

COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES

HYDROGEOLOGICAL BEHAVIOR OF TAILINGS STORAGE FACILITIES

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D./D^a CLAUDIA BEATRIZ HIDALGO PAVEZ

Dirigido por:

Dr. D. FRANCISCO JAVIER LILLO RAMOS

Alcalá de Henares, a 14 de septiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS

Hacer un máster semipresencial en medio de una pandemia mundial, fue sin duda un gran acierto. Los tiempos de encierro no pudieron ser mejor aprovechados. Tantos fines de semanas estudiando y desarrollando ejercicios no habrían sido lo mismo sin el apoyo a la distancia de los compañeros de esta travesía. Por esto, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al tremendo grupo humano con el que compartí durante este camino y que, a pesar de las incertidumbres previas, pude afortunadamente conocer en la etapa presencial.

En particular, le agradezco a Patricio y Ramón por sus comentarios y aportes a mi TFM. A Carlos y Dolores por las discusiones antes de entregar las tareas y por siempre darse el tiempo de compartir ideas.

Agradezco, también a Alonso, por darse el tiempo de leer en detalle mi trabajo y darme ideas para mejorarlo y por supuesto, al grupo de profesionales con el que trabajo día a día. Los últimos probablemente no sabrán de su enorme contribución a este trabajo, pues en su mayoría no hablan español. Sin embargo, el proceso de aprendizaje no habría sido el mismo sin su constante apoyo y contribución en experiencia.

Finalmente, agradezco a mi compañero, quien soportó mis fines de semana completos dedicados al máster, las entregas de última hora y sobre todo las incertidumbres de un viaje en medio una pandemia.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	7
1 INTRODUCCION	8
1.1 Objetivos	9
2 METODOLOGIA	11
3 MARCO TEÓRICO	12
3.1 Generalidades	12
3.2 Caracterización hidrogeológica de la fundación de una presa de relaves	15
3.3 Caracterización hidrogeológica de los materiales de un depósito de relaves	17
3.3.1 Heterogeneidad de las propiedades hidráulicas en un depósito de relaves ...	18
3.4 Modelos numéricos de flujo	20
4 INTERACCIONES ENTRE LAS PRESAS DE RELAVES Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS	22
4.1 Efectos de las propiedades hidráulicas de la fundación en la superficie freática dentro de la presa de relaves	22
4.2 Potenciales hidráulicos verticales y filtraciones	23
4.3 Presión de poros	25
4.4 Generación de niveles colgados producto de las filtraciones	26
4.5 Interacciones geoquímicas que afectan la calidad de las aguas	27
4.6 Resumen de impactos hidrogeológicos asociados a las presas de relaves	30
5 CASOS DE ESTUDIO	32
5.1 Tapo Canyon, USA - 1994	33
5.1.1 Contexto	33
5.1.2 Factor hidrogeológico	33
5.2 Aznalcóllar, España - 1998	33
5.2.1 Contexto	33
5.2.2 Factor hidrogeológico	34
5.2.3 Impactos hidrogeológicos	35
5.2.4 Remediación hidrogeológica	35
5.3 Mount Polley, Canadá – 2014	35
5.3.1 Contexto	35
5.3.2 Factor hidrogeológico	36
5.3.3 Impactos hidrogeológicos	36
5.4 Fundão, Brasil - 2015	37
5.4.1 Contexto	37
5.4.2 Factor hidrogeológico	37
5.4.3 Impactos	38

5.5	Pedro Sotto Alba, Cuba	38
5.5.1	Contexto	38
5.5.2	Factor hidrogeológico.....	38
6	DISCUSIÓN.....	39
7	CONCLUSIONES	43
8	BIBLIOGRAFIA.....	45

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Revisión bibliográfica de rotura de presas de relaves.....	11
Tabla 3-1. Contenido de sólidos de los distintos tipos de relaves. Modificado de Carvajal (2018)	14
Tabla 5-1. Resumen de casos de roturas en depósitos de relaves relacionados con factores hidrogeológicos.	32

INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Tipos de construcción de depósitos de relaves. Modificado de Vick, 1990.....	13
Figura 3-2. Esquema general de una presa de relaves, sus entradas y salidas de agua. Modificado de MEND, 2017.	15
Figura 3-3. Tipos de materiales sobre los que se puede fundar un depósito de relaves.....	15
Figura 3-4 Tipos de materiales incluidos en un depósito de relaves	17
Figura 3-5. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en una presa de relaves. k1, k2, k3 hacen referencia a conductividades hidráulicas en diferentes partes del relave, kf hace referencia a la conductividad hidráulica del sustrato. Modificado de Vick, 1990.....	20
Figura 4-1. Influencia de la conductividad hidráulica de la fundación en la ubicación del nivel del agua dentro del depósito. kf1 y kf2 indican posibles conductividades hidráulicas del sustrato, siendo $kf1 < kf2$ La línea discontinua azul claro representa el nivel freático en el interior del relave para kf1, y la línea discontinua azul oscuro representa el nivel freático para kf2 (Modificado de Vick, 1999).	23
Figura 4-2. Variaciones del nivel freático producidas por la infiltración de agua procedente del depósito de relaves. Kf1 y Kf2 indican conductividades hidráulicas en capas del sustrato. Adaptado de Vick, 1990 y Savar et al., 2012.....	24
Figura 4-3. Niveles colgados en el acuífero subyacente producto de las filtraciones. Kf1 hace referencia a la conductividad hidráulica de lentejones arcillosos incluidos en la zona no saturada de conductividad hidráulica kf2. Adaptado de Vick (1990)	27
Figura 4-4. Interacciones geoquímicas producto de las filtraciones. Modificado de Kargar et al. 2012.	28
Figura 4-5. Diagrama de una presa de relaves asentada sobre una formación kárstica, mostrando dos escenarios diferentes: a) evento de tormenta b) periodo seco. Modificado de Ren et al., 2020.....	30

TABLA DE ABREVIATURAS

APEGBC	<i>Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia</i> Asociación de Geocientistas e Ingenieros Profesionales de British Columbia
EPA	<i>Environmental Protection Agency.</i> Agencia de protección medioambiental
ha.	hectáreas
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams.</i> Comisión internacional en Grandes Presas
IEEIRP	<i>Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel.</i> Panel de investigación y revisión ingenieril experta independiente
m	metros
MEND	<i>Mine Environment Neutral Drainage.</i> Drenaje Minero Medioambiental Neutral.
Mm ³	Millones de metros cúbicos
USCOLD	<i>United States Committee on Large Dams.</i> Comité de los Estados Unidos en Grandes Presas

RESUMEN

Este trabajo constituye una revisión de las principales interacciones hidrogeológicas entre depósitos de relaves y sistemas de aguas subterráneas y presenta algunos casos en que dichas interacciones contribuyeron a la rotura de este tipo de infraestructuras. Se revisó una serie de referencias que describen estas interacciones, y otra serie de publicaciones que compilan casos de rotura de depósitos de relaves.

Se ha concluido que el reconocimiento de unidades hidrogeológicas que pudieran dar origen a barreras hidráulicas, o que sean débiles y susceptibles de romperse, es fundamental para la construcción de un depósito de relaves estable. Esto queda de manifiesto en las roturas de Aznalcóllar (España) y Mount Polley (Canadá), que pudieron haberse evitado o, al menos retrasado, si un estudio hidrogeológico más profundo hubiese reconocido y caracterizado con suficiente detalle las unidades hidrogeológicas que contribuyeron a su rotura.

El aumento de niveles freáticos dentro de un depósito y las deficiencias en su drenaje, son factores que comúnmente se asocian a la rotura de éstos. Dan cuenta de ello los casos de las roturas de Aznalcóllar y Tapo Canyon, que contaban con unidades de baja permeabilidad que redujeron el drenaje de la infraestructura contribuyendo a su rotura.

El diseño de estas infraestructuras debe basarse en la conceptualización hidrogeológica; debe limitar las filtraciones de aguas contactadas hacia el acuífero al mismo tiempo que se permite el drenaje de la infraestructura y, debe contemplar una planificación para la etapa de cierre de la infraestructura.

1 INTRODUCCION

Las grandes infraestructuras mineras son el foco de numerosos estudios hidrogeológicos, pues los procesos que en ellas ocurren pueden interactuar con los sistemas de aguas superficiales y subterráneas a nivel local, y muchas decisiones operativas se relacionan estrechamente con dichas interacciones.

En particular, los depósitos de relaves son instalaciones mineras cuyo principal objetivo corresponde al almacenamiento de los residuos de la minería de manera segura para el medioambiente y la operación. Adicionalmente, muchas veces estas instalaciones permiten también la recuperación de agua para ser utilizada en el mismo proceso.

Estas instalaciones mineras son bastante complejas, y su diseño debe ser profundamente estudiado en términos geotécnicos, hidrogeológicos e hidráulicos para que su operación sea eficiente en términos productivos. Al mismo tiempo, se debe cumplir con las normativas locales e internacionales que regulan su construcción, operación, cierre y post-cierre.

Los depósitos de relaves (*mine tailings* o balsas de lodos mineros) tienen muchas similitudes con las presas de almacenamiento de agua. Sin embargo, una de sus mayores diferencias radica en que son visualizadas como un costo importante, mientras que las presas para almacenamiento de agua generan también beneficios (Roche et al., 2017). Otra gran diferencia con las presas de agua radica en que se van construyendo al mismo tiempo que ocurre la operación y la deposición de relaves (ICOLD, 2001), lo cual no ocurre con las presas de agua. Finalmente, además de agua, este tipo de infraestructuras contienen un gran volumen de material particulado, lo que contribuye a una mayor carga sobre los elementos sensibles de la infraestructura. Estos hechos, sumados a su limitada vida útil, hacen que sea más común que se produzcan roturas en los depósitos de relaves que en las de agua.

Numerosos autores (USCOLD, 1994; Rico et al., 2007; Oldecop et al., 2008; Roche et al., 2017; Lyu et al., 2019; Rana et al., 2021; entre otros) han compilado los principales factores que originan su rotura y es sencillo reconocer que, en muchas ocasiones, se ven involucrados factores hidrogeológicos, los cuales tienen que ver con los materiales con los que se construye la presa, con los materiales que se almacenan en ella (relaves), con los materiales en los que se asienta el depósito y, también, con las interacciones hidrogeológicas entre todos

ellos.

Las investigaciones de las roturas de presas usualmente se centran en identificar la causa principal y en encontrar un responsable. No se suele profundizar en los aspectos hidrogeológicos que contribuyeron a tal rotura pues, por lo general, estos factores son secundarios, tras otros como son licuefacción de los relaves, defectos en el diseño de la estructura, inundaciones o precipitaciones inusuales y la sismicidad de la región en donde se emplaza la infraestructura, entre otros factores.

Cabe señalar que en al menos un 5% de los casos de rotura, estudiados por Rico et al. (2007), Roche et al. (2017) y Rana et al. (2021), se reconocen problemas en los materiales de apoyo o cimientado como causa de la rotura de presas de relaves, los cuales se relacionan con las condiciones hidrogeológicas de línea base. Sin embargo, causas relacionadas con terremotos, inestabilidad sísmica o subsidencia de mina, también pueden estar relacionadas con las condiciones hidrogeológicas presentes de manera previa a la construcción de la infraestructura.

Por otro lado, ICOLD (2001) señala que una de las causas más comunes de rotura de presas de relaves corresponde a la ausencia de control del régimen hidrológico y el balance de agua de la infraestructura y, menciona, además, que un adecuado control del nivel freático en el interior del depósito, a través de pozos abiertos y piezómetros, puede alertar fácilmente sobre condiciones peligrosas para la estabilidad de una presa de este tipo.

Este trabajo pretende visibilizar las interacciones hidrogeológicas que deben ser usualmente manejadas durante la construcción y operación de un depósito de relaves y que, en algunas oportunidades, contribuyen, junto con otros factores, a su rotura y/o al impacto del medioambiente, ocasionando pérdidas de vidas humanas, desastres ambientales e importantes costos económicos.

1.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de fin de máster es compilar los aspectos relevantes del comportamiento hidrogeológico de depósitos de relaves en términos de su construcción, operación, gestión y prevención de roturas, y visibilizar la importancia de realizar los

estudios hidrogeológicos con la profundidad apropiada al diseño de la infraestructura.

Para completar dicho objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Reconocer los detalles de una caracterización hidrogeológica apropiada para la construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.
2. Generar una revisión del estado del conocimiento sobre las interacciones hidrogeológicas entre los depósitos de relaves y los sistemas de aguas subterráneas aledaños.
3. Reconocer los impactos hidrogeológicos de los depósitos de relaves.
4. Generar una revisión de casos de rotura de presas de relaves en las que, al menos, uno de los factores desencadenantes tiene relación con la hidrogeología.

2 METODOLOGIA

Este trabajo se basa en la investigación bibliográfica de las interacciones de origen hidrogeológico entre depósitos de relaves y los sistemas de aguas subterráneas cercanos, y se ha llevado a cabo en dos etapas:

1. Compilación bibliográfica sobre la caracterización hidrogeológica que debe llevarse a cabo previamente a la construcción de un depósito de este tipo. Se han revisado una serie de libros y publicaciones en las que se expone una visión general de lo que son estas infraestructuras mineras, los materiales involucrados y las interacciones hidrogeológicas asociadas.
2. Compilación de casos de estudio de roturas de presas de relaves en las que, al menos uno de los factores desencadenantes está ligado a la hidrogeología, tanto de su fundación, como de la presa misma y, las interacciones entre ambas. Para ello se han revisado una selección de documentos que compilan datos de presas de relaves en el mundo, sus características, sus roturas y sus impactos. Los documentos revisados se detallan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Revisión bibliográfica de rotura de presas de relaves

Fuente	Descripción general
ICOLD (2001)	Revisión de las razones más comunes para que se produzca una falla
Blight y Fourie (2004)	Revisión de los mecanismos de rotura de presas de relaves y otros depósitos de residuos con detalle en casos de estudio emblemáticos
Oldecop et al. (2008)	Revisión de casos históricos de rotura de presas de relaves mineros
Rico et al. (2008)	Compilación y análisis de 147 casos de desastres de presas de relaves en el mundo que incluye las causas de la rotura y los impactos medioambientales entre otros.
Stratchan y Goodwin (2015)	Revisión de incidentes de presas de relaves y su relación con el manejo de aguas.
Roche et al. (2017)	Análisis de las razones por las cuales se rompen las presas de relaves, que incluye varios casos de estudio.
Lyu et al. (2019)	Revisión de razones para la rotura de presas de relaves basada en casos históricos
Rana et al. (2021)	Revisión de 63 casos de rotura de presas de relaves que fueron analizados mediante imágenes satelitales, modelos de elevación digital y literatura.

3 MARCO TEÓRICO

Esta sección presenta una revisión teórica de lo que son los depósitos de relaves y la caracterización hidrogeológica de todos los materiales involucrados.

3.1 Generalidades

Los relaves corresponden a la roca descartada durante la operación minera que no tiene potencial económico, que ha sido pulverizada y, durante el proceso metalúrgico, se le ha agregado agua para facilitar la separación y transporte a través de tuberías o canaletas. Según Zandarín (2008), los relaves son materiales no plásticos de grano fino con conductividades hidráulicas relativamente bajas y, según Oldecop et al. (2008), son roca finamente molida, mezclada con agua y con la consistencia de un lodo.

Por lo general, dentro de los relaves mineros de un mismo depósito, se identifica la fracción gruesa como arenas y la fracción de grano más fino como limos o lamas. Las primeras son depositadas en el muro (o dique, la fuente del vertido se encuentra sobre él) o se asientan cerca de éste; las segundas, suelen asentarse más alejadas del muro debido a la forma en que se depositan los relaves (ICOLD, 2001; Rana et al., 2021).

En términos constructivos, se suele hacer la distinción entre embalses y tranques de relaves. En los primeros no se requiere un muro de contención, pues la ubicación del depósito es en un sitio favorable para ello o, el muro se construye con material de empréstito impermeabilizado en su cara aguas arriba. Por su parte, los tranques de relaves corresponden a aquellos depósitos en los que el muro de contención se construye con las propias arenas del relave.

La construcción de las presas de relaves se inicia con un muro de partida. Cuando el emplazamiento de este muro se ha concluido, se inicia la construcción de sus crecimientos progresivos, entre ciclos de deposición de relaves. Estos recrecimientos pueden realizarse hacia aguas arriba, hacia aguas abajo o considerando un eje central (Vick, 1990), tal como se muestra en la Figura 3-1.

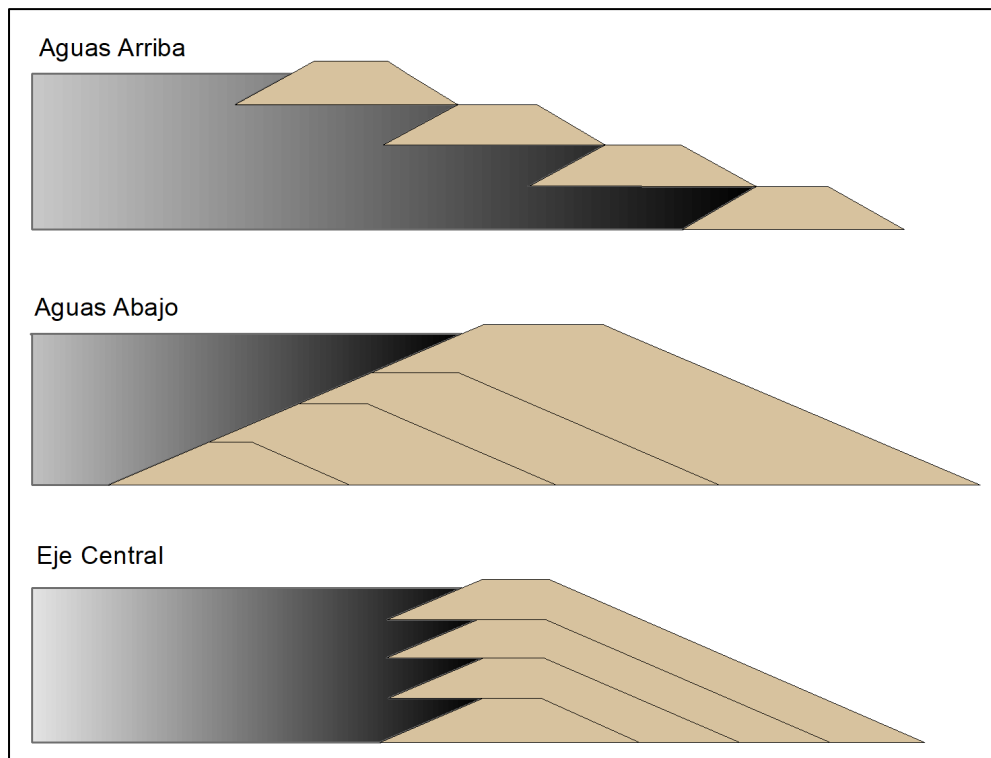


Figura 3-1. Tipos de construcción de depósitos de relaves. Modificado de Vick, 1990

En proporción, las presas de relaves construidas con el método agua arriba son las que más han sufrido roturas (Rana et al., 2021). En efecto, en Chile, este tipo de construcción de se ha prohibido, pues frente a desencadenantes típicos como los terremotos, las presas construidas usando dicho método, presentan un mayor riesgo de inestabilidad (Liang y Elias 2010). A pesar de esto, el 90% de los depósitos de relaves en China han sido construidos con este método (Liu et al., 2018).

Los relaves se clasifican en cuatro grandes categorías: convencionales, filtrados, espesados y en pasta. Los primeros no incluyen ningún tratamiento para reducir su contenido de agua, por lo que el contenido de sólidos es bajo. En cambio, tanto los relaves filtrados, como espesados, requieren un proceso posterior a su salida de la planta y previo a ser vertidos en la balsa, en donde se les reduce el contenido de humedad. Un quinto tipo de relaves se ha estado expandiendo en la industria minera en los últimos años: *dry stacking* o apilado en seco, los cuales son el resultado de un proceso de filtrado y también de compactación.

Los relaves filtrados contienen menos de un 20% de agua y este contenido se alcanza respecto a los relaves convencionales tras un tratamiento de filtración. Por otro lado, previo

a su vertido, los relaves espesados son sometidos a un proceso de sedimentación, por medio de espesadores. Este proceso elimina un volumen importante de agua, lo que conlleva a la inclusión de sistemas de piscinas de recuperación de aguas en las instalaciones de relaves de este tipo.

Finalmente, los relaves en pasta contienen entre un 10 y un 25% de agua, en general con partículas de tamaño inferior a 20 micrones y se depositan de manera similar que los relaves filtrados. La Tabla 3-1 presenta un resumen con los porcentajes de sólidos que definen los distintos tipos de relaves.

Tabla 3-1. Contenido de sólidos de los distintos tipos de relaves. Modificado de Carvajal (2018)

Tipo de Relave	% en peso de sólidos
Convencional	30 – 50
Espesado	50 – 65
En pasta	65 – 75
Filtrado	~80

Además del muro de contención, y los materiales de los relaves, existen otros dos elementos característicos de este tipo de infraestructuras. El primero corresponde a la laguna de aguas claras, la cual se desarrolla, usualmente, en la parte más distante al punto de descarga de los relaves y cubre las limos y lamas. El segundo corresponde a la playa, que se desarrolla en la porción más cercana al punto de descarga y suele estar constituida por la fracción de grano más gruesa de los relaves (arenas) Figura 3-2.

El balance hídrico de un depósito de relaves es un factor muy importante para su operación óptima, por lo que el manejo apropiado de las aguas se hace necesario en términos ambientales, y operativos, pues usualmente se intenta recuperar el agua que llega a la presa, junto con los relaves mismos, al momento de su deposición para ser reutilizada en el proceso.

La Figura 3-2 muestra las principales entradas y salidas de agua de una presa de relaves y cómo dichas aguas se manejan para mantener la operación en marcha. Esta figura también ilustra una de las principales interacciones que se observan entre una presa de relaves y las aguas subterráneas, como lo es la infiltración de las aguas almacenadas dentro de la presa (aguas de contacto) hacia el sistema acuífero.

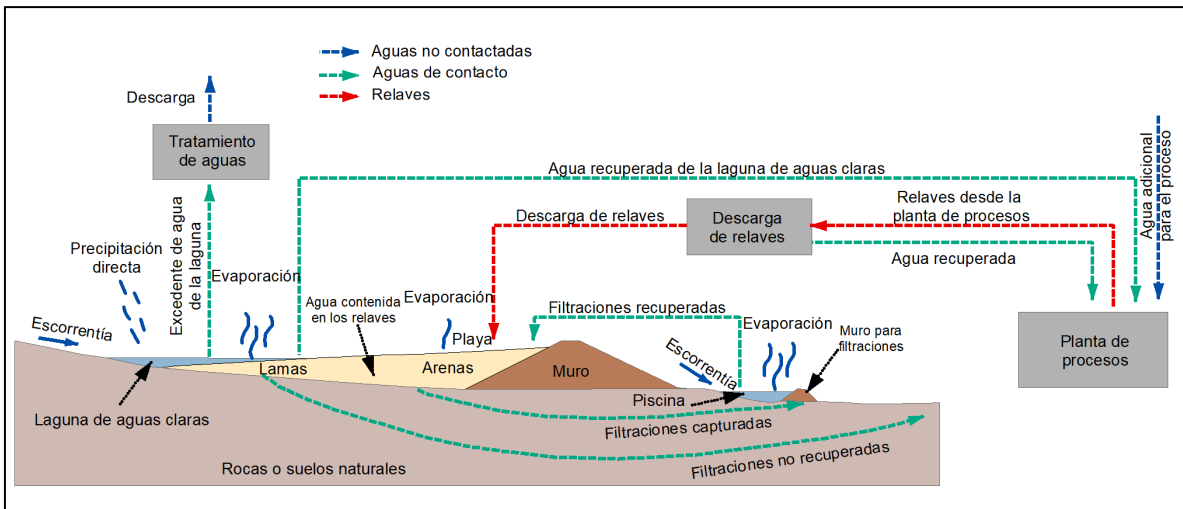


Figura 3-2. Esquema general de una presa de relaves, sus entradas y salidas de agua. Modificado de Mend, 2017.

3.2 Caracterización hidrogeológica de la fundación de una presa de relaves

Existen criterios de estabilidad física y química establecidos como estándares internacionales para la construcción, operación, cierre y post-cierre de una presa de relaves, y los materiales en los que estas infraestructuras se asientan, juegan un rol muy importante en dicha estabilidad (Lyu et al., 2018).

Los materiales de cimentación o apoyo de un depósito de relaves se clasifican según su competencia y/o consolidación (ver Figura 3-3), pudiendo ser suelos vegetales, depósitos sedimentarios no consolidados, o bien, rocas. Las rocas a su vez pueden encontrarse frescas, meteorizadas, fracturadas o no.

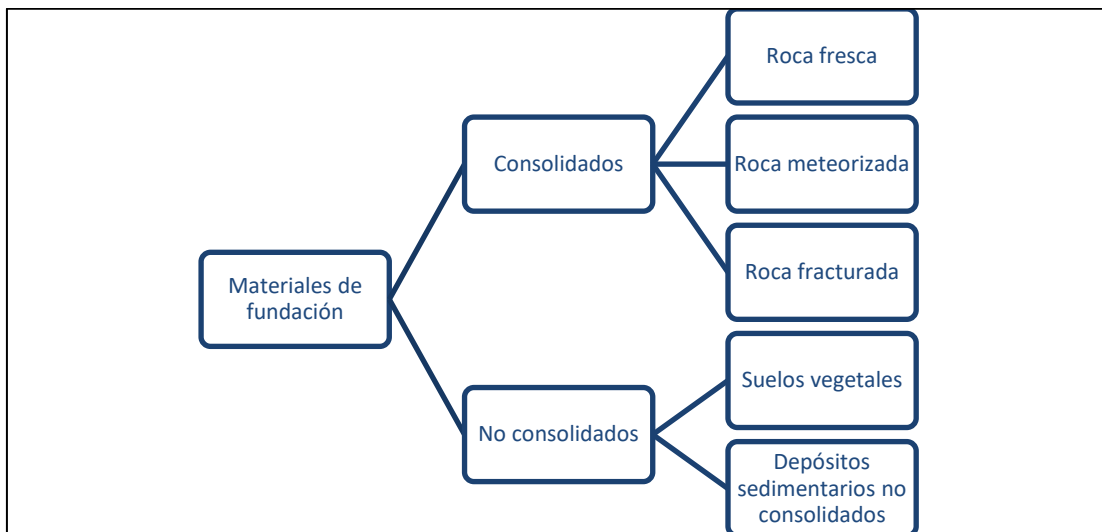


Figura 3-3. Tipos de materiales sobre los que se puede fundar un depósito de relaves

Una buena caracterización hidrogeológica es imprescindible desde la etapa de diseño de un proyecto de este tipo (Fortuna et al., 2021) y, lo que debería incluir dicha caracterización es, al menos, lo siguiente:

- Distribución de tamaño de granos, contenido de humedad residual (Cosma et al., 2014), grado de saturación y curva de retención de humedad para los materiales de cimentación no consolidados.
- Conductividad hidráulica en condiciones de saturación, tanto para materiales no consolidados, como para rocas (APEGBC, 2016; Fortuna et al., 2021).
- Grado de fracturamiento y meteorización, persistencia y continuidad de las fracturas, así como su relleno, orientación y apertura (Cosma et al., 2014; APEGBC, 2016; Fortuna et al., 2021).
- Caracterización del potencial de drenaje ácido y de disolución.
- Caracterización del acuífero en términos de sus propiedades hidráulicas, extensión y continuidad espacial, espesor y grado de confinamiento (APEGBC, 2016). Todo esto contribuye también a la caracterización de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.
- Caracterización hidroquímica de línea de base de las aguas naturales del acuífero (APEGBC, 2016). Esta caracterización debe incluir la comparación de la calidad natural de las aguas con las normas de calidad de agua que puedan ser exigibles para este tipo instalaciones mineras.
- Desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual de línea base, incluyendo la definición de unidades hidrogeológicas, su caracterización en términos de propiedades hidráulicas, direcciones de flujo subterráneo y gradientes hidráulicos naturales, junto con la identificación de zonas de recarga y descarga del acuífero (Fortuna et al., 2021). Esto debe ir acompañado de la caracterización de cauces superficiales y su interacción con el acuífero.

3.3 Caracterización hidrogeológica de los materiales de un depósito de relaves

Los materiales involucrados directamente en los depósitos de relaves incluyen los propios relaves (lamas, limos y arenas de relaves), los materiales con los que se construye el muro de contención, los materiales impermeabilizantes y los filtros que pudiesen utilizarse para las distintas infraestructuras de drenaje asociadas (ver Figura 3-4).

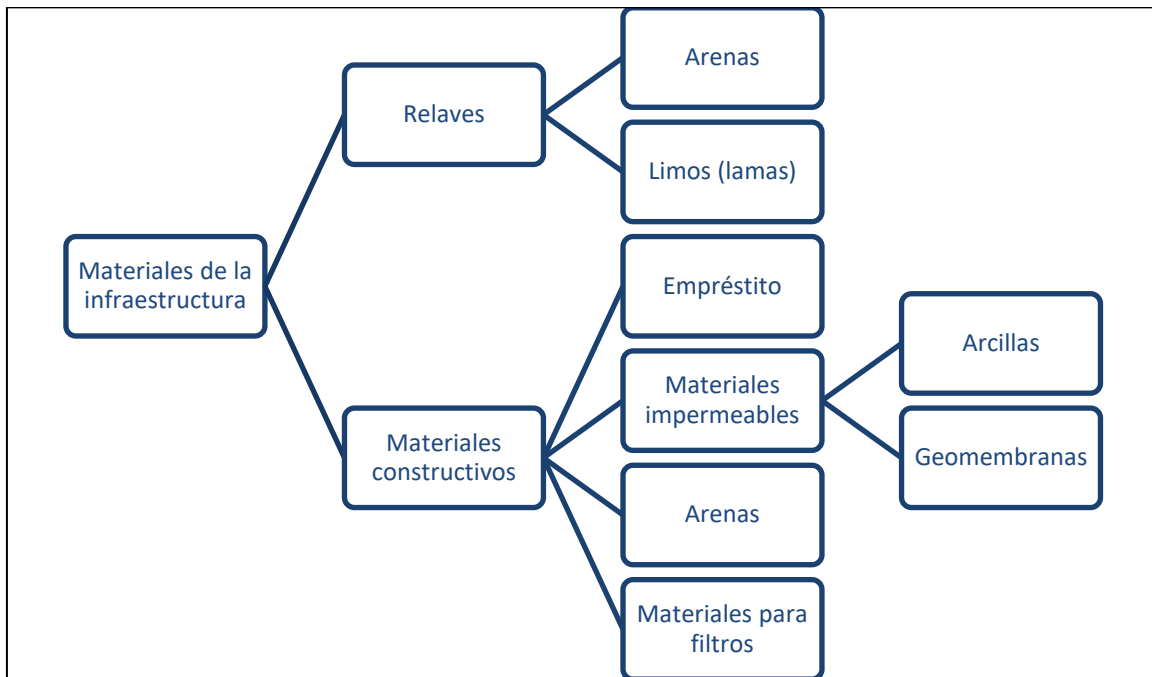


Figura 3-4 Tipos de materiales incluidos en un depósito de relaves

La caracterización de los materiales de la infraestructura, y de los residuos mineros, como tal, es, muy relevante, tanto para la etapa de construcción, como para las operación y cierre, pues permite reconocer las posibles interacciones con las aguas meteóricas y subterráneas, con las rocas y/o suelos de fundación, con los posibles drenajes ácidos que pudieran generarse y con los esfuerzos a los que estará sometida la infraestructura, los cuales pueden verse afectados por cambios en las presiones hidrostáticas.

En términos hidrogeológicos, las propiedades más relevantes de los materiales constructivos y los relaves mineros son:

- Porcentaje de sólidos o contenido de humedad (Blight y Fourie, 2004; Ruiz et al., 2021), para el caso de los relaves.

- Distribución de los tamaños de granos, tanto de los relaves (lamas y arenas) como también de los materiales de empréstito que pudieran utilizarse en la construcción de los muros o recrecimiento, y, de los posibles filtros que se utilicen en las infraestructuras de captación y drenaje en la presa (Ruiz et al., 2021).
- La conductividad hidráulica en estado de saturación de todos estos materiales, así como su curva de retención de humedad (Ruiz et al., 2021).
- Curva de retención de humedad de los relaves (Ruiz et al., 2021).
- Mecanismos de consolidación y compactación de los relaves, junto con la variación en su porosidad, propiedades hidráulicas con el tiempo y/o la profundidad y parámetros de consolidación (Blight y Fourie, 2004).

3.3.1 Heterogeneidad de las propiedades hidráulicas en un depósito de relaves

Además de la caracterización de cada uno de los materiales que componen un depósito de relaves, es de vital importancia comprender cómo se comportan las propiedades hidráulicas de cada uno de sus componentes, y cómo se distribuyen dichas propiedades hidráulicas a lo largo, ancho, y en profundidad, de la instalación.

El método por el cual se depositan los relaves es determinante para la distribución de las propiedades hidráulicas en el interior de este tipo de infraestructuras, y existe una amplia discusión sobre cómo es de importante la distancia desde la descarga, para el patrón de conductividades hidráulicas a lo largo de ellas (Vick, 1990). Sin embargo, el modelo más ampliamente aceptado señala que, a mayor distancia desde el punto de descarga de los relaves, menor es la conductividad hidráulica. Este efecto se debe a la gradación de tamaños de partículas inducido por la forma en que se realiza la descarga (Smith, 2021). Por otro lado, se espera un descenso en la porosidad y también de la conductividad hidráulica, al aumentar la profundidad.

La conjunción de ambos efectos se traduce en una importante anisotropía en la conductividad hidráulica dentro de un depósito de relaves. Está comúnmente aceptado que, al interior de estas infraestructuras, la conductividad hidráulica horizontal es entre 5 y 20 veces más grande que la conductividad hidráulica vertical (Smith, 2021). Esta anisotropía se debe a los

procesos de consolidación de los relaves que, por un lado, reducen la presión de poros debido a la remoción del exceso de agua y, por otro lado, aumentan la densidad de los relaves. Estos procesos favorecen el desarrollo de un perfil vertical en el cual la porosidad y la conductividad hidráulica se reducen con la profundidad, y también con el paso del tiempo.

Adicionalmente, la segregación de tamaños de granos favorece el desarrollo de una playa, en donde usualmente se encuentran las arenas, la fracción más gruesa de los relaves, cuya elevación es, por lo general, superior a la elevación de las aguas claras. Por su parte, las lamas se encuentran cubiertas por las aguas claras y con un mayor nivel de saturación en agua (Smith, 2021).

Cuanto mayor es la longitud de la playa, menor es la proporción de relaves que se encuentran completamente saturados. Como las playas se localizan cercanas al muro de la presa, a mayor longitud se espera también un mayor factor de seguridad para la presa.

En términos de anisotropía longitudinal en las propiedades hidráulicas dentro de un depósito de relaves, se pueden producir una infinidad de perfiles que afectan la forma y elevación de la superficie freática (Vick, 1990). Una selección de estos perfiles se presenta en la Figura 3-5, con conductividades hidráulicas relativas de los distintos materiales dentro de la presa, como también en los materiales de la fundación. Esta selección de perfiles se considera que la conductividad hidráulica de la fundación es muy baja, de modo de prevenir las filtraciones desde y hacia el acuífero.

El esquema superior de la Figura 3-5 representa el perfil típico en el cual los crecimientos sucesivos del muro se construyen con materiales de empréstito con conductividades hidráulicas superiores a los relaves. Cerca de él, se localizan las arenas de los relaves, con conductividades hidráulicas intermedias, más alejados del muro, bajo la laguna de aguas claras, se localizan las lamas, con las conductividades hidráulicas más bajas dentro de la instalación. En este caso, se espera el desarrollo de una playa amplia con un nivel freático relativamente bajo y con el muro saturado solamente en su base.

El esquema del medio, en la Figura 3-5, corresponde a un perfil típico de un muro construido con los mismos relaves compactados, significando una conductividad hidráulica menor que las arenas de los relaves. En este caso, la playa desarrollada no es tan amplia y el nivel

freático es mucho más somero, debido a que el muro reduce el drenaje, funcionando como una barrera hidráulica (Vick, 1990).

Finalmente, en el esquema inferior de la Figura 3-5, se observa un muro construido en materiales muy permeables (empréstimo) pero con una capa de menor permeabilidad en su cara aguas arriba, la cual funciona como barrera hidráulica. Esta configuración permite el drenaje del muro, pero el nivel freático dentro de la instalación es elevado (Vick, 1990).

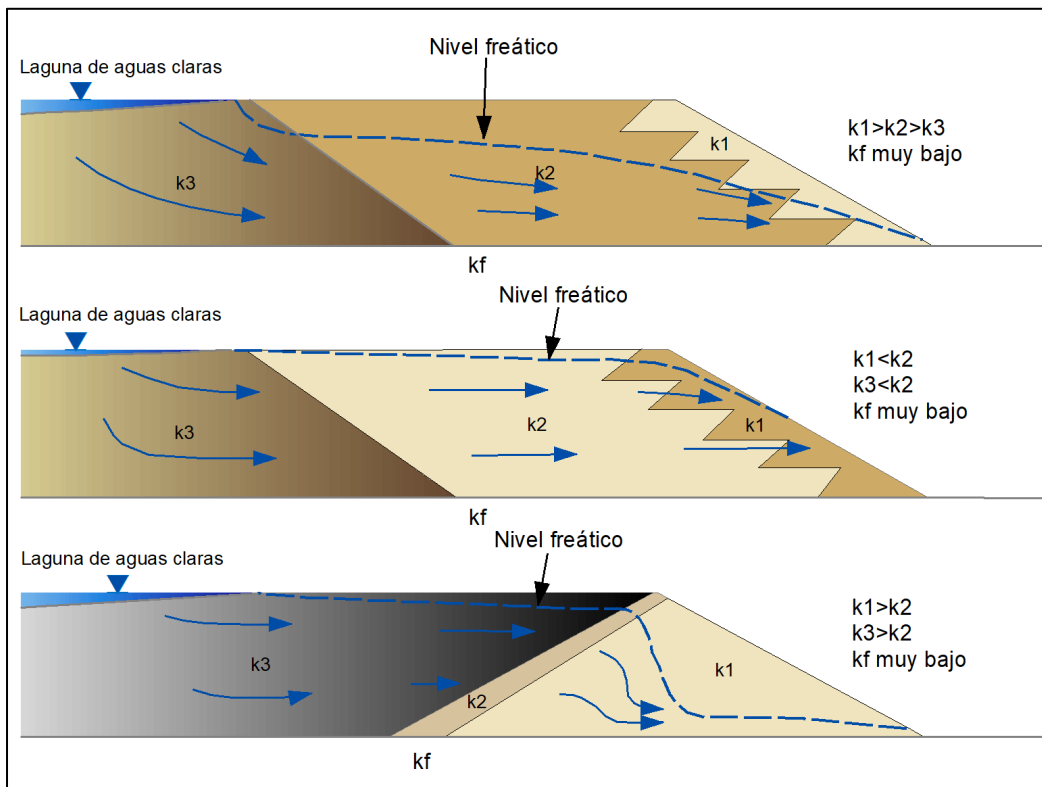


Figura 3-5. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en una presa de relaves. k_1 , k_2 , k_3 hacen referencia a conductividades hidráulicas en diferentes partes del relave, k_f hace referencia a la conductividad hidráulica del sustrato. Modificado de Vick, 1990.

3.4 Modelos numéricos de flujo

Dependiendo de la complejidad del sistema, un modelo numérico de flujo que refleje las interacciones entre el depósito y el sistema acuífero podría ser también requerido (Fortuna et al., 2021). Este modelo podría ser en dos dimensiones (una sección), en situaciones sencillas donde el modelo de flujo puede ser representado de dicha manera. Sin embargo, en situaciones con mayor complejidad, lo más apropiado es un modelo en 3 dimensiones, para reflejar todas las posibles direcciones de flujo subterráneo. Este tipo de modelos puede contemplar unidades saturadas y no saturadas, y dependiendo de la relevancia de la zona no

saturada en el modelo, podría ser necesario también incluir unidades parcialmente saturadas.

Las unidades parcialmente saturadas juegan un rol significativo en los niveles de saturación dentro de los depósitos de relaves y en su respuesta frente a un vertido inusual de agua producto de tormentas, a través de la precipitación directa o la escorrentía superficial generada, o vertidos de relaves con un contenido mayor de agua (Oldecop et al., 2008; Zandarín et al., 2008). Esto se debe a que la conductividad hidráulica de este tipo de unidades cambia según su contenido de humedad. A mayor contenido de humedad, mayor es la conductividad hidráulica, hasta alcanzar un máximo. Dicho máximo ocurre cuando la unidad se encuentra completamente saturada.

4 INTERACCIONES ENTRE LAS PRESAS DE RELAVES Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Los siguientes apartados presentan una selección de las interacciones más comunes entre los depósitos de relaves y los sistemas de aguas subterráneas.

4.1 Efectos de las propiedades hidráulicas de la fundación en la superficie freática dentro de la presa de relaves

El contraste entre la conductividad hidráulica de los materiales de apoyo o sustrato de un depósito de relaves y los materiales contenidos en él (laminas, arenas, materiales para construcción del muro), si es que estos no se encuentran hidráulicamente aislados, es determinante en la elevación del nivel freático dentro del depósito y aguas abajo de él.

La conexión hidráulica es más factible si en la base del depósito no se cuenta con elementos impermeabilizantes, como geomembranas o capas de suelo de baja permeabilidad que sean naturalmente parte de la fundación de la presa o que se hayan instalado con dicho propósito. Sin embargo, Vick (1990) señala que, incluso cuando se instalan estos elementos impermeables, se producen filtraciones.

Como señala Vick (1990), si mantenemos constantes las propiedades hidráulicas de los materiales del depósito, a mayor conductividad hidráulica del sustrato, la superficie freática será menos elevada dentro de la instalación y, por el contrario, a menor conductividad hidráulica del, la superficie freática dentro del depósito será más elevada, tal y como se ilustra en la Figura 4-1. En otras palabras, una mayor permeabilidad de la fundación favorece el drenaje desde interior del depósito.

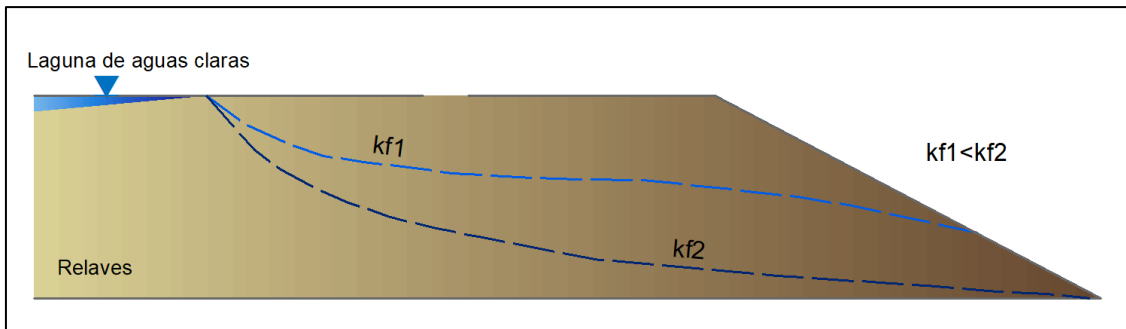


Figura 4-1. Influencia de la conductividad hidráulica de la fundación en la ubicación del nivel del agua dentro del depósito. k_{f1} y k_{f2} indican posibles conductividades hidráulicas del sustrato, siendo $k_{f1} < k_{f2}$. La línea discontinua azul claro representa el nivel freático en el interior del relave para k_{f1} , y la línea discontinua azul oscuro representa el nivel freático para k_{f2} (Modificado de Vick, 1999).

4.2 Potenciales hidráulicos y filtraciones

Las condiciones naturales del acuífero localizado bajo un depósito de relaves influyen de manera significativa en las interacciones entre ambos. Por ejemplo, si existen capas confinantes que dan origen a un potencial hidráulico positivo, existen muchas posibilidades de que las aguas subterráneas contribuyan a elevar el nivel freático dentro de la infraestructura. Por otro lado, si el potencial hidráulico de línea base en el acuífero es negativo, este potencial fomenta las filtraciones de aguas contactadas hacia el acuífero.

En términos generales, los potenciales hidráulicos positivos favorecen la recarga de agua subterránea hacia el depósito lo que eleva o mantiene el nivel freático dentro de éste. Esto puede comprometer la estabilidad de la presa, generando costos adicionales que se relacionan al manejo de un mayor volumen de agua dentro de ella. Adicionalmente, los relaves podrían dar lugar a un confinamiento parcial del acuífero, en particular si el nivel del agua subterránea es bastante somero y cercano a la base del depósito.

Por otro lado, los potenciales negativos, favorecen la infiltración de aguas contactadas hacia el acuífero, lo que puede dar lugar a cambios en la calidad de las aguas subterráneas.

El emplazamiento de un depósito de relaves puede generar cambios locales significativos en los gradientes hidráulicos de línea base. En particular, cuando una infraestructura como ésta se emplaza en un relieve topográfico relativamente plano, se pueden producir gradientes hidráulicos hacia afuera de la presa con el desarrollo de una elevación local de nivel freático superpuesto al perfil del nivel freático regional (Smith, 2021), como se observa en la Figura

4-2.

Si el nivel del agua subterránea de línea base es suficientemente somero podría desarrollarse una conexión directa entre los niveles en el acuífero y en el depósito. Sin embargo, esta conexión directa depende, en gran medida, de las unidades hidrogeológicas presentes en el subsuelo y el contraste en sus conductividades hidráulicas. Esto puede ocurrir, por ejemplo, si inmediatamente por debajo del depósito se tiene una unidad de permeabilidad mayor o igual a la unidad subyacente, tal y como se observa en el esquema superior de la Figura 4-2.

Por el contrario, si en el sustrato se observa una capa más somera de menor permeabilidad que la subyacente, dicha capa podría actuar como barrera, impidiendo la conexión directa entre las aguas del depósito y el acuífero. Sin embargo, el desarrollo de una elevación local del nivel freático es igualmente esperada, producto de la infiltración de las aguas del depósito a través de la zona no saturada inmediatamente por debajo de éste, tal como se observa en el esquema inferior de la Figura 4-2.

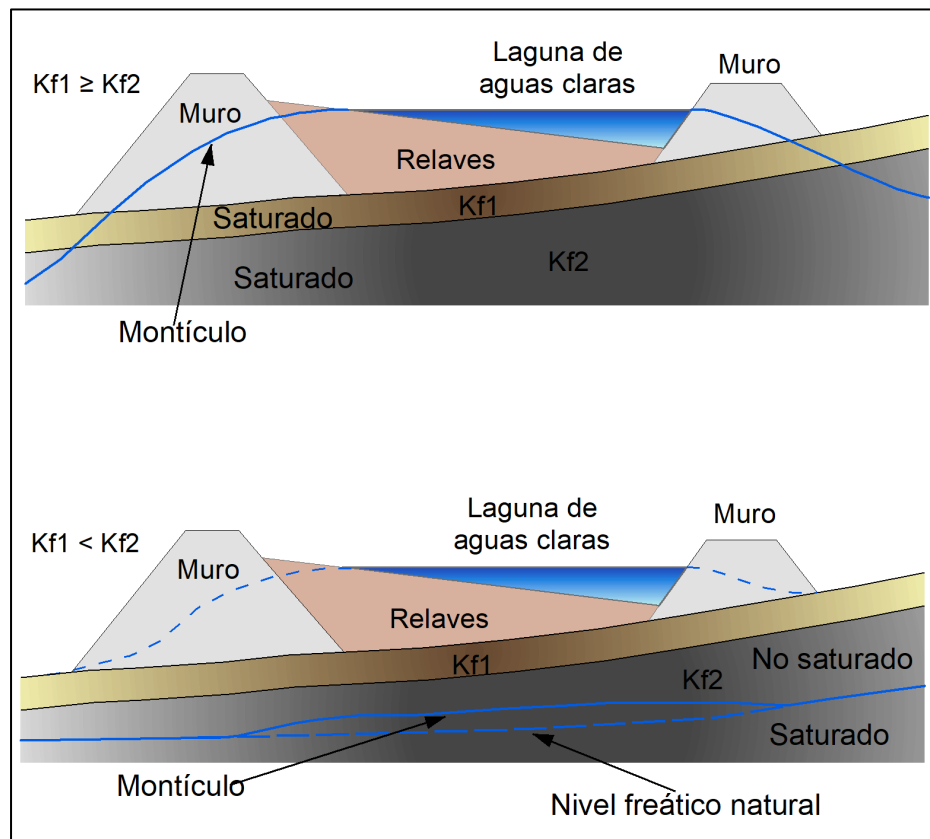


Figura 4-2. Variaciones del nivel freático producidas por la infiltración de agua procedente del depósito de relaves. $Kf1$ y $Kf2$ indican conductividades hidráulicas en capas del sustrato. Adaptado de Vick, 1990 y Savar et al., 2012.

En relieves topográficos más pronunciados, puede producirse lo que se conoce como contención hidrodinámica y que ocurre cuando el nivel freático alrededor del depósito se encuentra más elevado que el nivel máximo de la laguna de aguas claras, con lo cual los gradientes hidráulicos son, durante toda la operación, hacia el interior de la infraestructura. Según Smith (2021), esto es posible, por lo general, cuando la instalación se localiza en una zona de recarga local de aguas subterráneas. Esto reduce el potencial de migración de aguas contactadas hacia fuera de la instalación, pero a la vez permite el aumento de los niveles freáticos dentro del depósito aumentando el riesgo de inestabilidad.

4.3 Presión de poros

La presión de agua en los poros corresponde a la presión ejercida por el agua (y aire) en un medio poroso compuesto por una estructura sólida y poros llenos, o parcialmente llenos, de agua o gas. Presiones de poro positivas se encuentran en materiales saturados, mientras que, en los materiales parcialmente saturados, las presiones o succiones son negativas (Reid, 2013).

La adición frecuente de relaves en los depósitos puede incrementar las presiones de poro en los materiales ubicados inmediatamente debajo. Estas presiones de poro se suelen disipar mediante sistemas de drenajes al interior de la infraestructura o en su base en contacto con el sustrato.

La disipación de la presión de poros de los materiales de apoyo depende en gran medida de sus propiedades hidráulicas y de las del acuífero subyacente (Lyu et al., 2018). Si este acuífero es suficientemente permeable y tiene una extensión suficiente, la reducción de las presiones de poros no será un problema durante la construcción y operación del depósito. Por el contrario, si el acuífero no es suficientemente permeable o su extensión es limitada, por ejemplo, a canales o paleocanales, las presiones de poros pueden mantenerse elevadas en los materiales de apoyo e incluso pueden dar lugar a afloramiento de agua subterránea o condiciones artesianas. Esto genera riesgos para la estabilidad de la presa por aumento de carga, contribución a la erosión interna y, por favorecer condiciones desencadenantes de licuefacción.

Un alto nivel de presión de poros dentro de un depósito de relaves es uno de los factores desencadenantes de uno de los mecanismos más comunes de rotura de este tipo de infraestructuras: la licuefacción. En efecto, Rana et al., (2021) señalan que la filtración de agua subterránea hacia la presa de relaves puede generar un exceso de presión de poros, aumentando la susceptibilidad de ocurrencia de este proceso.

Los materiales de grano muy fino y con conductividades hidráulicas muy bajas (Fortuna et al., 2021), tienen una habilidad más limitada para disipar el exceso de presión de poros y podrían constituir una barrera para el drenaje de la infraestructura. Este tipo de barreras depende del contraste de permeabilidad entre dos unidades contiguas.

Asociadas a un depósito de relaves, se suelen construir una serie de obras de drenaje cuyo objetivo es reducir las presiones de poro, en particular, en zonas cuya estabilidad es más sensible al incremento de las presiones de poro, como es el caso de los muros. Aunque este tipo de obras no sean requeridas, un monitoreo continuo de las presiones de poro, al menos en las zonas más sensibles en términos de estabilidad, es siempre recomendado.

4.4 Generación de niveles colgados producto de las filtraciones

Cuando la cota de elevación de la superficie freática bajo el depósito de relaves es inferior a la cota de elevación de su base, existe una zona no saturada, a través de la cual migrarán las potenciales filtraciones desde la infraestructura hacia el acuífero. Si el apoyo de la infraestructura incluye lentejones de materiales finos arcillosos, existe la posibilidad de que se desarrollen niveles colgados saturados en agua por encima de los lentejones arcillosos como se observa en la Figura 4-3 (Vick, 199).

La presencia de estos niveles colgados será determinante en la dirección de flujo de las filtraciones, por lo que la identificación de este tipo de características geológicas, su caracterización en extensión y conectividad se hace fundamental para establecer un buen diseño que capture las filtraciones.

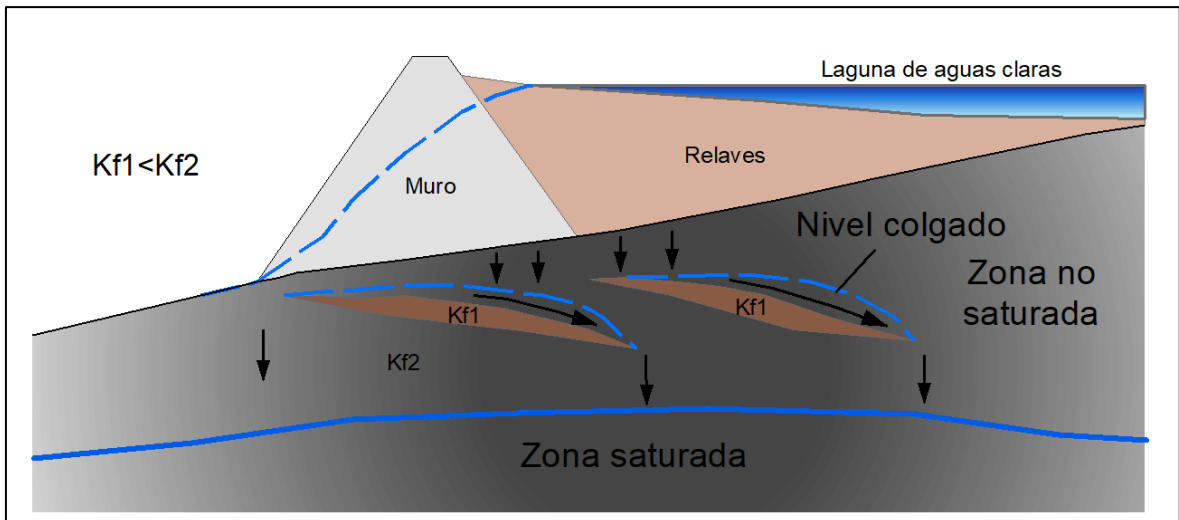


Figura 4-3. Niveles colgados en el acuífero subyacente producto de las filtraciones. $Kf1$ hace referencia a la conductividad hidráulica de lentejones arcillosos incluidos en la zona no saturada de conductividad hidráulica $kf2$. Adaptado de Vick (1990)

4.5 Interacciones geoquímicas que afectan la calidad de las aguas

Una de las interacciones hidrogeológicas más estudiadas que involucra a los depósitos de relaves, corresponde al drenaje ácido de mina, que migra desde la infraestructura, pasando por la zona no saturada, hasta llegar al acuífero y potencialmente descargar hacia las aguas superficiales. Según EPA (2000), el drenaje ácido se produce cuando los metales sulfurados se oxidan y hay suficiente agua para movilizar el ion sulfuro. Se caracteriza por aguas con bajo pH, elevada concentración de metales pesados, sulfato y sólidos disueltos totales (Durkin y Herrmann, 1994).

En esta interacción, la zona localizada entre la superficie freática y la superficie del suelo juega un rol muy importante debido a los procesos que se desarrollan en ella. La zona no saturada, definida como aquella zona del subsuelo en la que los poros se encuentran parcialmente llenos de aire y/o agua, puede dividirse a su vez en la zona vadosa y en la zona capilar. Esta última se localiza inmediatamente por encima de la zona saturada.

La zona vadosa es donde usualmente ocurre la oxidación de los sulfuros y la generación de ácidos, mientras que la zona capilar, donde la tensión superficial juega un rol fundamental (Oldecop et al., 2008), promueve la neutralización ácida y la precipitación química (Kargar et al., 2011) tal y como se aprecia en la Figura 4-4.

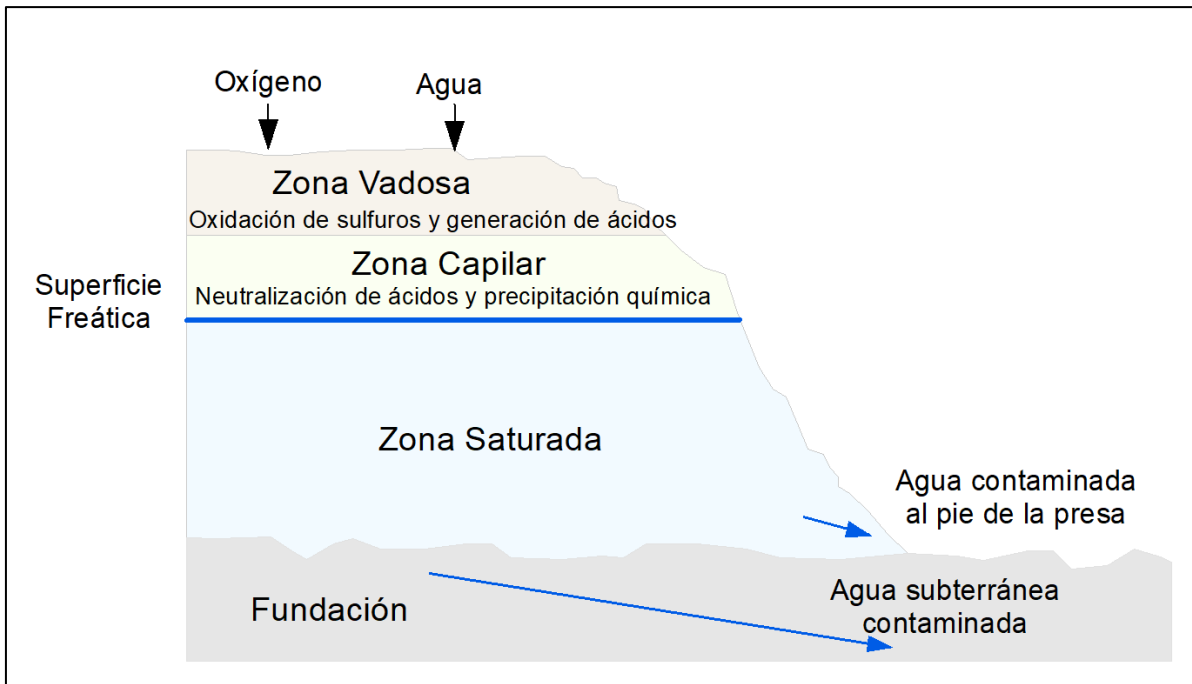


Figura 4-4. Interacciones geoquímicas producto de las filtraciones. Modificado de Kargar et al. 2012.

Como señalan Blowes et al. (1994), el pH de las aguas depende del balance de protones entre las reacciones de oxidación de sulfuros y las reacciones de disolución mineral, mientras que las reacciones tampón controlan la liberación de hierro (Fe^{2+}) y otros metales contenidos en el agua intersticial de los relaves. Este tipo de reacciones también afectan a la movilidad de estos metales.

Este tipo de interacción hidrogeológica toma especial importancia para la etapa de cierre de depósitos de relaves, pues a los factores básicos para la ocurrencia de generación de drenaje ácido (oxígeno y agua) hay que sumar el tiempo, necesario para la ocurrencia de las reacciones químicas que desencadenan este fenómeno.

Los acuíferos albergados en calizas kársticas son particularmente vulnerables a la contaminación. La construcción de un depósito de relaves sobre este tipo de litologías es bastante común en el mundo, debido a que muchas formaciones kársticas se encuentran asociadas a zonas con mineralización de interés económico (Johnson et al., 2016; Gao et al., 2019). Por otro lado, estas formaciones dan lugar a depresiones naturales en el terreno, las que permitirían el almacenamiento de grandes volúmenes de relaves a bajo costo. La vulnerabilidad de este tipo de acuíferos radica en la presencia de fisuras, dolinas y socavones (Zhang et al., 2017) que funcionan como conductos para transportar fluidos.

Smith (2021) señala que las formaciones kársticas que constituyen parte del sustrato de un depósito de relaves generan un mayor grado de incertidumbre sobre los caminos que recorrerán las potenciales filtraciones desde él, siendo más difícil de modelar el comportamiento hidrogeológico. La identificación temprana de estas de formaciones en las inmediaciones de una infraestructura de este tipo puede afectar significativamente la toma de decisiones para su construcción y diseño, y debería implicar, necesariamente, un mayor monitoreo durante la operación y medidas de mitigación para la etapa de cierre.

La Figura 4-5 presenta un diagrama típico de un depósito de relaves cuya cimentación corresponde a una formación kárstica, en la que un conducto formado por la disolución de los carbonatos, frente a condiciones climáticas específicas, favorece la movilización de contaminantes hacia aguas abajo de la presa.

El esquema de la Figura 4-5 presenta dos situaciones extremas. La situación de la izquierda ilustra lo que ocurre durante tormentas, cuando la escorrentía superficial se mezcla con el drenaje ácido de mina y con la precipitación directa. Estas aguas recargan el acuífero a través de conductos o sumideros típicos de las formaciones kársticas, mezclándose con el agua subterránea que es típica de las fisuras kársticas (elevada en carbonatos). En estas condiciones se generan grandes volúmenes de aguas contactadas que, como consecuencia de la dilución, no representan el peor escenario de la calidad de las aguas.

A la derecha de la Figura 4-5, se presenta la situación análoga, pero en la estación seca, donde no se observa dilución por la escorrentía superficial y precipitación directa, por lo que se produce un menor volumen de aguas ácidas, pero estas tendrán una mayor acidez y concentración en metales (son aguas más concentradas) con una calidad inferior a la observada durante las tormentas.

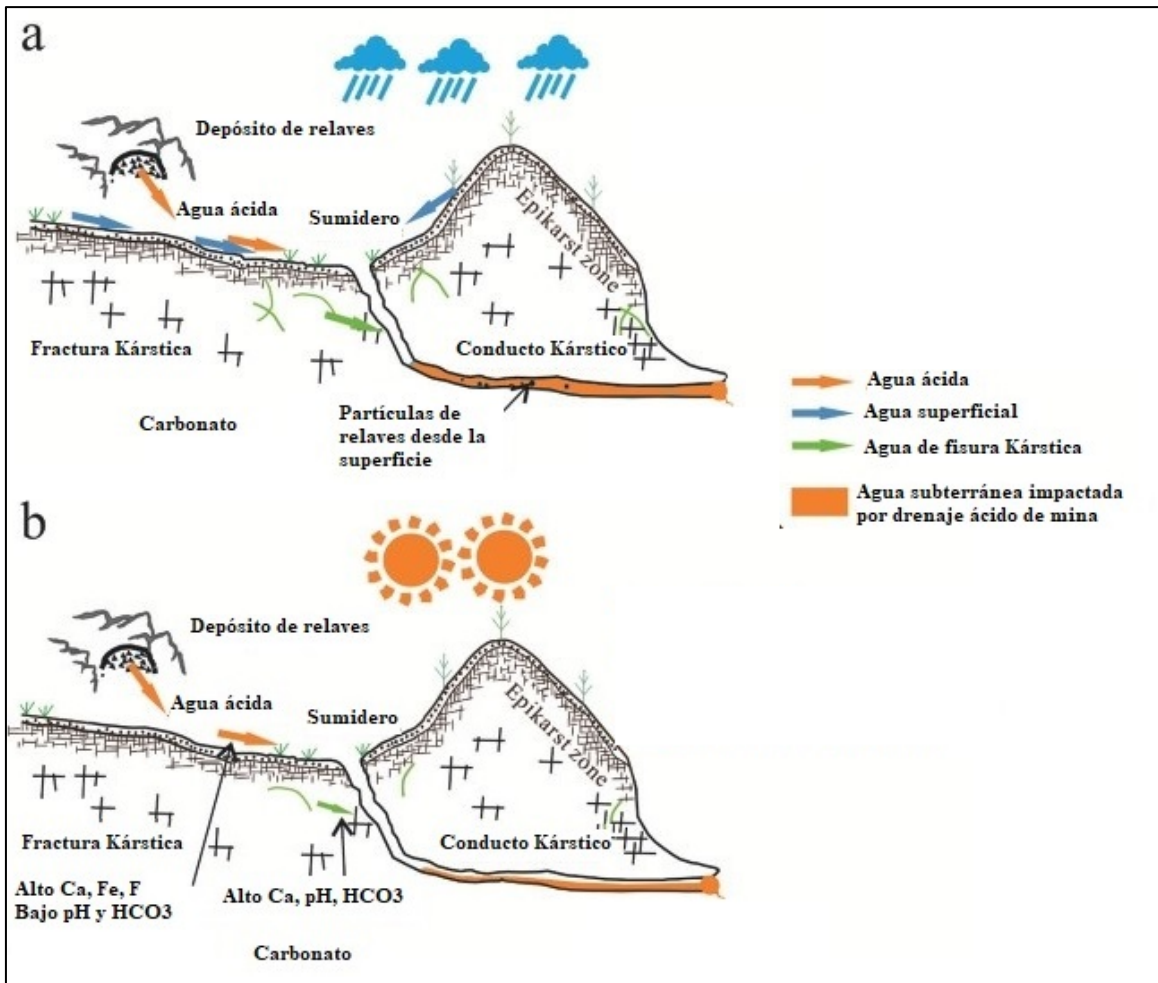


Figura 4-5. Diagrama de una presa de relaves asentada sobre una formación kárstica, mostrando dos escenarios diferentes: a) evento de tormenta b) periodo seco. Modificado de Ren et al., 2020.

4.6 Resumen de impactos hidrogeológicos asociados a las presas de relaves

Los impactos sobre los sistemas de aguas subterráneas producto de la construcción y operación de depósitos de relaves se relacionan con la recarga del sistema acuífero a través de la precipitación directa y la infiltración de agua intersticial de los relaves, la naturaleza hidrogeológica del suelo o roca de fundación, las características de la zona no saturada entre la base del depósito y la superficie piezométrica, la permeabilidad de los materiales dentro de la presa y los niveles de agua subterránea alrededor de la presa, entre otros (Dennis et al., 2008).

Los principales impactos de las presas de relaves sobre los sistemas de aguas subterráneas incluyen (Quiroz, 2011):

- Descenso o ascenso de los niveles de agua subterránea, aguas abajo de estas infraestructuras. Esto depende del balance entre las aguas que se extraen para la operación, o para mantener la superficie freática al interior de la balsa dentro de los niveles aceptables que permitan dar estabilidad a la presa, y los aportes de filtraciones de las aguas de relaves hacia el acuífero, pero también de los potenciales hidráulicos naturales y sus modificaciones, producto de la construcción de la presa.
- Estos cambios pueden producir una alteración de ecosistemas como vegas, humedales y bofedales, así como la alteración de la recarga y descarga de ríos y lagunas cercanas.
- El descenso de los niveles de agua subterránea puede afectar directamente las captaciones de aguas subterráneas aledañas, aumentando su profundidad de explotación hasta incluso dejarlos colgados (inactivos), pudiendo reducir también su productividad y, en casos extremos, generar subsidencia del terreno.
- La interacción con las aguas y materiales de los relaves puede alterar la calidad natural del agua subterránea del acuífero subyacente por la infiltración de aguas desde el depósito.
- Alteración de los patrones de recarga y descarga de un acuífero natural. En particular, una balsa de relaves puede constituir una zona de recarga local al acuífero y se espera que dicha recarga sea de una calidad inferior a la que presentan las aguas naturales del acuífero (Dennis et al., 2008).

5 CASOS DE ESTUDIO

La Tabla 5-1 presenta una selección de casos de roturas de presas de relaves en los que se reconoce algún factor hidrogeológico relacionado con la rotura, y en los siguientes apartados se detallan los factores hidrogeológicos relevantes en algunos de estos casos.

Tabla 5-1. Resumen de casos de roturas en depósitos de relaves relacionados con factores hidrogeológicos.

Nombre	País	Mena	Año	Factor hidrogeológico asociado a la rotura	Fuente
Sgorigrad	Bulgaria	Plomo y Zinc	1966	Filtración de aguas subterráneas	Rana et al., 2021
Bakofeng	Sudáfrica	Platino	1974	Nivel freático muy elevado producto de las lluvias	Oldecop et al., 2008
Arcturus	Zimbabue	Oro	1978	Aumento rápido del nivel freático producto de una tormenta	Oldecop et al., 2008
Tapo Canyon	USA	Desconocido	1994	Nivel de saturación elevado al momento de un sismo de mediana intensidad	Lyu et al., 2019
Pedro Sotto Alba	Cuba	Níquel	(1996 – 1998)	Superficie freática elevada dentro del depósito y lluvias excepcionales	Zandarín et al., 2008
Aznalcóllar	España	Sulfuros Complejos	1998	Falla en los materiales de apoyo, producto de elevadas presiones de poro	Ayala – Carcedo, 2004
Las Palmas	Chile	Oro	2010	Aumento no detectado del agua subterránea	Rana et al., 2021
Saaiplaas	Sudáfrica	Oro	2012	Superficie freática elevada en el dique, producto de un aumento rápido de la presión de poros	Blight y Fourie, 2004; Oldecop et al., 2008
Mount Polley	Canadá	Cobre y oro	2014	Falla en el apoyo por exceso de carga	Ministry of Energy and Mines, British Columbia, 2014
Fundão	Brasil	Hierro	2015	Saturación de las arenas de los relaves cerca del muro	Morgenstern et al, 2016; Roche et al, 2017
Cadia	Australia	Oro y cobre	2018	Inestabilidad de los materiales de apoyo	Rana et al., 2021

Nota: No es claro el año en que se produjo la rotura de Pedro Sotto Alba. Sin embargo, parece ser que las lluvias excepcionales de 1996 y 1998 contribuyeron a ella.

5.1 Tapo Canyon, USA - 1994

5.1.1 Contexto

Esta presa de relaves almacenaba residuos provenientes del lavado de áridos para una planta de hormigón (Oldecop et al., 2008) y se ubicaba al norte del Valle Simi en Estados Unidos. Este depósito, asentado en formaciones del Terciario, que incluyen arenas marinas, conglomerados y lutitas del Plioceno y del Mioceno tardío, sufrió una rotura desencadenada por un sismo de magnitud 6.7 ocurrido en enero de 1994, con epicentro a solo 21 km de distancia.

La rotura ocurrió dos años después de que la presa alcanzara su capacidad máxima y cesara su operación. Desafortunadamente, tras el cese de la operación, el manejo de aguas en ella se había descuidado, por lo que los relaves se mantenían saturados (Lyu et al., 2019).

La presa tenía una altura de 24 metros (m) al momento de la rotura y se emplazaba en una depresión originada en una antigua cantera. Una de las infraestructuras de drenaje que se construyó correspondía a un canal en roca que drenaba también las aguas de un río cercano. Durante el inicio de la operación del depósito, el canal fue bloqueado con residuos, dificultando, más tarde, el drenaje (Oldecop et al., 2008).

5.1.2 Factor hidrogeológico

Un factor clave en la rotura de esta presa de relaves, fue que una gran parte de los relaves y el muro de contención se encontraban saturados al momento del sismo. Se cree que al menos una parte de la fuente de esta saturación corresponde a la contribución de agua subterránea (Harder y Stewart, 1996). La ausencia de un drenaje apropiado contribuyó a los niveles de saturación dentro del depósito.

5.2 Aznalcóllar, España - 1998

5.2.1 Contexto

La balsa de relaves de Aznalcóllar / Los Frailes se localizaba en la ribera del Río Agrio, afluente directo del Guadiamar e indirecto del Guadalquivir, sobre una capa de no más de 10 m de espesor de sedimentos aluviales (Eriksson y Adamek, 2000; Ayala – Carcedo, 2004)

y desde 1979, recibía los residuos de una mina a cielo abierto de sulfuros complejos, que producía cobre, plomo, zinc, oro y plata, además de otros elementos (Ayala – Carcedo, 2004).

Este depósito de relaves, de unas 200 hectáreas (ha.) de extensión, era del tipo de cierre perimetral y su rotura se produjo en abril de 1998, generando un vertido de 2 Mm³ de lodos y 4 Mm³ de aguas ácidas, que fueron a dar rápidamente al cauce del Río Agrio (López Pamo et al., 2001; Palancar, 2001).

Los sedimentos aluviales en los que se asentaba este depósito descansan sobre una capa de margas constituidas por lodos, limos y arcillas de un espesor aproximado de 50 m en el sector en donde se emplazó la infraestructura. Estas margas son conocidas como las “margas azules del Guadalquivir” y presentan una estratificación sub-horizontal, con un buzamiento medio de 3° hacia el exterior del dique (Ayala – Carcedo, 2004). Bajo esta unidad, descansa una capa de 10 m de espesor de calizas bioclásticas y lutitas paleozoicas.

5.2.2 Factor hidrogeológico

Una rotura progresiva de corte se produjo en las margas producto de las altas presiones de poro. Esto indujo una superación del esfuerzo de corte en la superficie de rotura, la cual se vio favorecida por el buzamiento de la estratificación de esta unidad y por una diaclasa sub – horizontal (Ayala – Carcedo, 2004).

Las altas presiones de poro se originaron debido a las bajas conductividades hidráulicas tanto de los relaves como de las margas que fallaron, y también, a una pantalla de bentonita – cemento, que se construyó al pie interior del dique, como barrera para evitar las filtraciones de las aguas ácidas contenidas en la balsa hacia el Río Agrio (Ayala – Carcedo, 2004).

La rotura puso en evidencia que, durante los estudios que se realizaron para apoyar el diseño de la presa no se investigó con suficiente detalle el subsuelo. No se tomaron en consideración las condiciones hidrogeológicas y el espesor de las margas (Macklin, et al., 1999).

5.2.3 Impactos hidrogeológicos

Este desastre condujo a la contaminación de más de 50 pozos destinados a riego que estaban construidos en los depósitos aluviales aguas abajo, por lo que se prohibió la extracción de aguas subterráneas desde dichos pozos y las cosechas se perdieron por completo (Carrera et al., 2001). Afortunadamente, los pozos que no recibieron los lodos no presentaron cambios significativos en su calidad de agua (Ayala – Carcedo, 2004)

5.2.4 Remediación hidrogeológica

Un 90% de los pozos contaminados se limpiaron con cal y el agua con relaves fue bombeada. Se construyó una barrera geoquímica perpendicular al cauce del Río Agrio con calizas y compost vegetal (Carrera et al., 2001).

Para verificar los efectos positivos de la remediación, se construyeron 4 pozos de monitoreo habilitados completamente en los sedimentos aluviales, a lo largo de una transecta atravesando el acuífero. Estos pozos detectaron concentraciones elevadas históricas de Zinc (Carrera et al., 2001) producto de la minería en la zona.

Una década después del desastre se realizó un estudio de las aguas subterráneas. Los resultados publicados por Olías et al. (2012), señalan que antes del derrame de relaves, el acuífero ya se encontraba contaminado en su zona más cercana a la mina y tras 10 años, los niveles de contaminación en el acuífero albergado en depósitos aluviales del Río Agrio disminuyeron de manera significativa. Sin embargo, de igual modo se observaban pH ácidos (4 a 5) y elevadas concentraciones de zinc y aluminio. Por otro lado, en el acuífero aluvial asociado al Guadiamar, se observaban también niveles significativos de contaminación.

5.3 Mount Polley, Canadá – 2014

5.3.1 Contexto

Mount Polley es una mina a cielo abierto y subterránea para la extracción de cobre y oro, localizada en la provincia canadiense de British Columbia, cercana al Lago Polley y a la quebrada Hazeltine, que constituye un afluente del Lago Quesnel. Esta mina comenzó su producción en 1997 (Roche et al., 2017) y su operación estuvo detenida entre 2002 y 2004, tras lo cual fue reanudada tanto la operación como el vertido de relaves en su presa.

Esta presa se asentó sobre materiales sedimentarios que fueron identificados como una alternancia de capas de tills glaciares, sedimentos glaciofluviales y sedimentos glaciolacustres. Estos últimos fueron caracterizados como arcilla limosa rígida y sobreconsolidada (Ministry of Energy and Mines, British Columbia, 2014).

La presa de relaves, de una superficie aproximada de 240 ha., se rompió en agosto de 2014, liberando más de 21 Mm³ de agua y relaves (Ministry of Energy and Mines, British Columbia, 2014; Roche et al., 2017). Tras el desastre, la operación de la mina se reanudó en el 2016.

5.3.2 Factor hidrogeológico

El panel de revisores externos que investigó la rotura de la presa concluyó que su diseño no consideró la complejidad del entorno glacial del asentamiento de la infraestructura, no identificándose ni caracterizándose una capa continua de sedimentos constituidos principalmente por arcillas limosas rígidas y sobreconsolidadas de origen glaciolacustre (Ministry of Energy and Mines, British Columbia, 2014). Estos sedimentos se encontraban a más de 8 metros por debajo de la superficie del terreno (IEEIRP, 2015).

Como consecuencia del desarrollo de la infraestructura, estos sedimentos glaciolacustres fueron sometidos a una carga vertical muy elevada, incluso muy por encima de la presión de pre-consolidación. La resistencia al corte de esta unidad estaba controlada por los horizontes plásticos superiores dentro de una capa de arcillas, que perdió su resistencia al deformarse más allá de su máximo (Ministry of Energy and Mines, British Columbia, 2014).

Se concluyó, además, que no se realizó un estudio apropiado de los materiales de apoyo, sencillamente, se asumió que eran suficientemente resistentes, sin haberse realizado una caracterización geotécnica de mayor detalle (IEEIRP, 2015; Roche et al., 2017).

5.3.3 Impactos hidrogeológicos

Este accidente, aparentemente, no impactó de manera importante en la calidad de las aguas subterráneas o superficiales debido a que los relaves contenidos en este depósito no eran

generadores de ácido y su concentración de metales traza era relativamente baja (Golder Associates Ltd, 2015; Kossoff et al., 2014). Sin embargo, no existe consenso respecto a este tema y otros autores, como Lyu et al. (2019), señalan que los relaves contenían una gran cantidad de metales contaminantes, los cuales incluían níquel, plomo, cobre, manganeso y arsénico.

Sin embargo, a pesar de que probablemente la calidad de las aguas subterráneas no se haya visto significativamente impactada, como consecuencia del taponamiento de algunos cauces y de la base de los lagos con lodos vertidos tras la rotura, se estima que los patrones de flujo superficial y subsuperficial han podido verse alterados, así como las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales.

5.4 Fundão, Brasil - 2015

5.4.1 Contexto

Fundão corresponde a un depósito de relaves de la mina de hierro Germano, operada por Samarco, en el estado de Minas Gerais en Brasil. Fue construido progresivamente con el método de aguas arriba, y se localiza muy cerca de la localidad de Bento Rodríguez, a un poco más de 10 kilómetros de la ciudad de Mariana.

En noviembre de 2015, por la tarde, la presa comenzó a filtrar relaves y una hora después, se produjo su rotura, resultando en la liberación de 33 Mm³ de relaves. La villa de Bento Rodríguez, localizada inmediatamente aguas abajo, se inundó rápidamente con el flujo de lodo. 17 días después, la corriente alcanzó el Valle de los Doce Ríos viajando 650 km hasta llegar al Océano Atlántico (Roche et al., 2017).

5.4.2 Factor hidrogeológico

El diseño de la infraestructura contemplaba depositar arenas cerca del muro de contención, el cual fue construido de empréstito. Las arenas serían acomodadas de manera de formasen un contrafuerte que mantendría los materiales más finos alejados del muro. Tal y como se señala en el informe de rotura (Morgenstern et al., 2016), este diseño requería un control exhaustivo de la saturación de agua en las arenas. Sin embargo, el sistema de drenaje no funcionaba apropiadamente, producto de problemas durante la etapa final de la construcción

del muro. Por consiguiente, el nivel de saturación de las arenas comenzó a elevarse, así como también su nivel freático, contribuyendo a la licuefacción de los relaves y a la rotura de la presa.

5.4.3 Impactos

Los impactos medioambientales de la rotura de esta presa de relaves son de los más catastróficos en la historia reciente, afectando de manera significativa la cuenca de los Doce Ríos y llegando incluso a impactar ecosistemas en el Océano Atlántico.

Dentro de las referencias revisadas no se han encontrado impactos a los sistemas de aguas subterráneas asociados a la rotura de esta presa. Sin embargo, se reconoce que al verse afectados los lechos de los ríos con lodo sedimentado en su base (Roche et al. 2017), es posible que la interacción natural entre el acuífero y los ríos se haya visto afectada.

5.5 Pedro Sotto Alba, Cuba

5.5.1 Contexto

La presa de relaves de la mina de níquel Pedro Sotto Alba, localizada en la provincia de Moa en Cuba, se asentó en la llanura de inundación del Río Moa, sobre depósitos aluviales del Cuaternario (Zandarín et al., 2008). Esta presa de relaves comenzó a operarse en la década de los 70.

5.5.2 Factor hidrogeológico

Dadas las bajas permeabilidades de los relaves, los niveles del agua dentro de la cubeta se encontraban siempre elevados, y ascendiendo aún más durante eventos de precipitación extraordinarios, como los de los años 1996 (722 mm en 48 horas) y 1998 (690 mm en 12 horas), afectando a la estabilidad de la presa (Zandarín et al., 2008).

6 DISCUSIÓN

Los depósitos de relaves son infraestructuras que se construyen por etapas y gran parte de su crecimiento se realiza cuando la operación ya se ha iniciado y, por consiguiente, también el aumento en la deposición de relaves. Como consecuencia de esta construcción por etapas, su diseño suele sufrir variaciones respecto del original (Blight y Fourie, 2004), modificando las necesidades de caracterización y monitoreo de su asentamiento y de los relaves que son vertidos. Sin embargo, tras iniciar la deposición de relaves, mejorar o complementar la caracterización de su fundación se convierte en una tarea más complicada.

Las roturas de Aznalcóllar (España) y Mount Polley (Canadá) comparten un factor común. En ambos casos, la investigación geológica deficiente o incompleta de la fundación contribuyó a su rotura. En Aznalcóllar, no se consideró el espesor de las margas observadas bajo los depósitos aluviales que constituían su sustrato, ni las condiciones hidrogeológicas de las margas. Algo similar ocurrió en Mount Polley, donde no se consideró apropiadamente una capa continua de arcillas limosas encontradas unos cuantos metros bajo la superficie del suelo, las cuales eran muy sensibles a un exceso de carga.

La lección aprendida de ambos casos de estudio señala la importancia de una apropiada caracterización geológica e hidrogeológica de la fundación más allá de las unidades que se encontraran en contacto directo con la infraestructura y sus materiales. En definitiva, un buen estudio hidrogeológico previo a la construcción de un depósito de relaves debería identificar unidades que pudieran generar inestabilidad o condiciones hidrogeológicas particulares frente a las cargas crecientes que ejercerá el depósito sobre ellas.

Es universalmente reconocido que la caracterización de los relaves es fundamental durante las distintas etapas de un proyecto de depósito de relaves, así como el monitoreo de los niveles freáticos y/o presiones de poros al interior de la infraestructura lo es durante su operación. Sin embargo, la caracterización de la anisotropía en las propiedades hidráulicas dentro de una presa de relaves es una problemática menos discutida a pesar de tener un impacto significativo en el comportamiento hidrogeológico dentro del depósito de relaves.

La variación de la conductividad hidráulica a lo largo, ancho, y en profundidad de un depósito de relaves es el resultado de la combinación entre el método de descarga, la

distribución espacial de las descargas en el tiempo y los procesos de compactación y consolidación tras la deposición. El perfil de propiedades hidráulicas de una infraestructura de este tipo es primordial para definir un plan de manejo integral de las aguas dentro de la infraestructura, ya sea para prevenir un ascenso en los niveles freáticos en zonas sensibles o para la recuperación óptima de dicha agua para reutilizarla en el mismo proceso productivo.

Un ascenso en los niveles freáticos o las presiones de poro dentro de la infraestructura, y en particular, cerca del muro de contención, incide en la estabilidad y, por consiguiente, en el factor de seguridad de una presa de este tipo. La reducción de la estabilidad y del factor de seguridad de la presa pueden detener la operación, si se alcanzan niveles críticos que puedan provocar la rotura, desplazamientos diferenciales y/o licuefacción y esto puede ocurrir incluso si la vida útil de la mina no se ha completado y la capacidad máxima del depósito no se ha alcanzado.

Por otro lado, el contraste entre las propiedades hidráulicas dentro de la infraestructura y las de los materiales de apoyo o de asentamiento, es determinante en las direcciones de flujo de las aguas contactadas con los relaves, que potencialmente pueden constituir drenaje ácido de mina y contaminar el acuífero subyacente o sencillamente, modificar la calidad o las condiciones hidrogeológicas de las aguas subterráneas al infiltrarse en el sustrato. De igual modo, las características naturales del acuífero y la alteración de sus gradientes hidráulicos producto de la instalación de un depósito de relaves determinarán la interacción de estas aguas subterráneas contactadas con sistemas de aguas superficiales, como lagos y ríos.

La comprensión de los fenómenos físicos y químicos que ocurren en el acuífero natural, las interacciones entre el acuífero, el depósito de relaves y los sistemas de aguas superficiales cercanos, va a permitir una adecuada gestión de las aguas, así como una apropiada planificación del monitoreo, contención de las potenciales filtraciones, definición de planes de alerta temprana, y las alternativas de mitigación y/o remediación.

Algunos de los procesos hidrogeológicos, producto de la interacción entre un depósito de relaves y el sistema de aguas subterráneas subyacente, se desarrollan principalmente en este último. Estos procesos incluyen las filtraciones de las aguas intersticiales hacia el acuífero, el desarrollo de niveles colgados que generan un cambio en la dirección de flujo de las filtraciones, el desarrollo de elevaciones locales en el nivel freático, generando un cambio

en los gradientes y potenciales hidráulicos locales.

Por otro lado, hay algunos procesos que tienen lugar principalmente dentro de la infraestructura, como, por ejemplo, el aumento del nivel freático producto de la recarga por aguas subterráneas o de escorrentía superficial, facilitado por la carencia de un sistema de drenaje o de la instalación de sistemas impermeabilizantes que inhiben las filtraciones hacia el acuífero, pero también el drenaje de la infraestructura. Estas interacciones se traducen en un aumento de las presiones de poros, lo que, a su vez, da lugar a la reducción del factor de seguridad de la presa y empeoramiento de su estabilidad, y pueden provocar una rotura con vertido al medioambiente de relaves y aguas contactadas, generando pérdidas de vidas humanas, impactos ecológicos y elevados costos económicos.

Tres de los casos de estudio, se relacionan con deficiencias en los sistemas de drenaje de los depósitos. En el caso de Tapo Canyon, las presiones de poro se elevaron dentro del depósito producto de un bloqueo en el conducto principal de drenaje, mientras que en Aznalcóllar, se construyó una barrera impermeable de bentonita y cemento con el objetivo de evitar las filtraciones de aguas contactadas hacia el río, lo cual evitó, también, el drenaje del depósito, pero que, en contrapartida, aumentó la infiltración hacia los materiales del sustrato. Finalmente, en Fundão, la deficiencia del drenaje de la infraestructura condujo, también, a la elevación de los niveles dentro de la presa contribuyendo a la licuefacción de los relaves y la rotura.

Como una lección aprendida, los casos descritos permiten señalar que, el diseño de un depósito de relaves debe llegar a un equilibrio en el que se permita el drenaje controlado de los elementos sensibles de la infraestructura, evitando problemas de estabilidad, al mismo tiempo que se minimizan las filtraciones o el impacto de estas hacia el sistema de aguas subterráneas.

El caso de Pedro Sotro Alba, donde la rotura se produce por un aumento de los niveles freáticos dentro de la presa, producto de eventos de precipitaciones importantes, permite reconocer que los procesos hidrogeológicos no deben ser estudiados de manera aislada de otros procesos, y que el conocimiento del régimen hidrológico del lugar en donde se emplaza la infraestructura, en conjunto con el entendimiento del sistema hidrogeológico, son fundamentales para desarrollar un diseño apropiado y evitar accidentes.

Es importante destacar que es común que se instalen elementos de baja permeabilidad en la base de los depósitos de relaves, como geomembranas o geotextiles o capas de sedimentos de grano fino, de modo de evitar la filtración de aguas desde el depósito hacia el acuífero. Las infraestructuras de este tipo deben ser exhaustivamente monitoreadas durante la operación y eventualmente, durante el cierre, debido a que la adición de aguas con los relaves o producto de precipitación directa y/o escorrentía superficial, suelen aumentar los niveles freáticos al interior del depósito, inhibiéndose la disipación de presión de poros. El monitoreo debe estar ligado a un plan de emergencia que contemple las acciones a seguir en caso de que los niveles freáticos alcancen un nivel crítico.

Finalmente, el caso de Tapo Canyon recuerda que el manejo de las aguas de la presa debe, necesariamente, contemplar el cierre y post cierre, a menos que se apliquen medidas de mitigación que permitan la evasión de este tipo de controles.

7 CONCLUSIONES

Este trabajo expone una revisión del estado del conocimiento asociado a las interacciones hidrogeológicas entre depósitos de relaves y los acuíferos aledaños. Se ha realizado una revisión teórica de lo que son estas infraestructuras, los materiales que las componen, su caracterización, los principales procesos por los que este tipo de infraestructura se relacionan con su entorno y, los posibles impactos que pueden producirse en el sistema de aguas subterráneas.

El contraste entre las propiedades hidráulicas a lo largo y ancho de un depósito de relaves y con su fundación, son factores determinantes en la existencia y elevación de un nivel freático dentro de la infraestructura y la conexión hidráulica entre éste y el acuífero subyacente.

El potencial y gradientes hidráulicos de línea base de un acuífero se ven siempre afectados, aunque sea de manera local, por la instalación de un depósito de relaves. La dirección de dichos gradientes influye de manera significativa en los impactos que una infraestructura de este tipo puede ocasionar, por lo que deben ser profundamente estudiados. El desarrollo de un modelo conceptual que permita estimar las direcciones más probables de los flujos de aguas contactadas se hace necesario y eventualmente, también, un modelo numérico de flujo que permita evaluar la factibilidad de un proyecto, estimar los impactos y las correspondientes medidas de mitigación.

Una revisión de casos históricos de rotura de presas en los que algún factor hidrogeológico se vio involucrado en la rotura ha permitido reconocer la importancia de un estudio hidrogeológico de profundidad apropiada previo a la construcción y operación de un depósito de relaves. Por lo general, los factores hidrogeológicos no constituyen la principal causa de una rotura, sin embargo, contribuyen en la mayoría de los casos a que se produzca.

Entre las lecciones aprendidas tras el estudio de casos, se cuentan las siguientes:

- El estudio detallado de los materiales del asentamiento de un depósito de relaves es fundamental y debe realizarse más allá de solo los materiales que se encontrarán en contacto directo con los materiales de la infraestructura. En términos

hidrogeológicos, el enfoque debe ser el reconocimiento de unidades con características particulares que puedan funcionar como barrera hidráulica por su baja conductividad o que puedan ser susceptibles de romper o sufrir deformaciones importantes producto de su debilidad y las cargas crecientes a las que se verán sometidas.

- Las unidades de baja conductividad hidráulica dentro de la infraestructura o en su sustrato pueden funcionar como barrera hidráulica limitando el drenaje dentro de la presa, aumentando los niveles freáticos, reduciendo su estabilidad de la misma y contribuyendo a la generación de condiciones desencadenantes de ruptura.
- Basado en el modelo conceptual hidrogeológico integrado de la infraestructura proyectada y el sistema de aguas subterráneas, se debe encontrar un equilibrio en el que se minimicen las filtraciones de aguas contactadas y/o drenaje ácido hacia el acuífero y eventualmente su descarga hacia cursos de aguas superficiales y se permita la liberación de presiones de poro al interior de la infraestructura.
- La planificación de la etapa de cierre de este tipo de infraestructura es muy importante, pues a pesar de que durante el cierre no se adicione agua junto con relaves al no existir explotación, las aguas meteóricas, así como también aguas de escorrentía superficial y subterránea, podrían elevar los niveles dentro de la infraestructura pudiendo afectar la estabilidad de la presa.

8 BIBLIOGRAFIA

- Ayala – Carcedo, F.J. (2004). La rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar (España) de 1998 y el desastre ecológico consecuente del Río Guadiamar: causas, efectos y lecciones. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (4): 711-738
- APEGBC (2016). Professional Practice Guidelines - Site Characterization for Dam Foundations in BC. APEGBC Professional Practice Guidelines, V.1.2. 64 p.
- Blight, G. Fourie, A. (2004). A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. En L. Picarelli (ed), *Ocurrence and Mechanisms of Flow-Like Landslides in Natural Slopes and Earthfills*, Proceed. Int. Workshop., Sorrento, 14-16 May:19-36. Patron: Bologna.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Frind, E.O., Johnson, R.H., Robertson, W.D., Molson, J.W. (1994). Acid-neutralization reactions in inactive mine tailings impoundments and their effect on the transport of dissolved metals. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation*, 429 – 438.
- Carrera, I., Ayora, C., Alcolea, A. (2001). Barrera Geoquímica. Introducción. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 111, 229-230.
- Carvajal, M. (2018). Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. Memoria para optar al título de ingeniera civil. Universidad de Chile.
- Cosma, V., Lasc, G., Baraiac, O., Iancu, S. 2014. Construction, design, and evaluation of tailings dams for new mining projects.
- Dennis, I., Pretorius, J., van Deventer, P., Steyl, G. (2008). Methods to assess the impacts of tailings dams on the groundwater system in South Africa. *Journal of Mining and Metallurgy*, 44 A (1) 59 -66
- Dago G.S., Mermut A.R. (2013). Expansive Soils and Clays. InL Bobrowsky P.T. (eds) *Encyclopedia of Natural Hazards*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4-124>.
- Durkin, T. V., Herrmann, J.G. (1994). Focusing on the problem of mining wastes: An introduction to acid mine drainage. Reprint from EPA Seminar Publication no. EPA/625/R-95/007 “Managing Environmental Problems at Inactive and Abandoned Metals Mine Sites” presented at Anaconda, MT, Denver, CO, Sacramento, CA.
- Eriksson, N. Adamek, P. (2000). The tailings pond failure at the Aznalcóllar mine, Spain.

- Environmental issues and management of waster in energy and mineral production: proceedings of the Sixth International Conference on Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production: SWEMP 2000; Calgary, Alberta, Canada, May 30-June 2, 2000.
- EPA (2000). Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook.
- Gao, H., Xu, Z., Wang, K., Ren, Z., Yang, K., Tang, Y., Tian, L., Chen, J. (2019). Evaluation of the impact of karst depression – type impoundments on the underlying karst water systems in the Gejiu mining district, southern Yunnan, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 4673-4688 (2019)
- Golder Associates Ltd. (2015). Mount Polley Mining Corporation Post-event Environmental Impact Assessment Report. Appendix F: Mount Polley Tailings Dam Failure – Surface Water Quality Impact Assessment. pp. 1653–1984.
- Harder, L. F., Stewart, J. P. (1996). Failure of Tapo Canyon Tailings Dam. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 10, no. 3, pp. 109-114, 1996.
- ICOLD, 2001. Tailings dams. Risks of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121.
- IEEIRP (2015). Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel (2015). The Report on the Mount Polley Tailings Storage Facilities Breach. Vancouver, Province of British Columbia.
- Johnson, AW., Gutierrez, M., Gouzie, D., Rex McAliley, L. (2016). State of remediation and metal toxicity in the tri-state Mining District, USA. *Chemosphere* 144: 1132 – 1141.
- Kargar, M., Khorasani, N., Karami, M., Rafiee, G-R., Naseh, R. (2012). Study of Aluminum, Copper and Molybdenum Pollution in Groundwater Sources Surrounding (Miduk) Shahr-E-Babak Copper Complex Tailings Dam. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 5, 278-282.
- Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., Hudson-Edwards, K.A., 2014. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Appl. Geochem.* 51, 229–245.
- Liang, J. And Elias, D. (2010). Seismic Evaluation of Tailing Storage Facility. Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference, Perth, Western Australia.
- Liu, C., Shen, Z., Gan, L., Xu, L., Zhang, K., Jin, T. (2018). The Seepage and Stability Performance Assessment of a New Drainage System to Increase the Height of a

- Tailings Dam. *Applied Sciences* 8 no. 10: 1840.
- López Pamo, E., Baretino, D., Ortiz, G., Arranz, I.C., Martínez Pledel, B. y Martín Rubi, J.A. (2001). Cartografía y cubicación de los lodos mineros vertidos en la cuenca del río Guadiamar y su caracterización química y mineralógica. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcollar*. Boletín Geológico y Minero, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 95-102.
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., Cao, J. (2019). A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering* 2019: 1-18.
- Macklin, M.G., Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, H. E. (1999). Physical stability and rehabilitation of sustainable aquatic and riparian ecosystems in the Rio Guadiamar, Spain, following the Aznalcóllar mine tailings dam failure,” in *Mine Water and Environment, International Congress*, pp. 13–17, International Mine Water Association, Wendelstein, Germany, 1999.
- MEND, 2017. Study of Tailings Management Technologies. MEND Report 2.50.1
- Ministry of Energy and Mines, British Columbia (2014). Mount Polley Mine. Tailings Storage Facility Breach.
- Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., Watts, B. D. (2016). Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 25 de Agosto de 2016 Crey Gottlieb Steen and Hamilton.
- Oldecop, L. Zabala, F., Pacheco, R. L., Libardi, L. (2008). Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros. *Conference L V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos at: Tucumán Argentina*.
- Olías, M., Moral, F., Galván, L., Cerón, J. C. (2012). Groundwater contamination evolution in the Guadiamar and Agrio aquifers after the Aznalcóllar spill: assessment and environmental implications. *Environmental monitoring and assessment*, 184(6), 3629-364
- Palancar, M. (2001). Marco Hidrológico. En Carrera y Mediavilla eds. *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcollar*. Boletín Geológico y Minero, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 24-48.
- Priscu, C. (1999). Behavior of mine tailings dams under high tailings deposition rates. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the degree of Doctor of Philosophy, McGill University.

- Quiroz, G. (2011). Metodología para realizar una evaluación hidrogeológica ambiental de un proyecto minero de sulfuros de cobre. Aplicación a un estudio de caso. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Rana, N. M., Ghahramani, N., Evans, S. G., McDougall, S., Small, A., Take, W. A. (2021). A Comprehensive Global Database of Tailings Flows. Dataverse, V2.
- Reid M.E. (2013). Pore-Water Pressure. In: Bobrowsky P.T. (eds) Encyclopedia of Natural Hazards. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. <http://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4-272>
- Ren, K., Zeng, J., Liang, J., Yuan, D., Jiao, Y., Peng, C., Pan, X. (2020). Impacts of acid mine drainage on karst aquifers: Evidence from hydrogeochemistry, stable sulfur and oxygen isotopes. *Science of The Total Environment*, Volume 761, 2021, 143223, ISSN 0048-9697.
- Rico, M. Benito, G. Salgueiro, R. Diez-Herrero, A. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 152, Issue 2, 2008, Pages 846-852, ISSN 0304-3894.
- Roche, C., Thygesen, K., Baker, E. (Eds.) (2017). *Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. A UNEP Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal.
- Ruiz, E., Huamani, L., Paucar, J., Larota, J., Jimenez, C., Gallo, Y. (2021). Planning the Dewatering of a Tailings Storage Facility. *Mine Water and Environment* (2021) 40: 270 – 284.
- Savard, M., Ahad, J., Gammon, P., Calderhead, A. (2012). A local test study distinguishes natural from anthropogenic groundwater contaminants near an Athabasca Oil Sands mining operation. 124 p.
- Shoenberger, E. (2016). Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. *Resources Policy* 49, pp. 119-128.
- Smith, L. (2021). *Hydrogeology and Mineral Resource Development. The Groundwater Project Guelph, Ontario, Canada*. 69 p.
- Stratchan y Goodwin (2015). *The role of water management in tailings dam incidents. Proceeding Tailings and Mine Waste 2015*. Vancouver, BC.
- Vick, S. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. 381 p.
- USCOLD. (1994). *Tailings Dam Incidents*.
- Zandarín, M.T. Oldecop, L. Rodríguez, R. (2008). Stability of a tailings dam considering the hydro-mechanical behavior of tailings and climate factors. I *Unsaturated Soils:*

Advances in Geo-Engineering Publisher: Taylor & Francis Group, London.

Zhang, L.K.M Qin XQ, Tang, J.S., Liu, W., Yang, H. (2017). Review of arsenic geochemical characteristics and its significance on arsenic pollution studies in karst groundwater, Southwest China. *Appl Geochem* 77: 80-88.