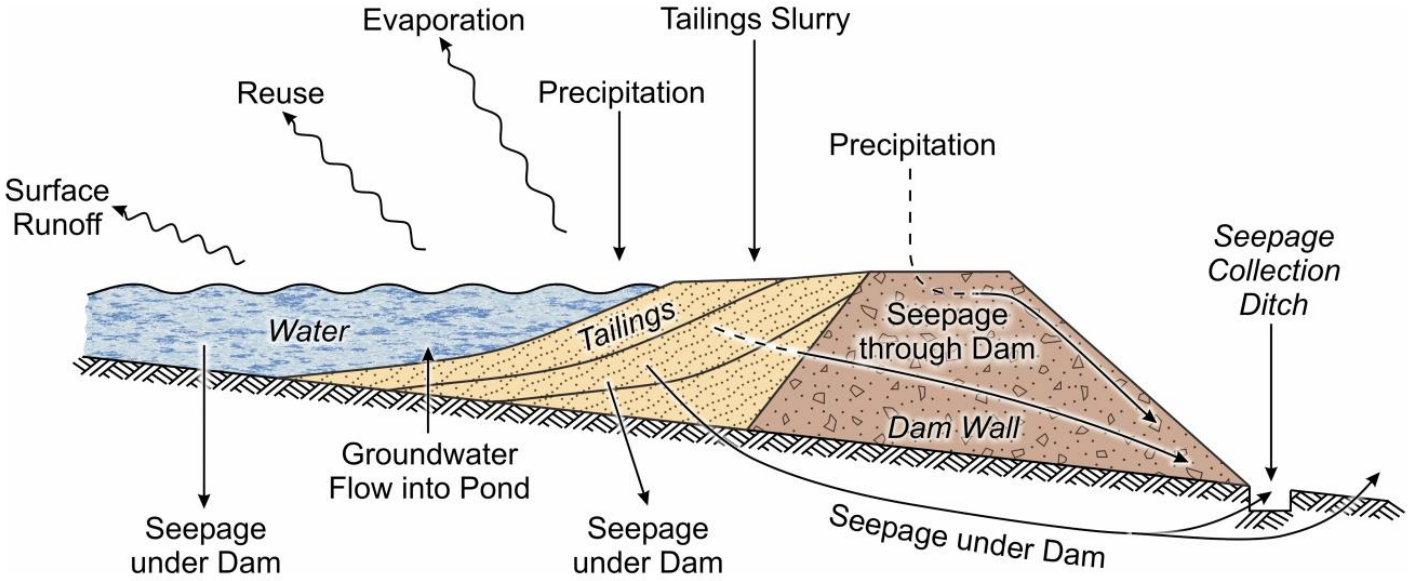


Figura 2. Elementos del balance hídrico en un depósito de relaves (TSF)

El clima define los insumos hídricos: precipitación, temperaturas, variaciones estacionales. Estos insumos determinan cuánta agua ingresa al sistema del depósito.

La hidrología del sitio determina qué parte de esa agua va a escorrentía superficial, cuáles volúmenes infiltran al terreno más profundo, y cómo se distribuye esa agua entre recargas, drenajes y potenciales filtraciones.

La hidrogeología local (permeabilidad del subsuelo, presencia de acuíferos, capas de baja permeabilidad, gradientes hidráulicos) regula la forma en que esa agua infiltrada puede moverse, estabilizarse o causar presiones internas.111



Figura 3. Cerro Vanguardia TSF

RelaveNet
A Community of Excellence

Estadísticas de Fallas

Tabla 1. Probabilidad aproximada de falla (pf) de presas de relaves según conjuntos preliminares de datos históricos

Localización	Periodo (década)	pf (expresión)	pf aproximada
Mundial	Alrededor de 1997	44 / (3 500 × 10)	1×10^{-3}
Mundial	Alrededor de 1999	7 / 35 000	2×10^{-4}
Estados Unidos	Alrededor de 1979 y 1999	7 u 8 / (1 000 × 10)	$7 - 8 \times 10^{-4}$

Tabla 2. Principales causas de fallas de presas de relaves (1900–2019)

Causa principal	Porcentaje estimado (%)	Observaciones técnicas
Precipitación extrema / lluvias prolongadas	24 – 26	Saturación de taludes, sobrepresión de poros, desbordes.
Errores de diseño / construcción	21 – 23	Métodos aguas arriba, deficiente drenaje interno.
Operación inadecuada / mantenimiento insuficiente	19 – 21	Mala gestión del nivel de agua y laguna central.
Eventos sísmicos	13 – 15	Licuefacción inducida.
Fugas internas / erosión interna (piping)	9 – 10	Falla progresiva por filtración concentrada.
Otros (inestabilidad geológica, sabotaje, etc.)	5 – 7	Casos aislados, pero de alto impacto.

Fuente: Oboni (2020); Azam & Li (2010); ICOLD Bulletin 194 (2019).

RelaveNet
A Community of Excellence

Estadísticas de Fallas

Tabla 3. Consecuencias principales de las fallas de presas de relaves. Fuente: Oboni 2020 y TMW 2022

Tipo de impacto	Indicador típico	Ejemplo histórico	Repercusión ambiental y social
Humano	> 270 muertes (Brumadinho 2019)	Brasil 2019	Pérdida de vidas humanas, desplazamiento de comunidades.
Ambiental	40 km de ríos contaminados	Fundão 2015	Sedimentación, metales pesados, pérdida de biodiversidad.
Económico	> 4 000 millones USD	Fundão y Mount Polley 2014	Costos de remediación y reputacionales.
Reputacional / Legal	Suspensión de operaciones, sanciones internacionales	Varios casos (2015–2023)	Riesgo de licencias sociales y cierre prematuro.



Figura 4. Inundación por la ruptura de la presa Fundão de Samarco. Foto Senado Federal



Figura 5. Erosión de una área de concreto y roca subyacente en el vertedero de la presa Oroville. Foto de Dale Kolke/Departamento Recursos Hídricos California

RelaveNet
A Community of Excellence

Precipitación Extrema y Consecuencias Hidrológicas: Saturación y Presión de Poros (Causa de Falla)

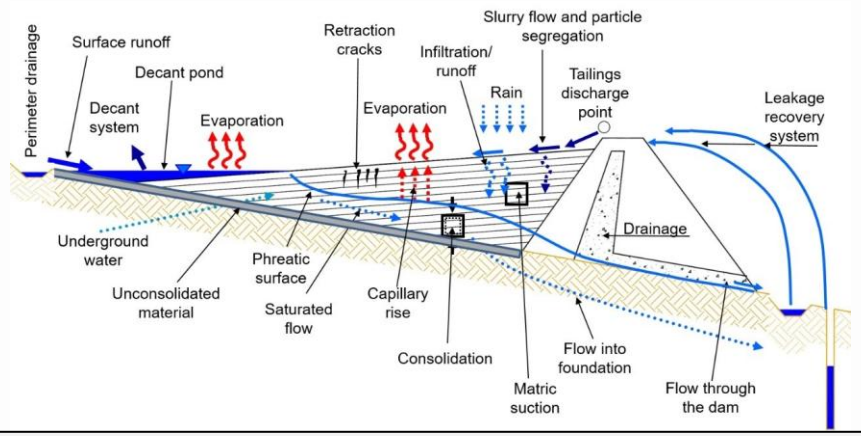


Figura 6. Esquema de los factores que afectan la operación de un depósito, incluyendo la infiltración/escorrentía de la Lluvia y la influencia en la superficie freática y la presión capilar

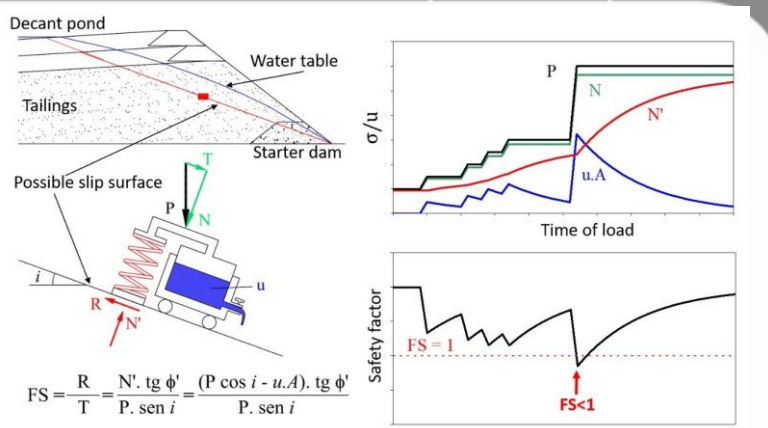
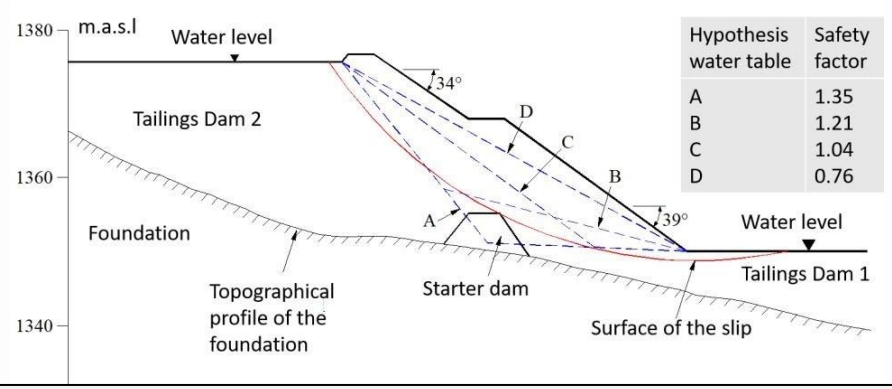


Figura 7. Ilustración de cómo el aumento de la presión de poros (u) reduce la resistencia al corte y puede llevar a la pérdida de estabilidad (FS < 1)



Hypothesis water table	Safety factor
A	1.35
B	1.21
C	1.04
D	0.76

Figura 7. Influencia de la mesa de agua (water table) en el factor de seguridad (FS) de la falla del dique de relaves de Stava, correlacionando 4 posiciones hipotéticas de la mesa de agua (A, B, C, D) con factores de seguridad decrecientes (1.35 a 0.76)

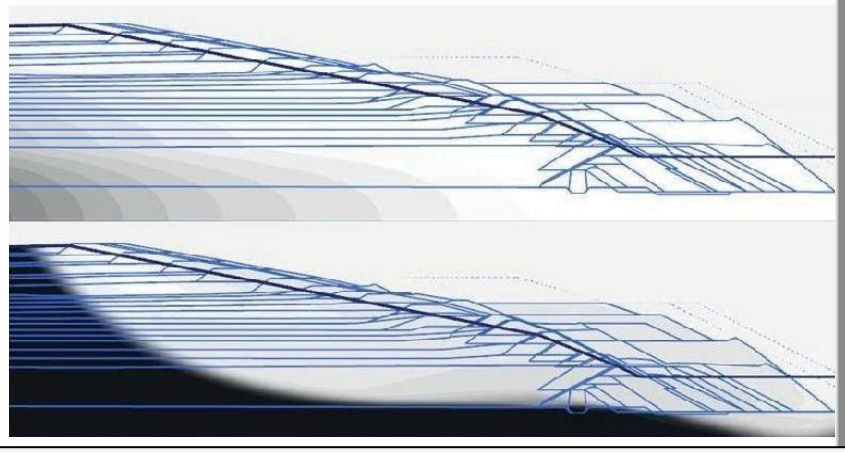


Figura 8. Simulación del exceso de presión de poros antes y después de la construcción de un terraplén

RelaveNet
A Community of Excellence

Precipitación Extrema y Consecuencias Hidrológicas: Sobrepaso (Overtopping)

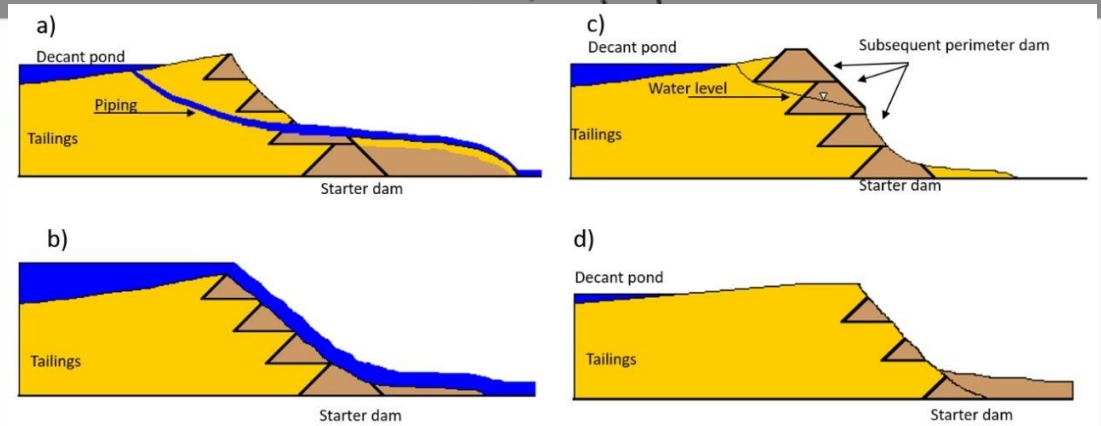


Figura 6. Mecanismo de falla del dique por sobrepaso (dam failure from overtopping)

Precipitación Extrema y Consecuencias Hidrológicas: Criterios Hidrológicos Extremos (PMP/PMF)

Tabla 4. Criterios de Diseño Hidrológico de TSFs Basados en la Clasificación de Consecuencias

Clasificación de Consecuencia (Ejemplo)	Evento Hidrológico de Diseño (Capacidad del Aliviadero)	Evento de Diseño (Capacidad de Almacenamiento)	Requisito de Borde Libre (Wave Freeboard)
Baja/Muy Baja	Tormenta de 1:100 AEP	Año Húmedo de 1:100 AEP	Variable/Nulo [12]
Significativa	Tormenta de 1:1,000 AEP	Año Húmedo de 1:1,000 AEP	0.3 m [12]
Alta A/Extrema	Crecida Máxima Probable (PMF) [10]	Precipitación Máxima Probable (PMP)	Cero (Implica almacenamiento total del PMF) [12]

RelaveNet
A Community of Excellence

Precipitación Extrema y Consecuencias Hidrológicas: Protección contra Olas y Bordo Libre

Tabla 5. Freeboard del terraplén y la protección contra las olas (Embankment freeboard and wave protection), incluyendo las alturas de ola aproximadas

APPROXIMATE WAVE HEIGHTS

Fetch, miles	Wind velocity, miles per hour	Wave height, feet
1	50	2.7
1	75	3.0
2.5	50	3.2
2.5	75	3.6
2.5	100	3.9
5	50	3.7
5	75	4.3
5	100	4.8
10	50	4.5
10	75	5.4
10	100	6.1

FREEBOARD REQUIRED FOR WAVE ACTION

Fetch, miles	Normal freeboard, feet	Minimum freeboard, feet
Less than 1	4	3
1	5	4
2.5	6	5
5	8	6
10	10	7

RIPRAP REQUIRED ON 3:1 SLOPES FOR PROTECTION AGAINST WAVES

Reservoir fetch, miles	Nominal thickness, inches	Gradation, percentage of stones of various weights (pounds)				
		Maximum size	25 percent greater than--	45 to 75 percent		25 percent less than[1] --
				From	To	
1 and less	18	1,000	300	10	300	10
2.5	24	1,500	600	30	600	30
5	30	2,500	1,000	50	1,000	50
10	36	5,000	2,000	100	2,000	100

[1] Sand and rock dust less than 5 percent.

Source: U.S. Bureau of Reclamation.

RelaveNet
A Community of Excellence

Precipitación Extrema y Consecuencias: Vulnerabilidad por Método Constructivo (Saturación)

Tabla 6. Vulnerabilidad Geotécnica e Hidrológica Comparativa de los Métodos de Construcción de Relaves

Método Constructivo	Materia Prima	Control del Nivel Freático (Estabilidad)	Susceptibilidad a Lluvias Extremas/Inundaciones
Aguas Arriba (Upstream)	Mínimo relleno mecánico; Diques sobre relaves finos.	Pobre; Presiones de poros elevadas en lodos saturados.	Muy Alta (Mayor riesgo de licuefacción estática inducida por saturación)
Línea Central (Centerline)	Relleno mecánico moderado.	Bueno; Depende de la segregación de relaves y el diseño de drenaje.	Moderada
Aguas Abajo (Downstream)	Mayor volumen de relleno mecánico.	Excelente; Diseñado con manto permeable para drenaje y control de filtración.	Baja (Alto factor de seguridad hidrológico)

RelaveNet
A Community of Excellence

Eventos Asociados a la Nieve y el Hielo

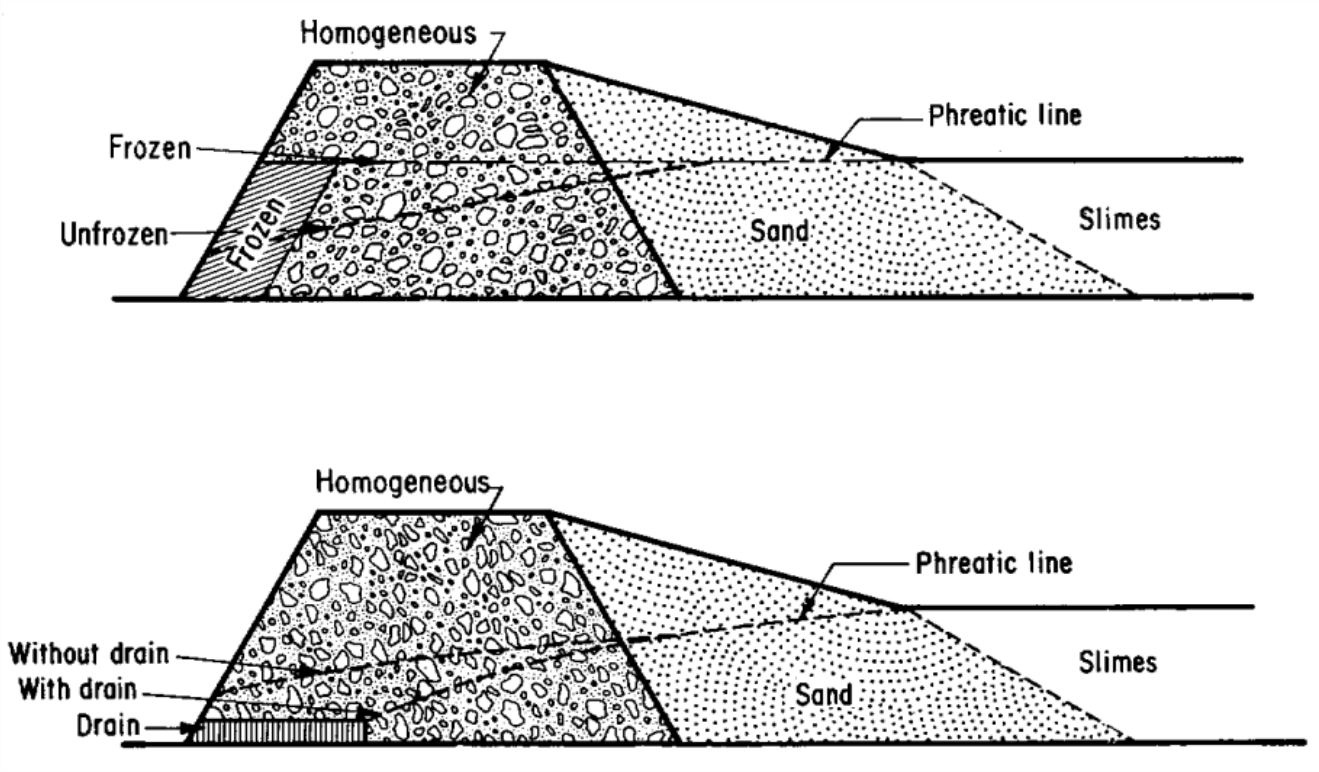


Figura 7. Ubicación de la línea freática para cara congelada versus no congelada (Location of phreatic line for frozen versus unfrozen face), indicando cómo las condiciones de frío extremo pueden afectar la estabilidad

RelaveNet
A Community of Excellence

Viento y otros Fenómenos Meteorológicos como Sequía

Tabla 5. Detalle de la protección requerida para el terraplén, ilustración de las Alturas de ola aproximadas en pies (Approximate Wave Heights) basándose en la distancia de recorrido (Fetch)

APPROXIMATE WAVE HEIGHTS

Fetch, miles	Wind velocity, miles per hour	Wave height, feet
1	50	2.7
1	75	3.0
2.5	50	3.2
2.5	75	3.6
2.5	100	3.9
5	50	3.7
5	75	4.3
5	100	4.8
10	50	4.5
10	75	5.4
10	100	6.1

FREEBOARD REQUIRED FOR WAVE ACTION

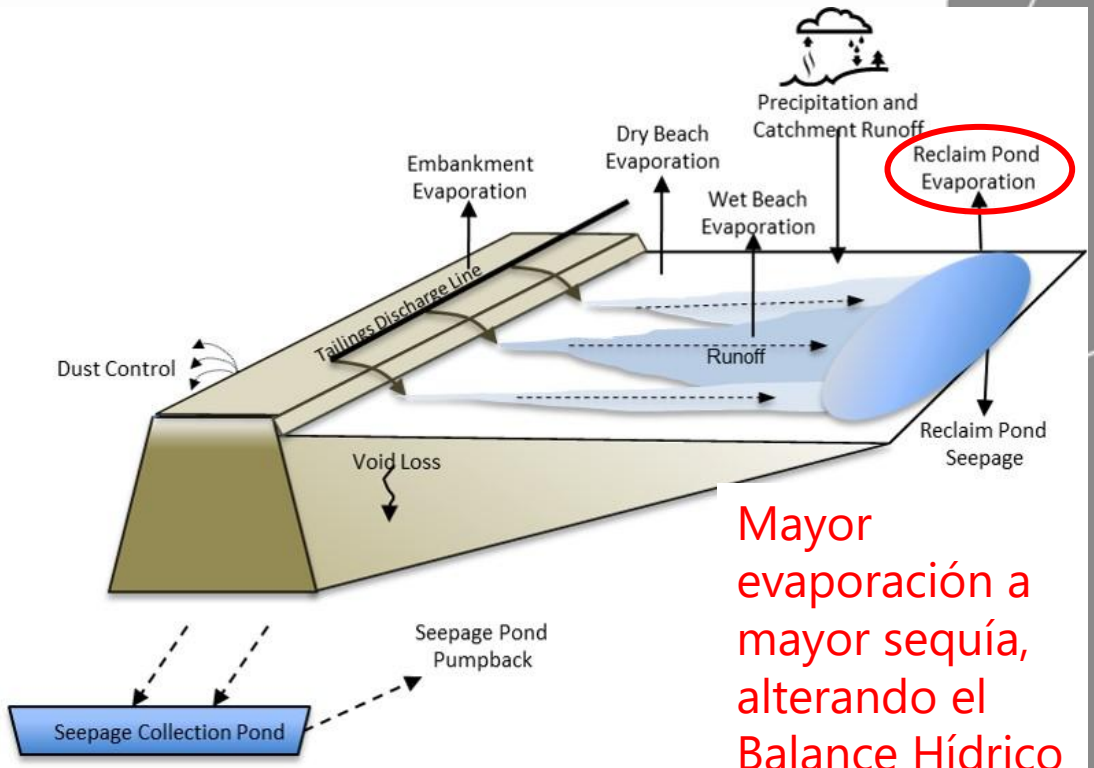
Fetch, miles	Normal freeboard, feet	Minimum freeboard, feet
Less than 1	4	3
1	5	4
2.5	6	5
5	8	6
10	10	7

RIPRAP REQUIRED ON 3:1 SLOPES FOR PROTECTION AGAINST WAVES

Reservoir fetch, miles	Nominal thickness, inches	Gradation, percentage of stones of various weights (pounds)				
		Maximum size	25 percent greater than--	45 to 75 percent		25 percent less than[1]--
				From	To	
1 and less	18	1,000	300	10	300	10
2.5	24	1,500	600	30	600	30
5	30	2,500	1,000	50	1,000	50
10	36	5,000	2,000	100	2,000	100

[1] Sand and rock dust less than 5 percent.

Source: U.S. Bureau of Reclamation.



Mayor evaporación a mayor sequía, alterando el Balance Hídrico

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 5 – Tema 1 –
Riesgos asociados a eventos climáticos extremos y su influencia en la gestión de recursos hídricos en la minería.

- **Ing. Danny Flores Cruz**

RelaveNet
A Community of Excellence