



IV SEMINARIO SOBRE DEPÓSITOS DE JALES

ASPECTOS DE PROYECTO

Presenta: Mtro. Ing. Óscar Vega Roldán



CIEPS

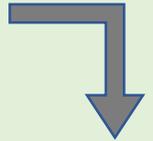
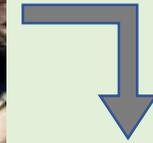
INTRODUCCIÓN

Las partículas finas de desecho que llamamos *jales* (del náhuatl *xalli* = arena), provenientes de procesos minero-metalúrgicos de obtención de minerales, suelen quedar contenidas en un medio acuoso, lo que facilita su desalojo y transporte por medio de canales o tuberías desde la planta hasta su depósito final.

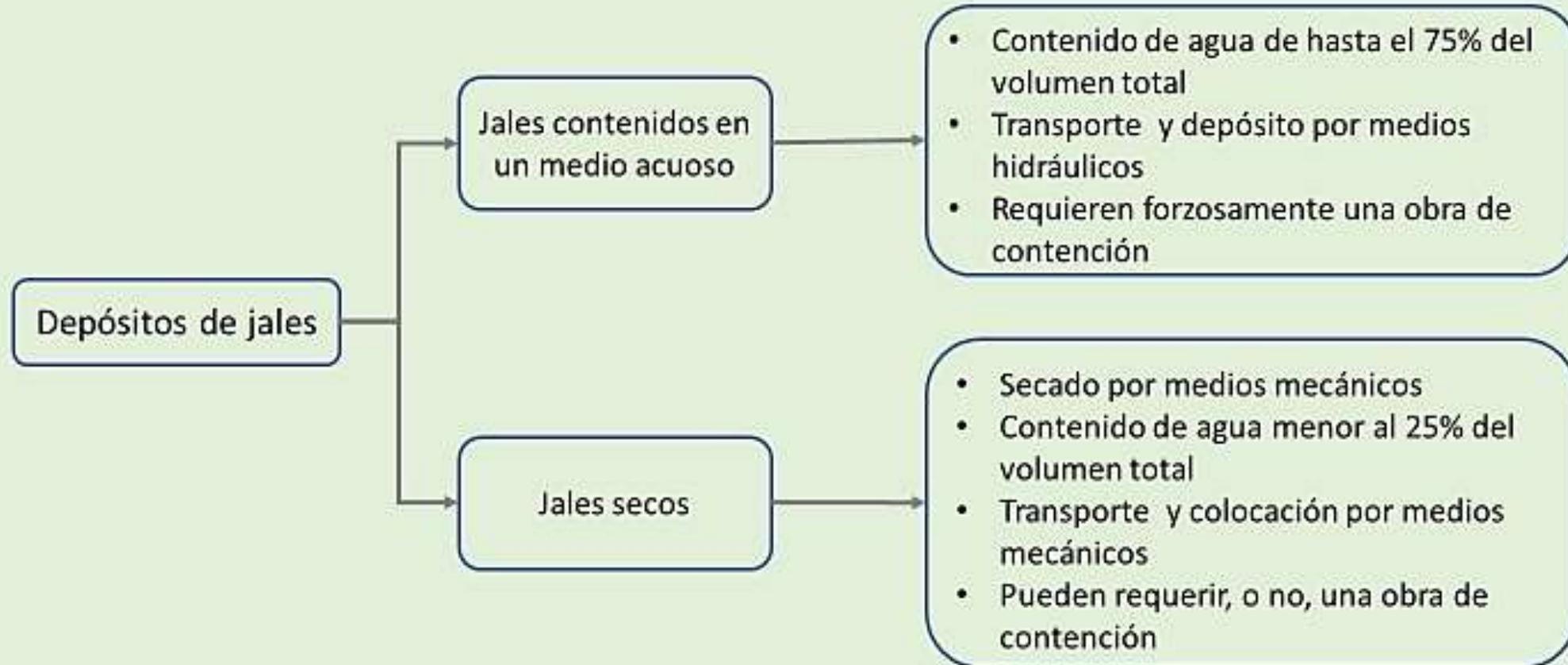
El depósito final de los jales puede hacerse de dos maneras, aunque siempre con el propósito de retener el residuo de forma segura, y también de recuperar la mayor parte del agua posible, para reutilizarla.

La manera más usual es crear un almacenamiento de los jales con el agua que los contiene, y dejar que las partículas en suspensión se sedimenten, lo que conduce a la formación de lagunas de agua en la superficie, desde donde es posible recuperarla.

La segunda manera consiste en someter a los jales a algún proceso de secado previamente a su disposición final.

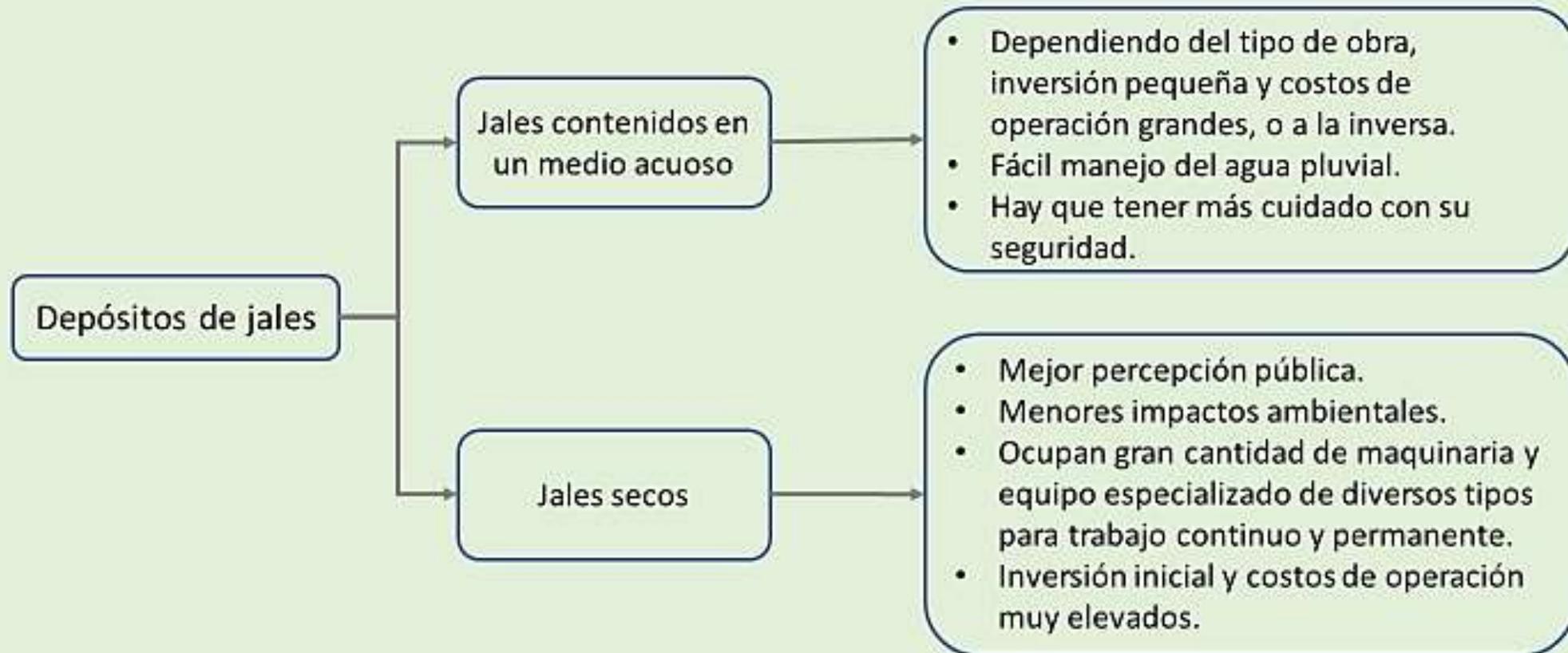


Tipos de depósitos de jales





Algunos aspectos importantes de los diferentes tipos de depósitos de jales



Los costosos procesos mecánicos de secado de los jales mediante espesadores y filtrado, así como los de su transporte, depósito y compactación, pueden imposibilitar su aplicación práctica para minas de gran tamaño que tienen altas tasas de producción.

Finalmente, aunque en algunos casos, dependiendo de las circunstancias, la elección entre un sistema de disposición de los jales puede ser bastante obvia, en muchos otros es necesario hacer un análisis comparativo de las diferentes soluciones, tan sencillo o detallado como el caso lo requiera, estudiando los costos y beneficios de cada uno, para poder tomar la mejor decisión.

En esta plática me limitaré a tratar algunos aspectos de proyecto de los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso (presas de jales), en especial de aquellos cuya obra de contención es una cortina de tierra y enrocamiento obtenidos de bancos de préstamo, que en muchos aspectos se asemejan a las presas de almacenamiento de agua.



PRESAS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y DE JALES

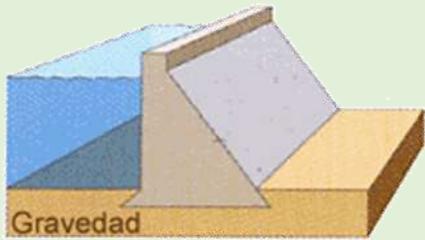
Presas de almacenamiento de agua

Se diseñan para ser operadas a lo largo de un período económico de diseño de 50 o 100 años, conocido como *vida útil* y son destinadas a diferentes propósitos como irrigación, control de avenidas, generación de energía eléctrica y abastecimiento de agua potable. La presa es una barrera que se construye en un estrechamiento topográfico llamado *boquilla*, y el espacio en el que el agua almacenada se embalsa es un *vaso*. Coloquialmente se usa el término *cortina* para referirse a la presa como estructura. En general, las presas se pueden construir de concreto o con materiales naturales sueltos.

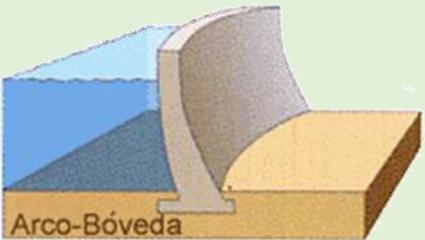
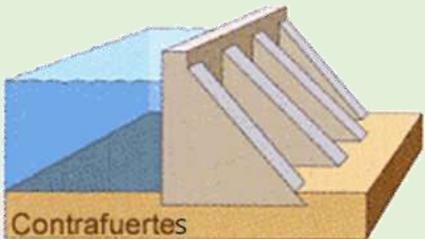
Clasificación de las presas de almacenamiento de agua



Presas de concreto (Ejemplos)



Gravedad: Huites, Sinaloa



Contrafuertes: Las
Vírgenes, Chihuahua



Bóveda cilíndrica (arco): La Angostura, Sonora

Presas de materiales sueltos (Ejemplos)



Presas Malpasso,
Chiapas



Presas El Infiernillo,
Michoacán

Depósitos de jales contenidos en un medio acuoso

A diferencia de las presas de almacenamiento de agua, los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso se van construyendo a lo largo de los años, conforme la producción de la mina lo requiere, se cierran cuando se alcanza su capacidad máxima de retención de jales, y perduran en el ambiente en esas condiciones durante un tiempo indefinido.

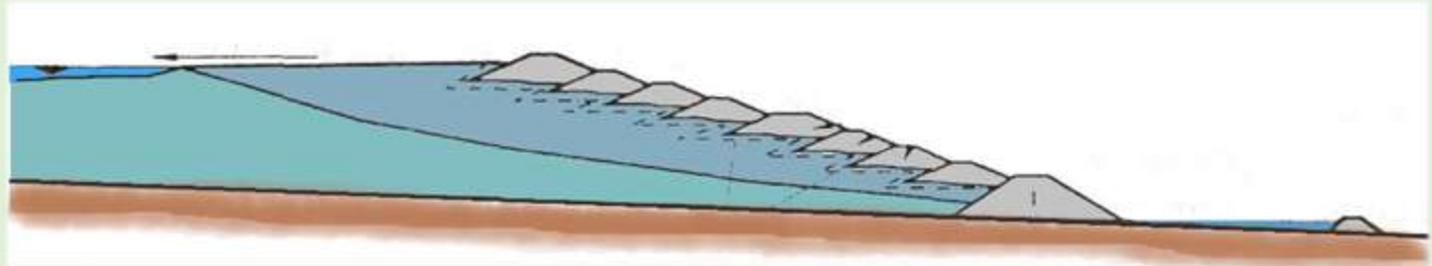
Los materiales y métodos de construcción utilizados para erigir las obras de contención o cortinas dependen de las características particulares del sitio seleccionado, de la disponibilidad de materiales y de las políticas financieras y operativas de la empresa minera.

Clasificación de los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso

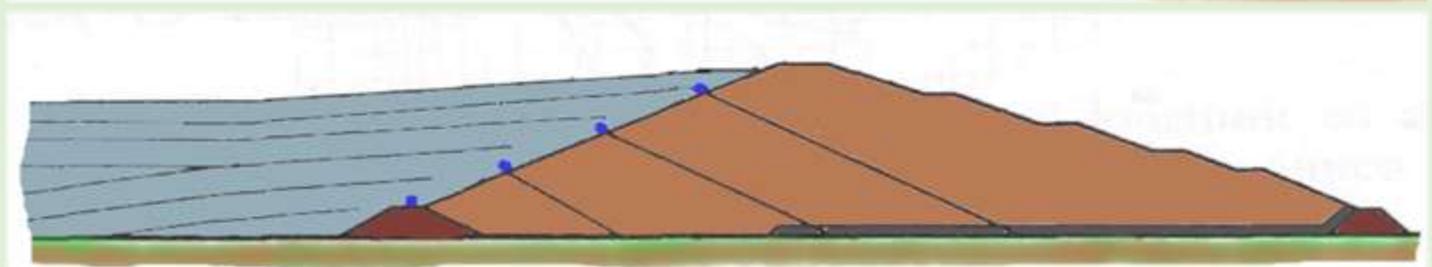


Depósitos de jales contenidos en un medio acuoso - Obra de contención formada por los propios jales

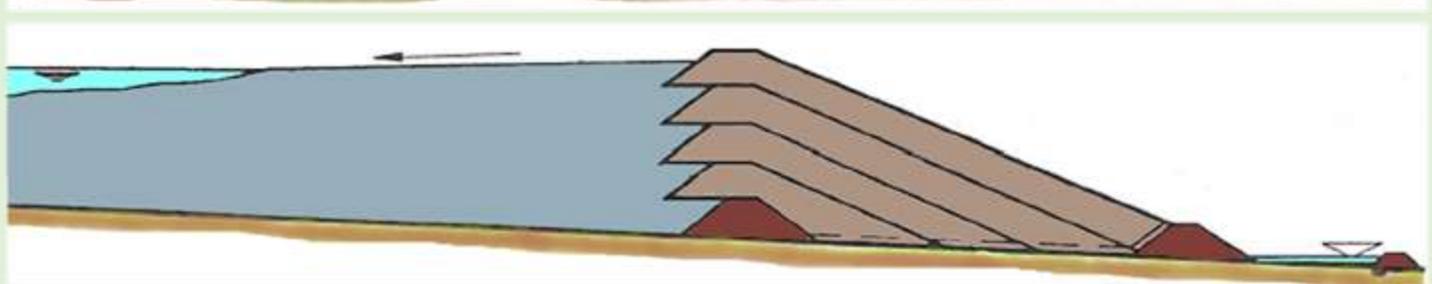
Método de aguas arriba:



Método de aguas abajo:

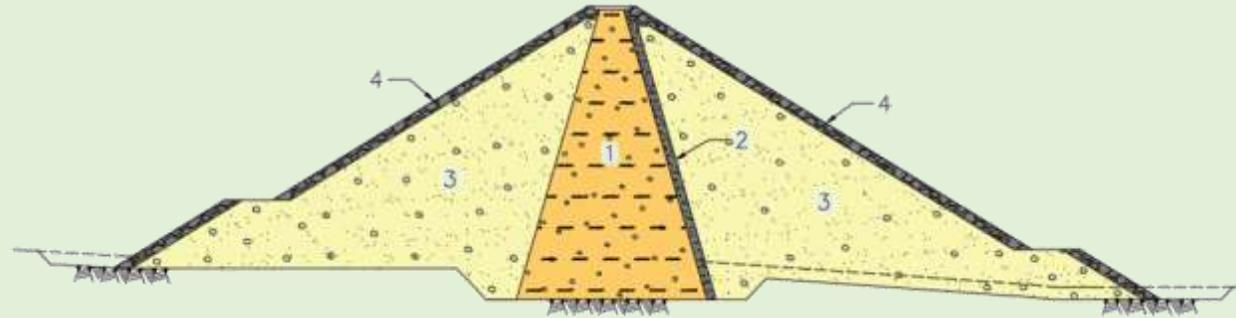


Método de línea central:



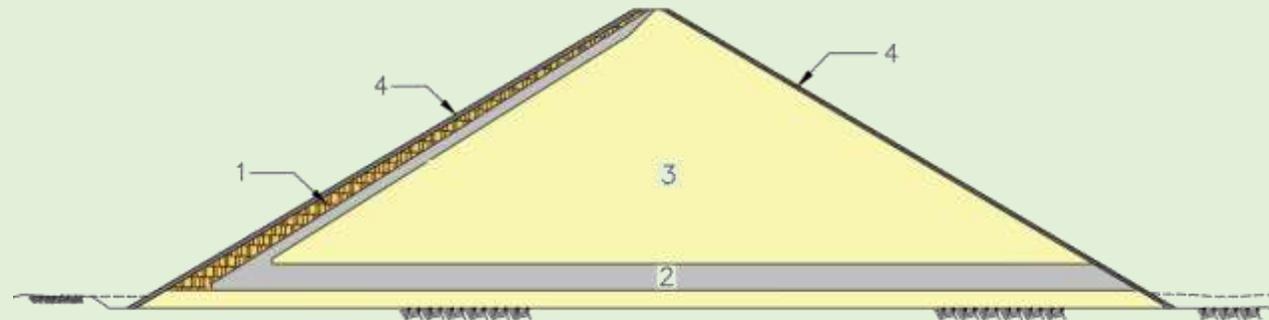
Depósitos de jales contenidos en un medio acuoso - Obra de contención formada por tierra y enrocamiento provenientes de bancos de préstamo

Cortina impermeable:



1. Corazón impermeable
2. Filtro de grava – arena
3. Material de rezaga
4. Chapa de enrocamiento

Cortina drenante:



1. Núcleo semipermeable
2. Dren de salida
3. Cuerpo de la cortina
4. Chapa de enrocamiento

Obra de contención (cortina) construida con jales vs obra construida con materiales de banco

Punto de comparación	Cortina construidas con jales	Cortina de materiales de banco
Mayor estabilidad de la estructura		✓
Métodos de diseño y construcción mejor estudiados, documentados y comprobados		✓
Mejor control de las propiedades físicas de los materiales		✓
Mejor control de calidad de la construcción		✓
Mayor resistencia a los efectos de eventos extraordinarios como grandes tormentas y sismos		✓
Menores riesgos por la ocurrencia de fenómenos como asentamientos, tubificación y licuefacción		✓
Construcción independiente de la producción y tamaño de las partículas de jales		✓
Costos de construcción menores	✓	



SEGURIDAD DE LAS OBRAS

Algunos aspectos de seguridad estructural e hidráulica

La seguridad de los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso tiene que ser mayor aún que la de las presas de almacenamiento de agua, pues, cuando llega a fallar una de éstas, los daños pueden consistir en la pérdida de vidas humanas y la destrucción de bienes por el escurrimiento incontrolado y las inundaciones que causa, pero el agua sigue su curso y las inundaciones desaparecen. En cambio, si la descarga es de agua con jales, además de los daños por escurrimiento e inundaciones, se provoca la contaminación duradera de los terrenos inundados y de las corrientes de agua de aguas abajo, por la permanencia de los jales en ellos.

Por lo anterior debe diseñarse y construirse la obra de contención de los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso cuidando muy especialmente

- Que no llegue a derramar sobre la cortina, lo que produciría daños a la propia estructura además de los que el flujo de los lodos de jales pueda producir aguas abajo.
- Que se evite cualquier posibilidad de rotura de la cortina, pues el flujo de los lodos de jales sería brusco y repentino, muy abundante y muy destructivo.

Esto lleva a tomar muy en cuenta la posible ocurrencia de fenómenos extraordinarios.



La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres utiliza la siguiente definición de *Riesgo*:

RIESGO

Es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad.

AMENAZA

Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

VULNERABILIDAD

Son las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.

Con los factores mencionados se compone la siguiente fórmula de riesgo:

$$\text{RIESGO} = \text{AMENAZA} \times \text{VULNERABILIDAD}$$

Por su parte, los factores que componen la vulnerabilidad son la exposición, la susceptibilidad y la resiliencia, expresando su relación en la siguiente fórmula:

$$\text{VULNERABILIDAD} = \text{EXPOSICIÓN} \times \text{SUSCEPTIBILIDAD} / \text{RESILIENCIA}$$

Exposición es la condición de desventaja debido a la ubicación, posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo.

Susceptibilidad es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso.

Resiliencia es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas.



Para el sistema compuesto por los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso y su entorno:

- Las amenazas principales pueden ser los eventos extraordinarios consistentes en:
 - la ocurrencia de una gran tormenta y, si la obra está en el curso de una corriente de agua, la gran avenida que se produzca, así como
 - la ocurrencia de un sismo de gran intensidad en el sitio de la obra.
- La vulnerabilidad proviene de:
 - la exposición, consistente en la posición de la obra en relación con la aparición de las amenazas y en relación con su entorno, que puede consistir en poblaciones y bienes que sufrirían daños muy grandes en caso de una falla,
 - la susceptibilidad, que es la posibilidad de falla estructural, mayor en los casos de obras de contención ejecutadas con los propios jales, en especial las construidas por el método de aguas arriba, y
 - la resiliencia, que es la capacidad de la obra de resistir los embates de una amenaza, dada por la obra de excedencias y la estabilidad de la cortina, y la capacidad del entorno de resistir y adaptarse a los efectos de un derrame o de la rotura de la cortina.



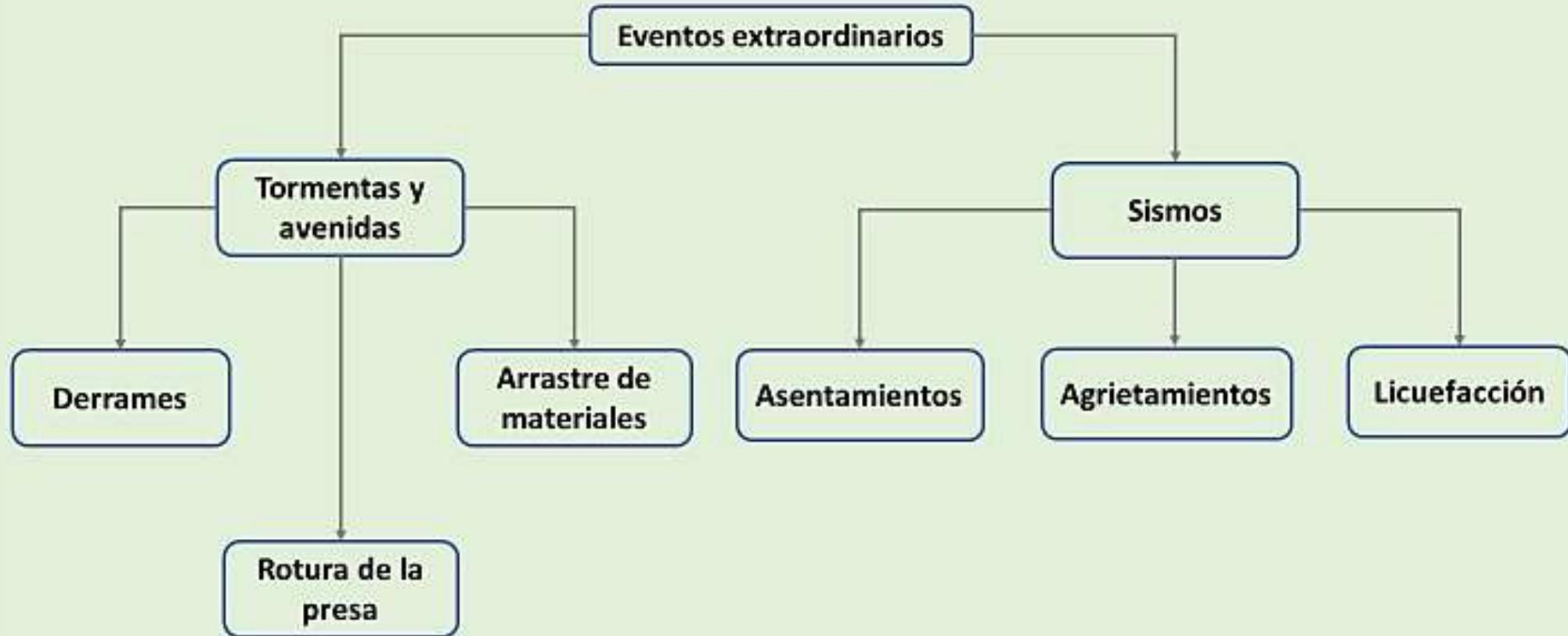
Las consideraciones anteriores explican las recomendaciones generales de utilizar la Precipitación (y en su caso la Avenida) Máxima Posible, así como el Sismo Máximo Creíble, para el diseño de las obras de contención de los jales contenidos en un medio acuoso.

No siendo en general posible calcular las magnitudes de esos eventos, que corresponden a valuaciones determinísticas que consideran la ocurrencia simultánea de todos los factores negativos en su máxima expresión, se acepta utilizar como equivalentes los fenómenos con una probabilidad de excedencia anual de 0.0001, lo que es lo mismo que decir que tienen un “tiempo de retorno” de 10,000 años.

En efecto, los depósitos de jales van a permanecer en su sitio por un tiempo indefinido después de su cierre. Ese tiempo se considera de 1,000 años o más como período de diseño, según las normas de los países que lo establecen y un evento con tiempo de retorno de 10,000 años tendría aproximadamente un 10% de probabilidad de presentarse o ser excedido en ese tiempo.

En el caso del sismo, la recomendación de usar $T_r = 10,000$ años puede suavizarse, si la vulnerabilidad del entorno es baja.

Eventos extraordinarios y sus efectos posibles





Prevención de riesgos

Desde el punto de vista del proyecto, además de considerar en el diseño todos los factores de amenazas y vulnerabilidad que hemos mencionado, deben establecerse especificaciones de construcción que estipulen claramente aspectos como los siguientes:

- Selección cuidadosa de los materiales de construcción.
 - En el caso de los jales es muy importante la granulometría, la densidad y la permeabilidad, pero también la poca posibilidad de licuefacción. Pueden influir el tipo de la roca original y los efectos del tratamiento químico.
 - En el caso de los materiales de banco de préstamo, cuidar su resistencia a esfuerzos normales y cortantes, y también a la abrasión y al intemperismo.
- Colocación cuidadosa de los materiales
 - Para asegurar la resistencia al deslizamiento, cuidar especialmente el contenido de agua utilizado y el grado de compactación que se obtenga.
 - Para dar las condiciones de permeabilidad o de impermeabilidad requeridas, cuidar la granulometría y también la compactación.





Sistema de inspección y monitoreo

El proyecto debe completarse con un proyecto de instrumentación para mantener un buen conocimiento del comportamiento de la obra y prevenir posibles desastres.

El conjunto de dispositivos de monitoreo puede incluir:

- Piezómetros para medir la presión de poro dentro de la cortina
- Pozos de observación del nivel del agua dentro de los jales
- Extensómetros y clinómetros para observar las deformaciones de la estructura
- Testigos superficiales para revisar los asentamientos
- Acelerógrafos que permitan comprobar los movimientos del terreno en caso de sismos
- Elementos aforadores en las salidas de los drenes

Conviene establecer en el proyecto un programa de revisión de la obra, con visitas periódicas y medición de los diversos parámetros de interés para poder comparar el comportamiento de la obra con lo esperado según proyecto y, en su caso, tomar las medidas preventivas o correctivas que se requieran.

IMPACTOS AMBIENTALES

Efectos de los depósitos de jales en el medio ambiente

El proyecto debe prever los efectos contaminantes inherentes a todo depósito de jales contenidos en un medio acuoso y proponer las medidas que permitan eliminarlos o, al menos, reducirlos.

Un efecto contaminante de consideración es en la atmósfera, por la generación de polvo con características tóxicas que es transportado por el viento. El peligro puede eliminarse cubriendo los jales con vegetación o con una capa de material resistente a la erosión eólica. Cuando es posible, hay que mantener cierta humedad en los jales para limitar la cantidad de polvo que el viento es capaz de movilizar.



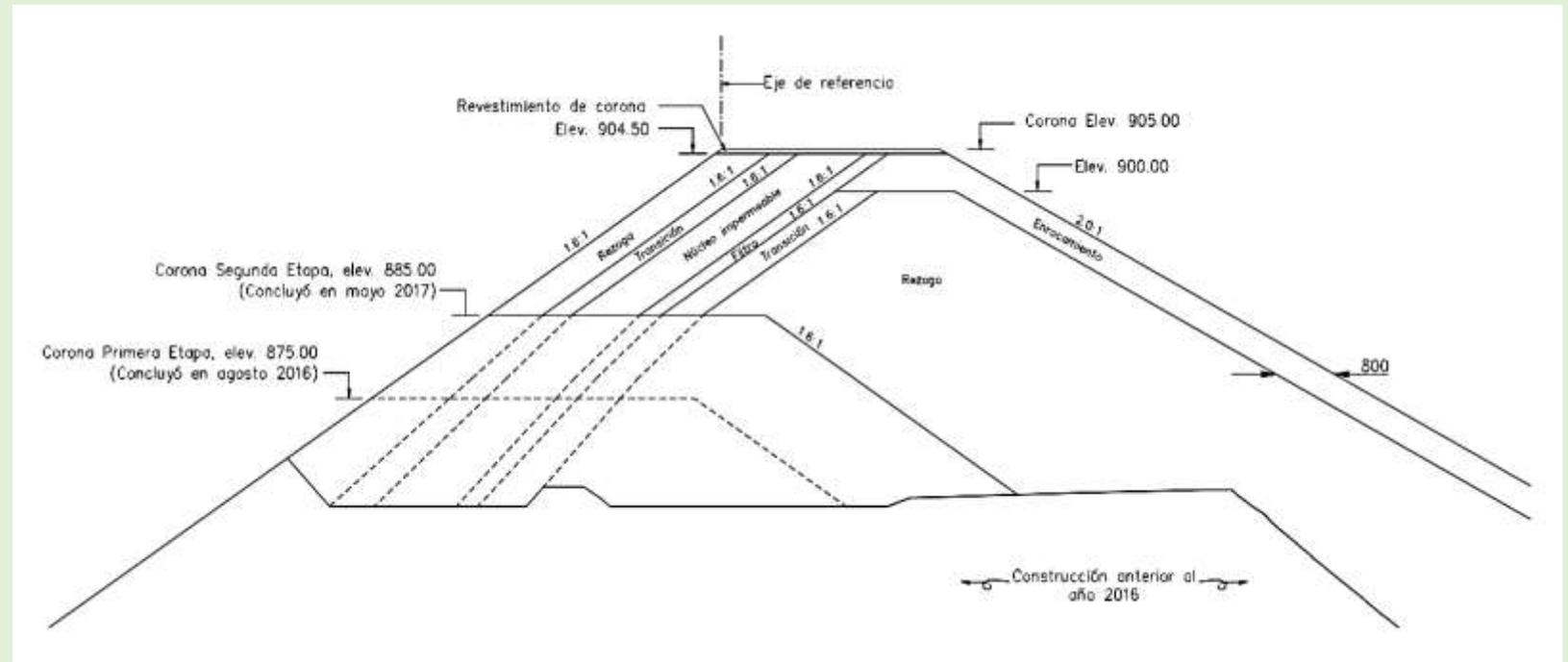
Contaminación de acuíferos

En las regiones áridas, donde los recursos hídricos superficiales son escasos y limitados, el agua subterránea constituye una la fuente principal para el abastecimiento. En estos casos, en la ubicación y control de los depósitos de jales se debe reconocer el impacto potencial al que estarán sujetos los sistemas de flujo de agua subterránea. Por ello es necesario evaluar el riesgo de contaminación de un acuífero ocasionado por la presencia de contaminantes originados a partir del depósito de jales.



EJEMPLOS DE DEPÓSITOS DE JALES CON CORTINA DE MATERIALES DE BANCO

Presas 7, La Caridad - Cortina impermeable



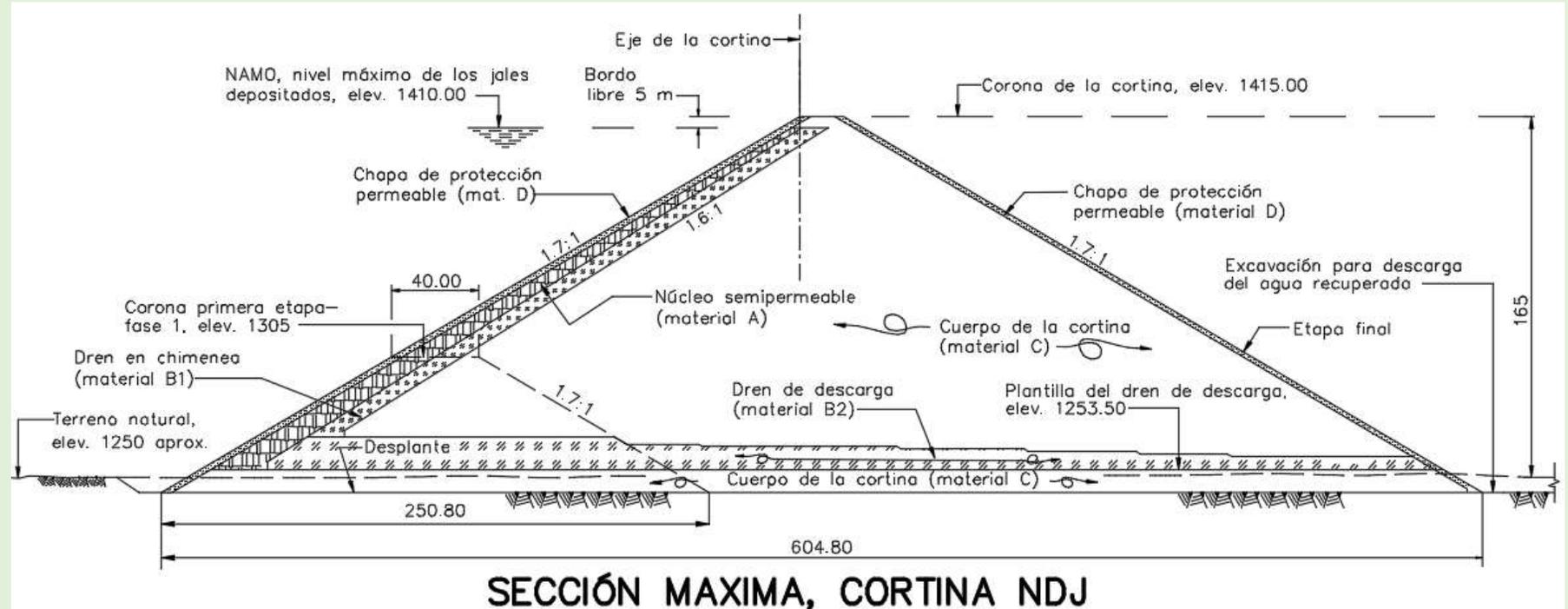
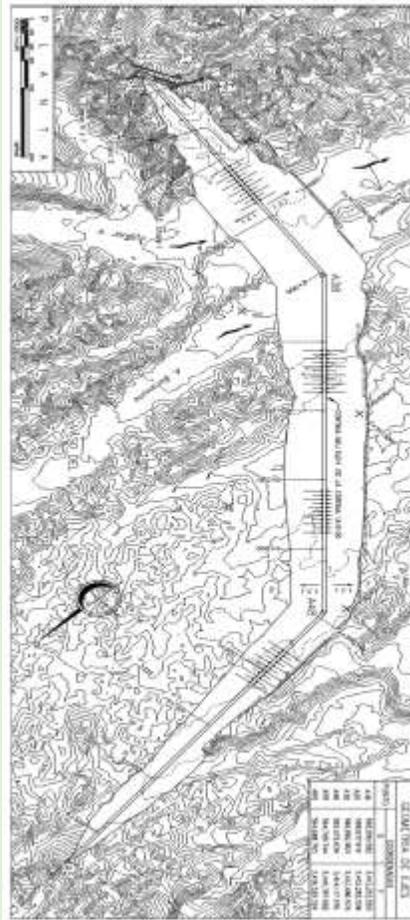


Presas 7, La Caridad - Cortina impermeable



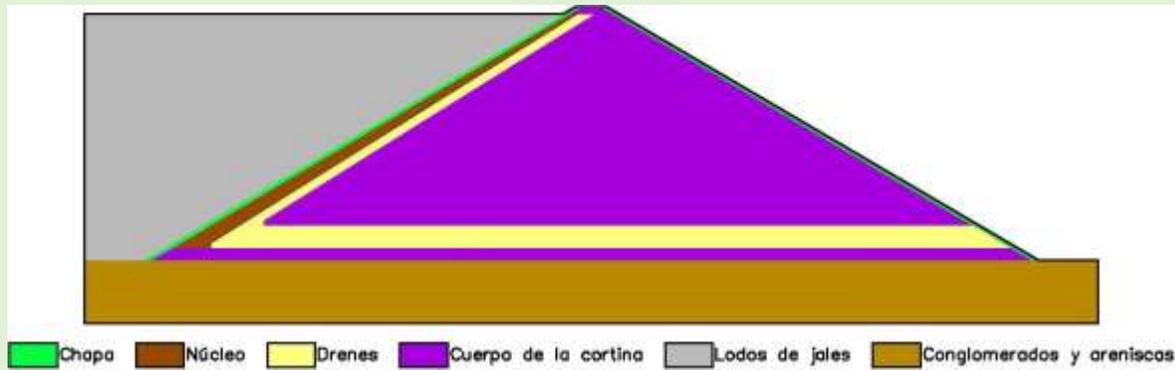
BUENAVISTA DEL COBRE, CANANEA

Nuevo Deposito de Jales (NDJ) – Cortina filtrante y drenante

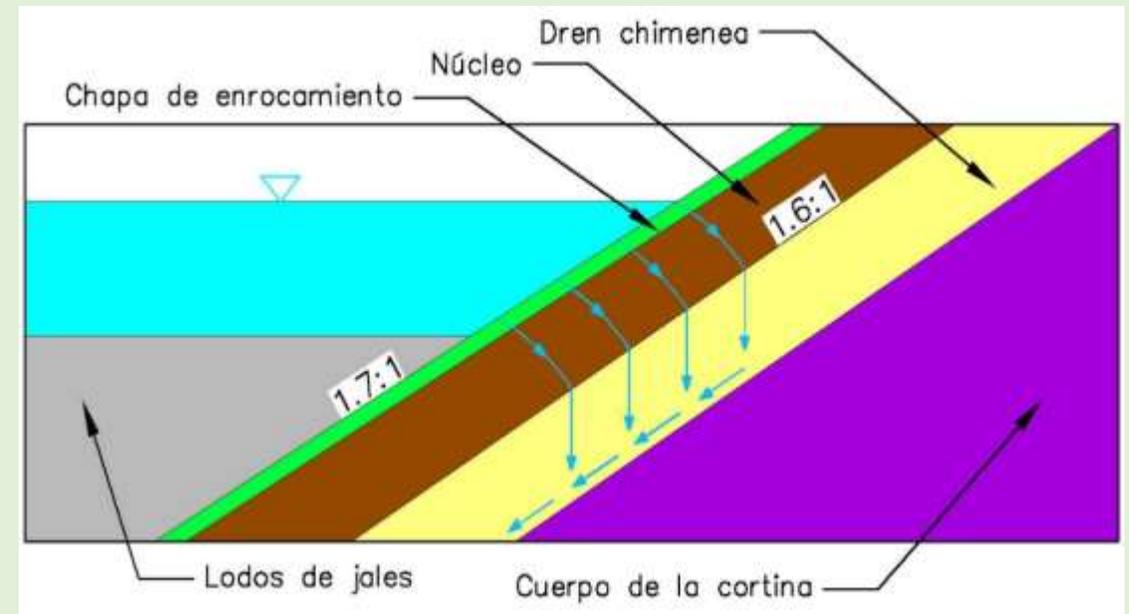


NDJ PRESA FILTRANTE Y DRENANTE PROYECTO CONCEPTUAL

SECCIÓN

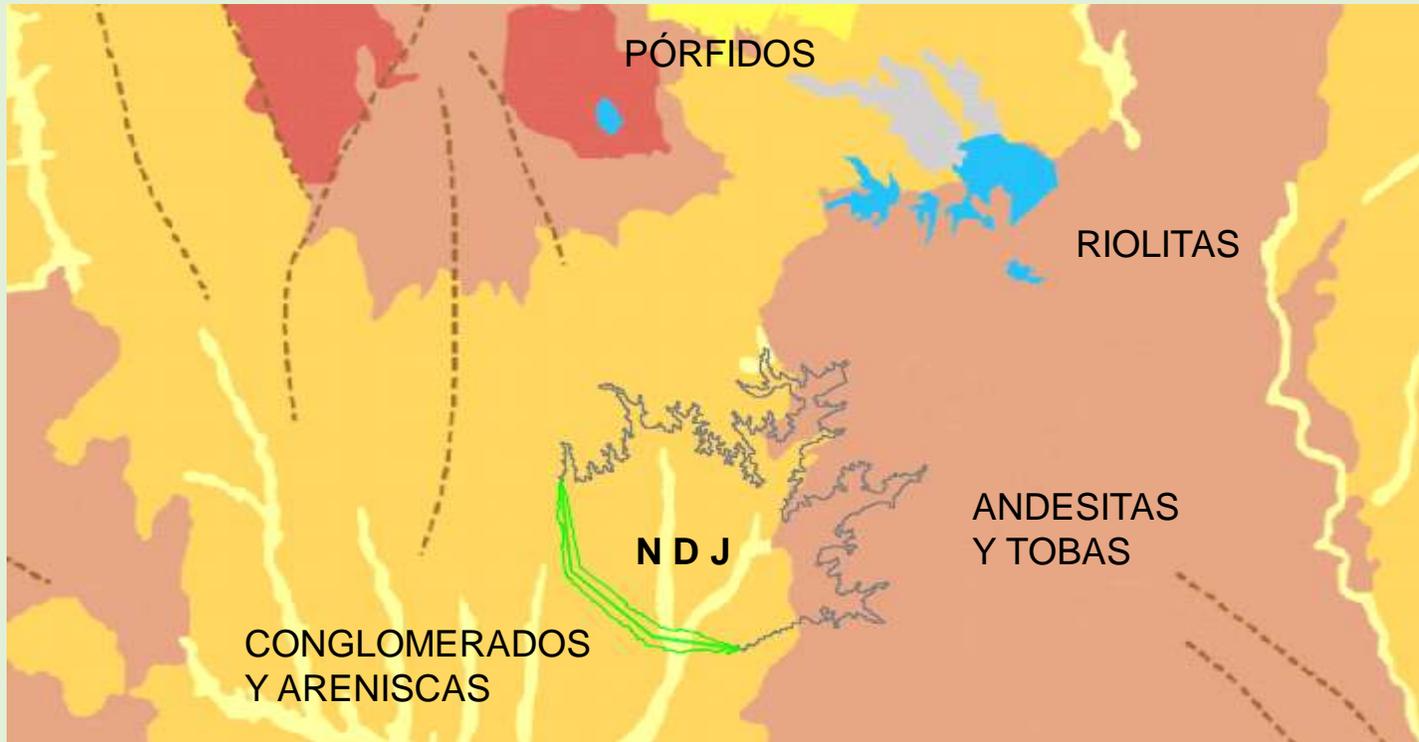


PROCESO DE FILTRACIÓN Y RECOLECCIÓN DEL AGUA RECUPERADA





NDJ GEOLOGÍA REGIONAL



- Etribaciones de la Sierra Madre Occidental, Sierras y Llanuras del Norte.
- Conglomerados polimícticos del Plioceno con intercalaciones de areniscas.
- Al este de la falla Bacanuchi, andesitas y tobas andesíticas del Cretácico.
- Al norte de la falla La Morita, riolitas y tobas riolíticas del Paleoceno.
- Pórfidos cuarzomonzoníticos mineralizados en varios lugares.



NDJ

Geología del vaso y boquilla

- Se hicieron exploraciones y SEVs en el vaso, y exploraciones y sísmica de refracción a lo largo del eje de la cortina.
- En el vaso, bajo depósitos aluviales de algunos metros de espesor, aparecieron los conglomerados y areniscas, y en la parte noreste, las andesitas y tobas.
- A lo largo del eje de la cortina, de 4 a 7 metros de depósitos aluviales poco compactos sobre los conglomerados y areniscas.
- No se encontró nivel freático en exploraciones hasta de 100 m. La permeabilidad resultó de 10^{-6} a 10^{-4} cm/s, predominando valores del orden de 10^{-5} cm/s.

Hidrología

- Cuenca de 103 km².
- Precipitación media anual, 550 mm.
- Para $Tr = 10,000$ años, la avenida resultó con

$$Q_{\text{pico}} = 428 \text{ m}^3/\text{s}$$

y volumen total

$$V = 4.7 \text{ hm}^3.$$

A la elevación requerida para el almacenamiento final de los lodos de jales, el vaso tiene una extensión de casi 30 km².





NDJ

Datos de proyecto:

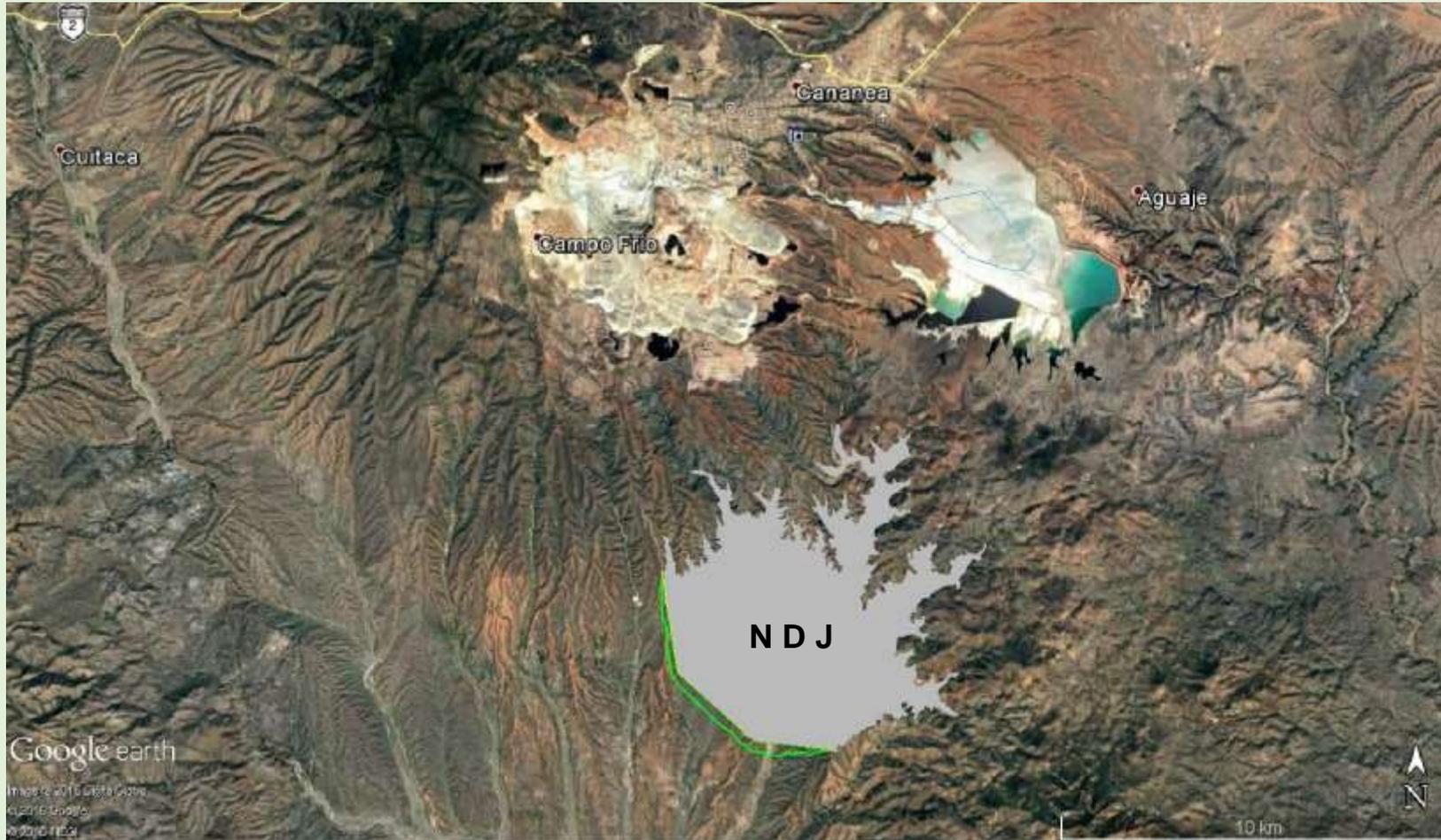
- Vida del yacimiento, 40 años.
- Jales de 0.001 a 1.0 mm.
 $D_{15} = 0.0048$ mm, $D_{50} = 0.04$ mm $D_{85} = 0.81$ mm.
- Composición inicial de los lodos de jales:
En peso: 50% jales sólidos, 50% agua.
En volumen: 26.5% jales sólidos, 73.5% agua.
- Volumen total de lodos generado: 3,548 hm³, a razón de:
 - 48.73 hm³ anuales durante los primeros cinco años,
 - 86.74 hm³ anuales los siguientes diez años y
 - 97.46 hm³ cada uno de los últimos veinticinco años.

Hipótesis de proyecto:

- Se pierde el 10% del agua.
- El 60% del agua será liberada por los jales (ésta es la que se planea recuperar).
- El 30% restante queda como “agua estructural” del nuevo material formado por los jales.
- De acuerdo con lo anterior, quedarán depositados en el vaso:
 - 23.67 hm³ anuales durante los primeros cinco años,
 - 42.13 hm³ anuales los siguientes diez años y
 - 47.34 hm³ cada año de los últimos veinticinco
- El volumen total de almacenamiento requerido resulta de 1,723hm³.



BUENAVISTA DEL COBRE: TAJO, TERREROS Y DEPÓSITOS DE JALES





NDJ – Cortina filtrante y drenante





CIERRE DE LAS PRESAS DE JALES

Principios del cierre sustentable

De acuerdo con lo que establece la Comisión Internacional de Grandes Presas (CIGP, ICOLD por sus siglas en inglés), en todas las etapas de proyecto debe tenerse en cuenta el inevitable cierre de la instalación. Los principios generales que se señalan se refieren a la sustentabilidad de una presa de jales:

- El plan de cierre debe estar conforme con los principios de durabilidad y objetivos conexos.
- El diseño del cierre debe ser conforme a las leyes locales y toda otra regulación aplicable.
- Para nuevos depósitos de jales, los conceptos del diseño sustentable deben desarrollarse desde la fase de iniciación del proyecto.
- Para las instalaciones ya existentes, deben iniciarse tan pronto como sea posible las modificaciones necesarias a las prácticas de operación que faciliten el cierre sustentable.
- Para el caso de instalaciones inactivas o ya cerradas, la sustentabilidad del cierre debe verificarse y deben tomarse las medidas necesarias para mejorar la conformidad de las obras con los principios y objetivos de la sustentabilidad.





Diseño sustentable

Por último, hay que dejar claro que los depósitos de jales contenidos en un medio acuoso (presas de jales) deben ser concebidos y proyectados previendo su comportamiento duradero, al cierre y después de él, de manera de cumplir con los principios de sustentabilidad en el largo plazo, que, como plantea la CIGP incluyen ciertos factores de riesgo que deben tomarse muy en cuenta:

- Estructurales de la obra de contención
 - Estabilidad general
 - Aspectos de esfuerzos y deformaciones
 - Efectos acumulados de sismos de diferentes intensidades
 - Deterioro de los materiales por intemperismo
 - Erosión
- Hidráulicos
 - Cambio climático
 - Diseño de las obras de excedencias
 - Control de erosión en el largo plazo
- También: geológicos (como deslizamientos), químicos, ecológicos y sociales



