

TALLERES DE IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLO:
DOCUMENTOS DE APOYO A LA APLICACIÓN DE LA GUÍA

Catálogo para presas de laminación, riego e hidroeléctricas



Expresamos nuestro agradecimiento al Japan Special Fund (JSF) por hacer posible esta publicación a través de la cooperación técnica RG-T3528: Implementación de la metodología para fortalecer la resiliencia al riesgo de desastre y cambio climático en los proyectos del BID.

Coautoría: La producción y difusión de esta Guía Metodológica y sus Catálogos fueron coordinados por Raimon Porta y Ginés Suárez con los valiosos aportes de Julia Ciancio, María Alejandra Escovar y Adriana Zambrano. El desarrollo del contenido de la Guía y la catalogación de Modos de Fallo fueron realizados por Ignacio Escuder, Adrián Morales, Sandra Navarro y Helena Yarritu, equipo técnico de la firma consultora iPresas.

Agradecimientos: El proceso de revisión técnica contó con la inestimable colaboración de Melissa Barandiarán, Karen Piñeros y Carolina Rogelis. El desarrollo del curso de capacitación online asociado a esta Guía fue realizado por la firma TAEC con el apoyo del equipo de INDES y la retroalimentación de Álvaro Adam, Leandro Kazimierski y Luis Mora. La producción de contenido, su publicación y difusión fue posible gracias a Edoardo Brovero, Lara Chinarro, Wilhelm Dalaison, Maricarmen Esquivel, Patricia Henríquez, Sergio Lacambra, Roberto Leal, Katherine López, David Maier, Lidia Marcelino, Pamela Ogando, Harold Rodríguez y Serge Troch.

Diseño y diagramación: Alejandro Scaff.

Citación sugerida: Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Talleres de Identificación de Modos de Fallo. Documentos de apoyo a la aplicación de la Guía. Catálogo para presas de laminación, riego e hidroeléctricas. 2025

Palabras clave: modo de fallo, infraestructura, riesgo, desastre, resiliencia, presas.

Copyright©2025 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra está sujeta a una licencia de Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0 CÓDIGO LEGAL) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.es>). Se deben cumplir los términos y condiciones indicados en el enlace URL y se debe otorgar el reconocimiento correspondiente al BID.

Cualquier disputa que surja bajo esta licencia y que no pueda resolverse de manera amistosa se resolverá de acuerdo con el siguiente procedimiento. Conforme a un aviso de mediación comunicado por medios adecuados por usted o el concedente de la licencia al otro, la disputa se someterá a mediación no vinculante realizada de acuerdo con las Reglas de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa que no pueda resolverse de manera amistosa se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI). Tanto el uso del nombre del BID para cualquier fin que no sea el reconocimiento respectivo, como el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Tenga en cuenta que el enlace URL incluye términos y condiciones que son parte integral de esta licencia. Las opiniones expresadas en esta obra son las de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, su Directorio Ejecutivo o los países que representan.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Documentos de apoyo a la aplicación de la guía: Catálogo para presas de laminación, riego e hidroeléctricas

Siglas y abreviaturas	4
1. Introducción	5
2. Características particulares para presas	6
2.1. Participantes	7
2.2. Revisión de información	8
2.3. Visita técnica	8
2.4. Clasificación de los Modos de Fallo	9
3. Modos de Fallo	12
3.1. Modos de Fallo hidrológicos	15
3.2. Modos de Fallo geotécnicos – Presas de hormigón	22
3.3. Modos de Fallo geotécnicos – Presas de materiales sueltos	29
3.4. Modos de Fallo del embalse	40
3.5. Otros Modos de Fallo	43
4. Relación de estudios científico-técnicos	51
5. Recomendaciones y mejores prácticas	52
Referencias	57

Siglas y abreviaturas

ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i> (Comité Nacional Australiano de Grandes Presas)
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i> (Asociación Americana de Ingenieros Civiles)
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CDA	<i>Canadian Dam Association</i> (Asociación Canadiense de Presas)
CCS	División de Soluciones de Cambio Climático del BID
CPR	Comunidad de Práctica de Resiliencia del BID
CWC	<i>Central Water Commission</i> (Comisión Central de Agua)
DRM	Unidad de Gestión de Riesgo de Desastres del BID
ESG	División de Soluciones Ambientales y Sociales del BID
ESR	Unidad de Gestión de Riesgos Ambientales y Sociales del BID
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i> (Comisión Federal de Regulación de Energía)
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> (Análisis de Modos de Fallo y sus Efectos)
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i> (Comisión Internacional de Grandes Presas)
INE	Sector de Infraestructura y Energía del BID
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Normalización)
MERDCC	Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastre y Cambio Climático del BID (en inglés, DCCRAM)
MF	Modo de Fallo
MPAS	Marco de Política Ambiental y Social del BID
OP-704	Política de Gestión de Riesgo de Desastres del BID
PADE	Plan de Acción Durante Emergencias
PGRD	Plan de Gestión de Riesgo de Desastre
SPANCOLD	Comité Nacional Español de Grandes Presas
TIMF	Taller de Identificación de Modos de Fallo
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i> (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos)
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i> (Oficina de Recuperación de Recursos Hidrológicos de los Estados Unidos)

1. Introducción

El objeto de este documento, junto con la “Guía Metodológica para la realización de Talleres de Identificación de Modos de Fallo”, es desarrollar la metodología de los talleres de identificación de Modos de Fallo (TIMF) y su aplicación específica a ciertas infraestructuras.

Los talleres son la parte principal del análisis cualitativo de riesgos de desastre y cambio climático en infraestructuras. Por ello y con el fin de asegurar la correcta aplicación de la guía, se han desarrollado varios documentos de referencia que proporcionan de manera clara y exhaustiva para cada tipo de infraestructura, las técnicas, los procesos y las herramientas necesarias para un adecuado desarrollo de los Talleres de Identificación de Modos de Fallo y la posterior toma de decisiones. Cabe destacar que el fallo no significa necesariamente la rotura de la presa, sino también la pérdida del servicio que brinde.

Concretamente, este Catálogo pretende dar apoyo y complementar a la aplicación de la “Guía Metodológica para la realización de Talleres de Identificación de Modos de Fallo” en presas de laminación de avenidas, riego e hidroeléctricas.

El documento está organizado en 4 secciones. La primera detalla las características particulares de las presas a tener en cuenta a la hora de realizar sesiones de Modos de Fallo, lo cual va desde qué participantes deben asistir, pasando por los elementos clave de la revisión de información y la visita técnica y finalmente su clasificación de riesgos.

La segunda sección recoge los ejemplos de los Modos de Fallo más representativos clasificados según la tipología de presa y su evento desencadenante. Para cada Modo de Fallo se ha elaborado una ficha, la cual incluye su descripción, un esquema y los factores que influyen en el riesgo. Dichos factores podrán aumentar o disminuir el riesgo en función de en qué situación o de qué información se disponga en cada una de las infraestructuras que se vayan a analizar. Como se comentará más adelante, estos ejemplos son referencias para el lector, el cual deberá definir los Modos de Fallo y factores asociados a su presa a lo largo de los talleres y con la participación de todos los integrantes del grupo de trabajo.

Finalmente, la tercera y cuarta sección incluyen una relación de estudios científico-técnicos y de las recomendaciones y mejores prácticas, las cuales quedan agrupadas según la tipología de los Modos de Fallo empleada en la segunda sección. Estos dos últimos apartados permiten enriquecer las prácticas de intervención de los Talleres de Identificación de Modos de Fallo haciendo hincapié en las cuestiones que pueden presentar una menor definición en los proyectos o que presentan una mayor relevancia en el diseño y la operación de la infraestructura.

2. Características particulares para presas

A lo largo de este apartado se muestran las características particulares asociadas al Taller de Identificación de Modos de Fallo para las presas de laminación, riego e hidroeléctricas. En concreto, detalla los aspectos que varían respecto de la metodología general presentada en la guía, los cuales están relacionados el mínimo de participantes deben asistir, la viabilidad o no para realizar la visita técnica online y la clasificación de los Modos de Fallo.

La metodología que se explica a lo largo de la “Guía metodológica para la realización de Talleres de Identificación de Modos de Fallo” ha sido ampliamente utilizada y ha tenido un gran desarrollo a nivel mundial.

Algunas entidades internacionales que promueven una gestión de la seguridad de las presas basada en el riesgo son: el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés), el Bureau of Reclamation (USBR, por sus siglas en inglés) y la Comisión Federal Reguladora de la Energía (FERC, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, la Asociación Canadiense de Presas (CDA-ACB, por sus siglas en inglés), el Comité Nacional Australiano de Grandes Presas (ANCOLD, por sus siglas en inglés), la Agencia de Medio Ambiente del Reino Unido, el Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD, por sus siglas en inglés) en España, la Comisión Central del Agua (CWC, por sus siglas en inglés) en India o la actual legislación sobre seguridad de presas en Francia.

Asimismo, las principales normativas, guías y manuales de buenas prácticas a nivel mundial que sientan las bases de los estándares internacionales del análisis de riesgos son los principios generales de los boletines de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés), las Guías Técnicas del Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), las Normas Técnicas de Seguridad de Presas Españolas (abril de 2021) así como los manuales de diseño de las grandes agencias federales norteamericanas (USBR y USACE).

Los siguientes apartados presentan las variables que deben considerarse en un Taller de Identificación de Modos de Fallo de presas, con relación a las guías generales presentadas en la guía metodológica.

2.1. Participantes

Las sesiones de identificación de Modos de Fallo están constituidas por un facilitador y una serie de participantes. En el caso de presas de laminación de avenidas, riego e hidroeléctricas es recomendable que como mínimo en el taller haya un técnico experto en los siguientes campos:

- El **diseño de la presa**. Es recomendable la presencia de los técnicos responsables del diseño del proyecto y de la construcción, en su caso, para que compartan su experiencia, las problemáticas acaecidas y posibles modificaciones que sufrió el diseño original, así como el proceso constructivo empleado. Estos participantes enriquecen los talleres de Modos de Fallo, pero no son actores críticos para su desarrollo a excepción de los proyectos en fase de diseño, en los cuales este personal es clave.
- La **hidrología e hidráulica**. Se recomienda invitar al experto/s que haya participado en el estudio de la hidrología e hidráulica durante el diseño de la presa o en su defecto a un experto en el tema que pueda aportar su opinión. Estos datos son muy importantes para entender y evaluar el dimensionamiento de los órganos de desagüe, así como conocer la crecida de diseño empleada para el cálculo de la presa. El experto en hidrología e hidráulica es relevante

independientemente de la fase en la que se encuentre la presa a la hora de realizar el taller (proyecto, construcción u operación).

- **Medidas de adaptación al cambio climático.** Los proyectos de presas incluyen un estudio hidrológico y/o hidráulico, por lo que puede ser importante la influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno, por lo que se recomienda invitar a un experto en el tema de riesgos de cambio climático que pueda aportar su opinión. Independientemente de la fase de proyecto en la que se realice el taller, se recomienda invitar a esta figura para participar en la sesión.
- La **geología, geotecnia y sismicidad de la zona.** Se recomienda invitar al geólogo que haya participado en el estudio geológico-geotécnico de la presa, o en su defecto a un experto en el tema que pueda aportar su opinión respecto del material y el diseño de la cimentación de la presa, los potenciales deslizamientos en el embalse y de los materiales empleados para la construcción de la presa. Asimismo, si la presa se encuentra en una zona sísmica, el geólogo/geotécnico debe tener conocimientos suficientes para identificar si se han analizado los riesgos derivados y si se ha diseñado la presa según estas solicitudes. Independientemente de la fase de proyecto en la que se realice el taller, se recomienda invitar a esta figura a participar en la sesión.
- Los **elementos hidromecánicos de la presa.** En caso de que la presa disponga de elementos hidromecánicos (compuertas, tomas, desagües de fondo, etc.), es recomendable que al menos una persona experta en el funcionamiento de estos elementos asista a los talleres cuando sean críticas para la seguridad de la infraestructura.
- **Mantenimiento y operación de la presa.** Se recomienda que, para presas en operación, asistan los técnicos encargados de realizar las inspecciones, el mantenimiento y la operación de la presa, así como técnicos concedores de las reglas de operación puesto que su experiencia puede ser fructífera a la hora de identificar potenciales Modos de Fallo por mal funcionamiento y/o operación. En el caso de presas nuevas, se involucrará a las entidades que vayan a realizar estas tareas en el futuro.
- **Gestión de emergencias.** En presas en operación, se recomienda invitar a los talleres al personal encargado de la gestión de emergencias. Estos participantes ayudan a comprender las consecuencias derivadas del fallo o mal funcionamiento de la infraestructura y entender cómo está organizado el sistema de gestión de emergencias.
- **Personas locales y representantes de comunidades minoritarias.** Estos participantes pueden aportar conocimientos de la zona relevantes para el desarrollo del taller, por ejemplo, acerca de qué zonas se ven afectadas cuando hay un vertido prolongado de la presa, la efectividad de los medios de aviso a la población en caso de emergencia, o sobre cómo les afectan las amenazas naturales específicas de la zona.
- **Gobernanza del riesgo** en el área de influencia del proyecto. Es recomendable que estos participantes cooperen en comités de Gestión del Riesgo o sean responsables institucionales de ejecutar planes de gestión del riesgo.
- **Propietario de la presa**, independientemente de la fase en la que se encuentre, y el **jefe de explotación**, en fase de operación.
- **Expertos externos** al proyecto. Estos expertos no solo aportan su vasto conocimiento técnico en presas, sino que ofrecen una visión ajena al proyecto, poniendo de manifiesto aspectos que pueden pasar desapercibidos frente a los técnicos encargados del proyecto por el simple hecho de estar inmersos en el mismo.

Si bien estos actores son los recomendables para la realización de Talleres de Identificación de Modos de Fallo para las presas, hay que estudiar cada obra y analizar qué actores de los presentados en el listado son realmente necesarios para cada caso concreto, así como la necesidad de incorporar otros.

2.2. Revisión de información

Tal y como se ha explicado en la “Guía metodológica para la realización de Talleres de Identificación de Modos de Fallo”, la revisión y el análisis de la información existente constituye el primer paso para la identificación de Modos de Fallo y debe cubrir todos los aspectos clave en materia de gestión de seguridad, partiendo de los aspectos relativos a las fases de diseño y construcción de la infraestructura, para pasar a la evaluación del sistema, el funcionamiento y el estado en el que se encuentra la infraestructura.

La revisión de información debe incluir los puntos clave de los documentos. Por ello, desde el punto de vista conceptual, los elementos fundamentales que deben considerarse para el análisis de presas durante la revisión de información se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Elementos clave de la revisión de información



Algunos puntos clave mencionados en este esquema no serán necesarios según en qué fase de proyecto se encuentre la infraestructura. Por ejemplo, como es previsible, el estado actual no se considerará en una infraestructura en fase de proyecto.

2.3. Visita técnica

La visita técnica es una de las principales etapas de los talleres, ya que permite tener una visión integral del estado actual de la infraestructura y detectar posibles daños que puedan derivar en el fallo de la infraestructura.

Esta tarea es recomendable realizarla de manera presencial, ya que permite una inspección más detallada por parte de los expertos. Sin embargo, en algunas infraestructuras, se puede plantear su realización online en caso de que la opción presencial no sea viable logísticamente.

En el caso de las presas, la viabilidad para realizar una visita técnica online variará dependiendo de si están en fase de operación o en fase de proyecto.

Aquellas en fase de proyecto pueden realizarse de manera online, y de hecho no se recomienda realizar la visita de manera presencial, ya que visitar la cerrada de la presa no supone un gran enriquecimiento para el taller. Esto se debe a que los únicos insumos que se pueden obtener de la cerrada son observaciones del terreno que podrían completar la información disponible de la cimentación, en caso de no disponer de un estudio detallado de la geología y geotecnia de la misma. Además, estas observaciones serían de carácter superficial, las cuales también podrían obtenerse a partir de fotografías o vuelos dron.

Realizar la visita de la cerrada de manera online agiliza el taller de Modos de Fallo y permite que, en caso de estar realizando el taller en modo presencial, se pueda escoger la ubicación más conveniente para todos los participantes.

Por otro lado, para presas en operación o en construcción, es muy enriquecedor y necesario realizar una visita técnica in situ, ya que los técnicos pueden observar el estado actual de la presa con mayor detalle o detectar aspectos que no se pueden observar en un video realizado por dron.

De hecho, para presas en construcción u operación no se recomienda la modalidad online, ya que la comprobación de los aparatos de auscultación o la inspección de galerías entre otros aspectos relevantes de estas inspecciones, no son viables a partir del uso de fotografías o drones.

2.4. Clasificación de los Modos de Fallo

En el caso de presas, existen dos tipos de clasificaciones. La primera de ellas es una clasificación cualitativa, mientras que la segunda es una clasificación semicuantitativa. El uso de una u otra dependerá de la complejidad de la estructura y de cómo se vayan a emplear los resultados para la toma de decisiones. En general, la semicuantitativa es más empleada al ser más completa, pues tiene en cuenta las consecuencias asociadas. Ambas clasificaciones quedan detalladas a continuación.

CLASIFICACIÓN CUALITATIVA

Los Modos de Fallo que se identifiquen por el grupo durante las sesiones se clasifican en cuatro categorías en función de la posibilidad de ocurrencia y las consecuencias potenciales de los mismos a partir de las recomendaciones de FERC (2005)¹, realizando de esta forma un análisis de riesgos cualitativo de estos Modos de Fallo.

La metodología para su clasificación es la comentada en la guía, con su fase individual a través de formularios y su fase grupal en la que se debaten los resultados del grupo y se define la categoría de cada Modo de Fallo. A continuación, se presentan los cuatro grados en los que se divide la clasificación cualitativa:

- Grado I: Modos de Fallo factibles, con posibilidad de ocurrir, no descartándose que puedan estar ya en desarrollo. Además, implican consecuencias potenciales muy importantes. Se recomiendan acciones a muy corto plazo para evitarlos.
- Grado II: Modos de Fallo considerados también factibles, aunque con menores posibilidades de ocurrir y con consecuencias potenciales importantes. Se recomienda analizarlos mediante el modelo de riesgo cuantitativo para estudiar la necesidad de implementar acciones para reducir su riesgo a corto-medio plazo.

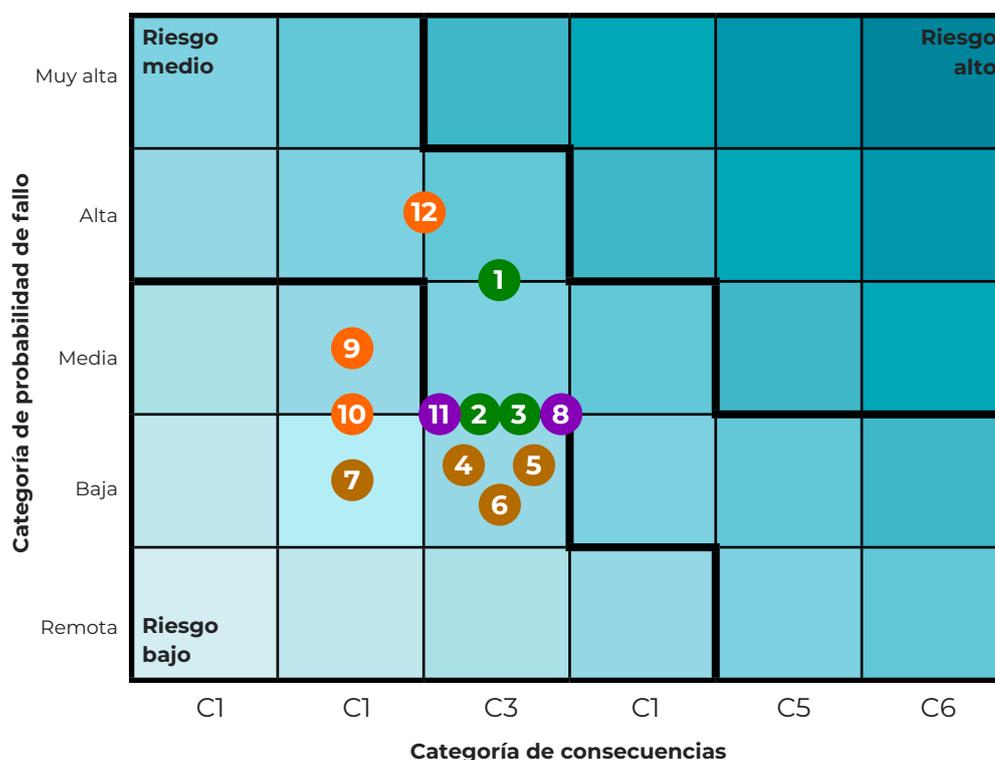
¹ FERC. 2005. "Dam Safety Performance Monitoring Program" In Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Federal Energy Regulatory Commission.

- Grado III: Modos de Fallo para los que la información disponible resulta insuficiente para conocer su probabilidad, aunque se estiman factibles y con consecuencias potencialmente importantes. Se recomiendan acciones para reducir su incertidumbre, tales como nueva instrumentación o nuevos estudios.
- Grado IV: Modos de Fallo descartados por no considerarse plausibles o por presentar una probabilidad muy baja y/o muy bajas consecuencias. En cualquier caso, se recomienda su documentación y tenerlos en cuenta en la vigilancia de la presa, así como en futuras actualizaciones en la identificación de Modos de Fallo.

CLASIFICACIÓN SEMICUANTITATIVA

El análisis semicuantitativo va un paso más allá del cualitativo, clasificando los diferentes Modos de Fallo identificados según su probabilidad de fallo (ligado a un valor de probabilidad de fallo) y las consecuencias del fallo (ligado a un valor de consecuencias de fallo de la presa). Los resultados de la clasificación, es decir el riesgo, se representa en una matriz de riesgo que combina probabilidad de fallo y consecuencia, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Clasificación semicuantitativa de Modos de Fallo



Para categorizar la probabilidad de fallo se emplean las siguientes cinco categorías, las cuales tienen un rango de probabilidad de fallo anual de referencia asociado.

- **Remota:** Varios eventos deben ocurrir al mismo tiempo o en serie para causar fallos, y la mayoría, si no todos, tienen una probabilidad insignificante. La probabilidad de fallo anual de referencia es menor a 10^{-6} .
- **Baja:** No se puede descartar la posibilidad, pero no hay evidencia convincente que sugiera que haya ocurrido o que exista una condición o fallo que pueda llevar a la iniciación. La probabilidad de fallo anual de referencia está entre 10^{-5} y 10^{-6} .
- **Media:** Existe la condición o defecto fundamental. Los datos existentes sugieren que es plausible, aunque la evidencia clave se inclina más hacia “menos probable” que “más probable”. La probabilidad de fallo anual de referencia está entre 10^{-4} y 10^{-5} .

- **Alta:** Existe la condición o defecto fundamental. Los datos existentes sugieren que es plausible, aunque la evidencia clave se inclina más hacia “más probable” que “menos probable”. La probabilidad de fallo anual de referencia está entre 10^{-3} y 10^{-4} .
- **Muy alta:** Existe evidencia directa o indirecta sustancial que sugiere que se ha iniciado o es probable que ocurra en un futuro próximo. La probabilidad de fallo anual de referencia es mayor que 10^{-3} .

El otro componente del riesgo es la magnitud de las consecuencias que podría producir cada Modo de Fallo. Para su definición se emplean seis categorías:

- **Categoría 1:** Consecuencias económicas para la explotación limitadas y/o necesidad de reparaciones pequeñas o medianas en la presa. Pequeñas consecuencias medioambientales. Sin suelta de caudales aguas abajo.
- **Categoría 2:** Consecuencias económicas muy importantes para la explotación y/o necesidad de gran reparación en la presa (millones de dólares). Graves consecuencias medioambientales. Sin suelta de caudales aguas abajo.
- **Categoría 3:** Suelta descontrolada de caudales con daños a algunas viviendas aisladas. No se puede descartar la pérdida directa de vidas debido a la inundación, por algún viandante o algún vehículo.
- **Categoría 4:** Es probable que se produzca pérdidas de vidas por dificultades para alertar a poblaciones más pequeñas cercanas (<1000 habitantes) o dificultades para evacuar grandes poblaciones con suficiente tiempo de alerta (> 2 horas de llegada). Pérdida de vidas en el rango de 10 a 100. Las descargas aguas abajo también resultan en daños muy importantes a la propiedad y / o al medio ambiente.
- **Categoría 5:** Se esperaría una gran pérdida de vidas debido a dificultades para avisar y evacuar a grandes centros de población a una distancia media (llegada de la onda entre 1-2 horas). Pérdida de vidas en el rango de 100 a 1000. Las descargas aguas abajo también resultan en daños muy importantes a la propiedad y / o al medio ambiente.
- **Categoría 6:** Se esperaría unas pérdidas de vidas directas muy alta debido a la existencia de grandes poblaciones muy cerca del pie de presa (>10 000 hab. y < 30-45 minutos de llegada). Pérdida de vidas estimada superior a 1000. Las descargas aguas abajo también resultan en daños muy importantes a la propiedad y / o al medio ambiente.

En este paso, una estimación preliminar de la pérdida potencial de vidas puede ser adecuada para asignar la categoría de consecuencias en función de los mapas de riesgo de inundación existentes. En algunos casos, el fallo de una presa podría no tener un alto impacto en la pérdida de vidas, pero podría tener un impacto económico muy alto, debido a la importancia de la presa para la economía regional.

Para ambas categorías, tanto la probabilidad de fallo como la categoría de consecuencias, se debe realizar una asignación individual de cada participante. Esta asignación individual mostrará posiblemente una gran dispersión en la clasificación que estará sujeta a la incertidumbre por lo cual se deberá repetir el proceso de clasificación en forma grupal de manera de llegar a una clasificación de consenso. Asimismo, las categorías de probabilidad de fallo y consecuencia no son categorías únicas, sino que es dar un valor intermedio entre dos categorías..

3. Modos de Fallo

A continuación, se enumeran los Modos de Fallo más característicos para presas estructurados según la tipología de Modos de Fallo que comprende: Modos de Fallo hidrológicos, geotécnicos y/o estructurales, del embalse y otros. Los Modos de Fallo se han puesto en común para presas de hormigón y presas de materiales sueltos, excepto para la tipología de Modos de Fallo geotécnicos, en la que se han distinguido por un lado los Modos de Fallo que son característicos de presas de hormigón, y por otro los que son propios de presas de materiales sueltos. A continuación, se puede consultar un índice con los Modos de Fallo más característicos que se han definido.

3.1 Modos de Fallo hidrológicos:	15
• Rotura por sobrepaso.	15
• Sobrepaso por fallo de operación de compuertas.	16
• Crecida durante la construcción de la obra.	17
• Sobrepaso por rotura de presa aguas arriba.	18
• Crecida y mal funcionamiento hidráulico.	19
• Erosión del pie de vertedero y descalce de la presa.	20
3.2 Modos de Fallo geotécnicos – Presas de hormigón:	21
• Deslizamiento de presa por sismo.	21
• Deslizamiento de la cimentación por sismo.	22
• Deslizamiento de cuerpo de presa.	23
• Deslizamiento de presa-cimiento.	24
• Rotura del arco superior o agrietamiento por sismo en presas bóveda.	25
• Rotura por grieta de tracción en la base en presas bóveda.	26
• Inestabilidad en estribo y rotura de presa arco.	27
3.3 Modos de Fallo geotécnicos – Presas de materiales sueltos:	28
• Inestabilidad por sismo.	28
• Licuefacción por sismo.	29
• Erosión interna a través de conducto.	30
• Erosión interna por fuga en la obra de toma/desagüe de fondo.	31
• Erosión interna en el cuerpo de presa de materiales sueltos.	32
• Erosión interna desde la presa hacia la cimentación.	33
• Erosión interna en la cimentación de la presa.	34

- Rotura por erosión interna desde estribos tras sismo. 35
- Inestabilidad aguas abajo por saturación. 36
- Inestabilidad por desembalse rápido. 37

3.4 Modos de Fallo del embalse: 38

- Vaciado del embalse por estribos/laderas embalse. 38
- Colmatación del embalse por sedimentos. 39
- Inestabilidad de laderas en embalse y rotura de presa. 40

3.5 Otros Modos de Fallo: 41

- Rotura de desagüe de fondo y vaciado. 41
- Fallo de la pantalla de impermeabilización y vaciado. 42
- Daños en el desagüe de fondo por sedimentos. 43
- Inadecuada respuesta ante emergencias en caso de rotura de presa. 44
- Conflictos sociales por falta de socialización de nuevos proyectos. 45
- Desarrollo de asentamientos en el embalse. 46
- Retención del caudal ecológico. 47
- Agrietamiento de la pantalla de hormigón. 48

A continuación, se desarrollan los Modos de Fallo más representativos para presas y se detallan los factores que influyen en el riesgo del Modo de Fallo. Tanto los Modos de Fallo como los factores están definidos de manera general, es decir, el lector los puede emplear como referencia, pero deberá desarrollar sus propios Modos de Fallo a lo largo del taller y con la participación de todos los integrantes del grupo de trabajo.

Asimismo, los factores están redactados de manera neutra para cada Modo de Fallo con la finalidad de que el lector los tome como referencia, teniendo él mismo que decidir para su caso concreto si los factores aumentan o disminuyen el riesgo de su Modo de Fallo.

Existen una serie de factores que, de alguna manera, influyen en el riesgo de todos los Modos de Fallo. Por este motivo, y con el fin de evitar repeticiones en cada una de las descripciones realizadas para cada uno de los Modos de Fallo característicos, se presentan estos factores en el siguiente listado y no se repiten en las tablas posteriores.

Factores que considerar en todos los Modos de Fallo de las presas:

- Disponibilidad de recursos para realizar los estudios previos o de preinversión de los proyectos de presas.
- Manejo y conservación de información de los proyectos a lo largo de los años.
- Plazos para la realización de estudios previos y la elaboración de proyectos de presas.
- Control de calidad y supervisión en el diseño de presas y en su construcción.

- Experiencia de la empresa constructora y/o supervisora en la construcción de presas.
- Existencia e implantación de Planes de Actuación Durante Emergencias.
- Presencia de instrumentación y vigilancia de las presas para detectar problemas.
- Determinación de titularidad oficial y responsable de las presas.
- Existencia de planificación territorial o fiscalización del uso del suelo que regule los nuevos asentamientos que puedan producirse aguas debajo de la presa y quede controlada la exposición aguas abajo.

3.1. Modos de Fallo hidrológicos

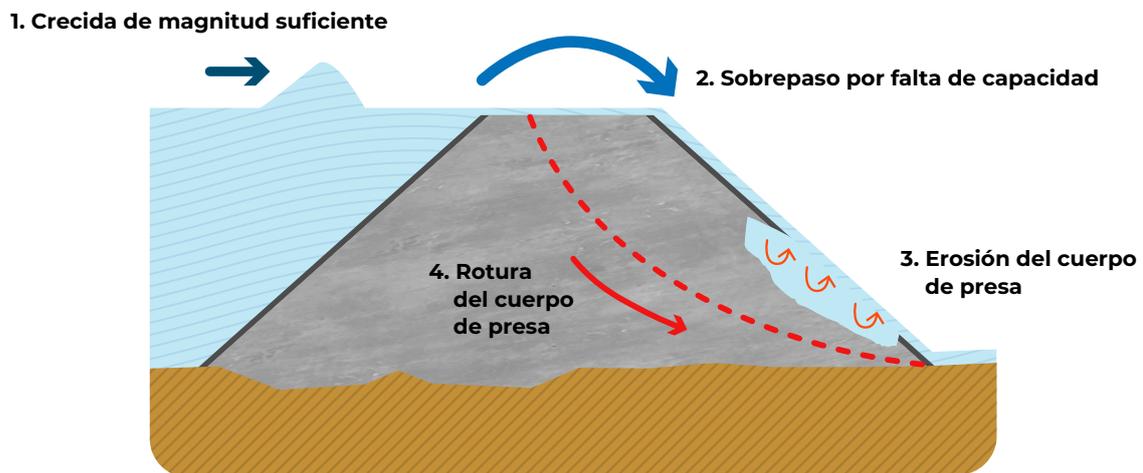
ROTURA POR SOBREPASO

Presa de materiales sueltos

En escenario hidrológico, se produce una crecida de magnitud suficiente que sobrepasa la capacidad del vertedero, de modo que se produce el vertido de agua sobre el coronamiento de la presa. Este vertido provoca una erosión del talud aguas abajo, que deriva en socavón y finalmente en la rotura de la presa por inestabilidad.

Presa de hormigón

En escenario hidrológico, se produce una crecida de magnitud suficiente que sobrepasa la capacidad del vertedero, de modo que va aumentando el nivel en el embalse hasta alcanzar la cota de coronación, produciendo un evento de sobrevvertido. Este vertido produce daños a pie de presa, erosionando la zona del pie de aguas abajo. Esta erosión progresa, socavando el pie de presa y provocando la rotura de la presa por vuelco o deslizamiento.



Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de protección del pie de presa (caso de presas de hormigón).
- Calidad de la modelación hidrológica realizada en el proyecto.
- Experiencia de los proyectistas en la utilización y la calibración de los modelos hidrológicos empleados.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño utilizada para la comprobación del vertedero.
- Variabilidad climática entre los diferentes años.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Modificaciones de los órganos de desagüe de la presa durante la construcción de la misma.
- Existencia de procesos de degradación de la vegetación de las cuencas que pueden aumentar los caudales previstos.
- Resguardo disponible.

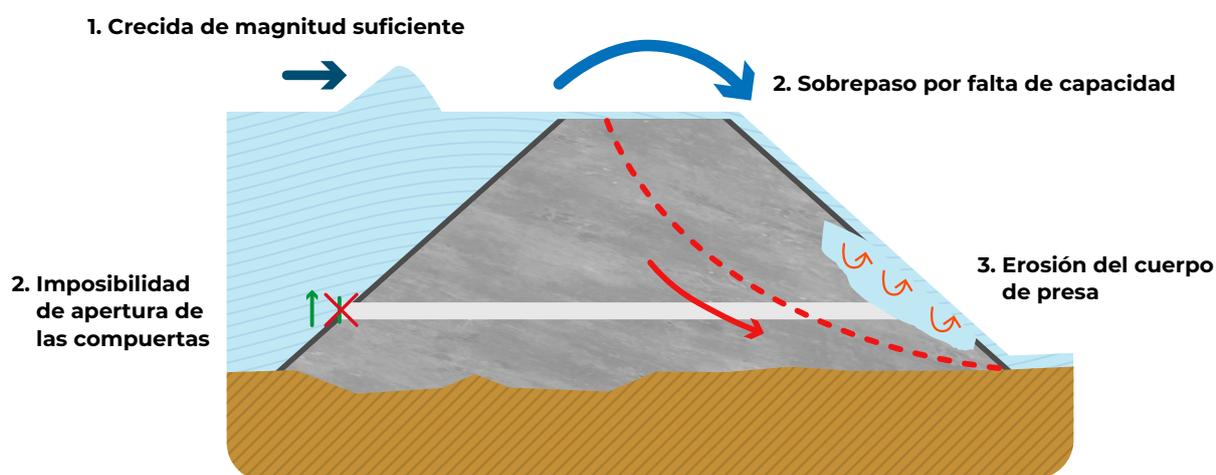
SOBREPASO POR FALLO DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS

En escenario hidrológico, se produce una crecida de magnitud suficiente, que produce un aumento de los niveles del embalse. En esta situación, no se pueden abrir una o varias de las compuertas del aliviadero y/o del desagüe de fondo por:

- Un impacto de algún flotante en la bandeja de alimentación y deterioro del cableado.
- La subida del nivel del embalse sobre las compuertas y la imposibilidad de apertura.
- La rotura de la manguera de aceite en alguna de las compuertas.
- Un accidente vial que daña el accionamiento de 1 o más compuertas.
- Un incendio en la caseta.
- Un fallo en la alimentación de las compuertas.
- Dificultad de acceso a la zona de control de las compuertas por la inundación en el área.

Presa de materiales sueltos

Debido a la falta de capacidad hidráulica del aliviadero por no poder operar las compuertas, se produce un vertido sobre la coronación de las diferentes partes de la presa. Este vertido provoca una erosión superficial del talud aguas abajo en la parte de materiales sueltos, que va aumentando hasta producir una erosión generalizada en el cuerpo de presa y una rotura final por inestabilidad.



Presa de hormigón

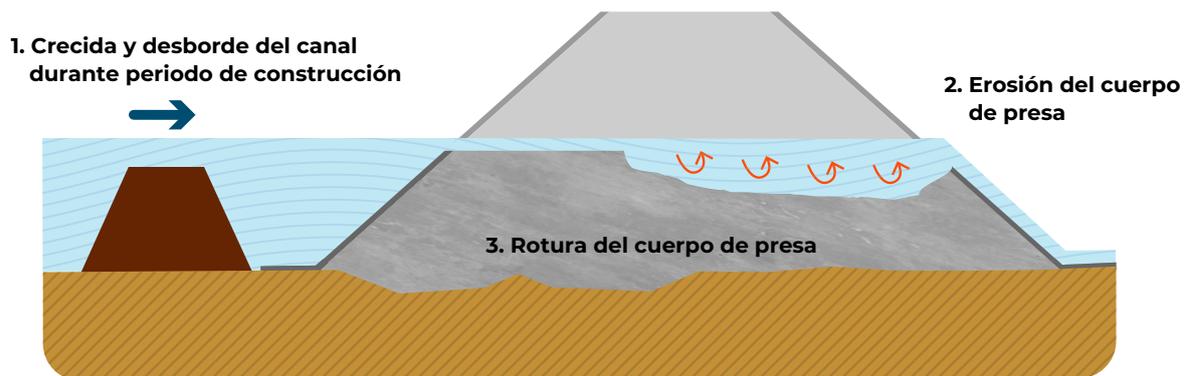
Debido a la falta de capacidad hidráulica del aliviadero por no poder operar las compuertas, se produce un vertido sobre la coronación de las diferentes partes de la presa. Este vertido provoca daños a pie de presa, erosionando la zona del pie de aguas abajo. Esta erosión progresa, socavando el pie de presa y provocando la rotura final por vuelco o deslizamiento.

Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de colmatación o *debris* que pueda bloquear la compuerta.
- Ubicación de la zona de control de las compuertas.
- Calidad de la modelación hidrológica realizada en el proyecto.
- Experiencia de los proyectistas en la utilización y la calibración de los modelos hidrológicos empleados.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño utilizada para la comprobación del vertedero.
- Variabilidad climática entre los diferentes años.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Modificaciones de los órganos de desagüe de la presa durante la construcción de la misma.
- Existencia de procesos de degradación de la vegetación de las cuencas que pueden aumentar los caudales previstos.
- Resguardo disponible.

CRECIDA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LA OBRA

Durante la construcción de la presa de materiales sueltos, en escenario hidrológico, se produce una crecida de magnitud suficiente para que, debido a la falta de capacidad hidráulica del canal de desvío de las aguas, se produzca un vertido sobre la coronación de la presa en construcción. Este vertido provoca una erosión del cuerpo de presa, derivando en el fallo de la presa por rotura del cuerpo de presa.



Factores que influyen en el riesgo

- Calidad de la modelación hidrológica realizada en el proyecto.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño para el canal de desvío de la presa.
- Experiencia de los proyectistas en la utilización y la calibración de los modelos hidrológicos empleados.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño utilizada para la comprobación del vertedero.
- Variabilidad climática entre los diferentes años.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Modificaciones de los órganos de desagüe de la presa durante la construcción de la misma.
- Existencia de procesos de degradación de la vegetación de las cuencas que pueden aumentar los caudales previstos.

SOBREPASO POR ROTURA DE PRESA AGUAS ARRIBA

Presas de materiales sueltos

En escenario hidrológico o de operación normal, se produce una rotura de una o varias de las presas localizadas en la cuenca aguas arriba, lo que produce la entrada de un gran volumen de agua en el embalse. Debido a la falta de capacidad hidráulica del vertedero, se produce un vertido sobre la coronación de las diferentes partes de la presa. Este vertido provoca una erosión superficial del talud aguas abajo en la parte de materiales sueltos, que va aumentando hasta producir una erosión generalizada en el cuerpo de presa y una rotura final por inestabilidad.

Presas de hormigón

En escenario hidrológico o de operación normal, se produce una rotura de una o varias de las presas localizadas en la cuenca aguas arriba, lo que produce la entrada de un gran volumen de agua en el embalse. Debido a la falta de capacidad hidráulica del vertedero, se produce un vertido sobre la coronación de las diferentes partes de la presa. Este vertido produce daños a pie de presa, erosionando la zona del pie de aguas abajo. Esta erosión progresa, socavando el pie de presa y provocando la rotura de la presa por vuelco o deslizamiento.

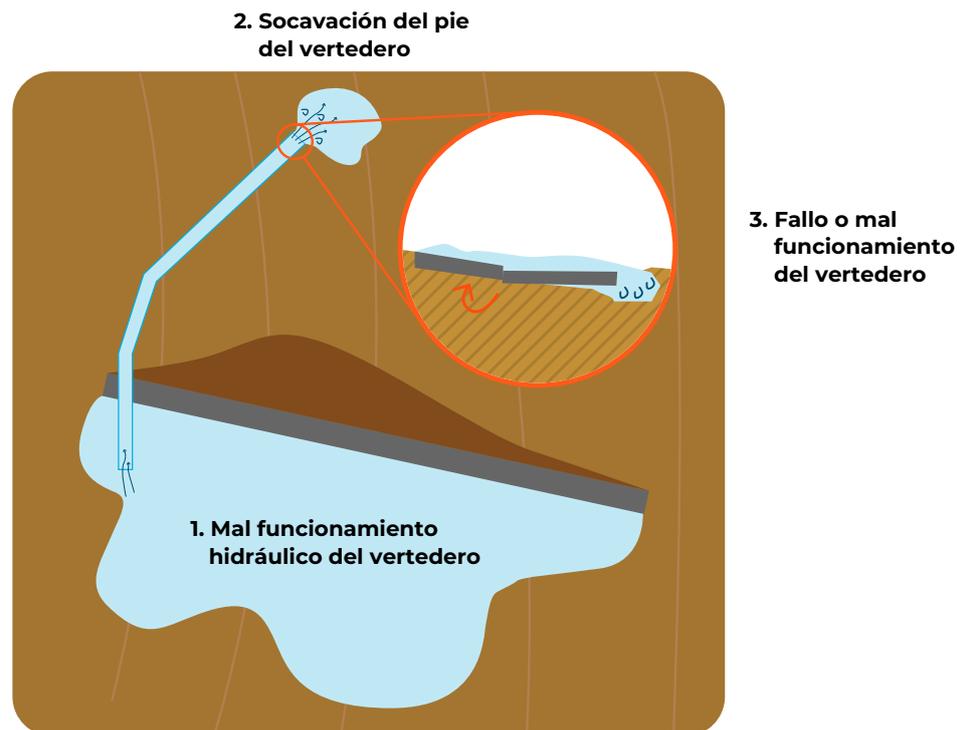


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de protección del pie de presa (caso de presas de hormigón).
- Calidad de la modelación hidrológica realizada en el proyecto.
- Calidad de la cimentación (caso de presas de hormigón).
- Experiencia de los proyectistas en la utilización y la calibración de los modelos hidrológicos empleados.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño utilizada para la comprobación del vertedero.
- Variabilidad climática entre los diferentes años.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Modificaciones de los órganos de desagüe de la presa durante la construcción de la misma.
- Existencia de procesos de degradación de la vegetación de las cuencas que pueden aumentar los caudales previstos.

CRECIDA Y MAL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO

En escenario hidrológico en un vertido prolongado del vertedero, debido al deterioro del hormigón y las juntas del vertedero, así como un inadecuado comportamiento hidráulico, se producen procesos de cavitación y filtraciones por debajo del vertedero que con elevados caudales acaban produciendo un levantamiento de las losas de hormigón. El deterioro del vertedero produce la aparición de grandes turbulencias y la erosión del terreno circundante al vertedero, lo que hace necesaria una gran reparación.

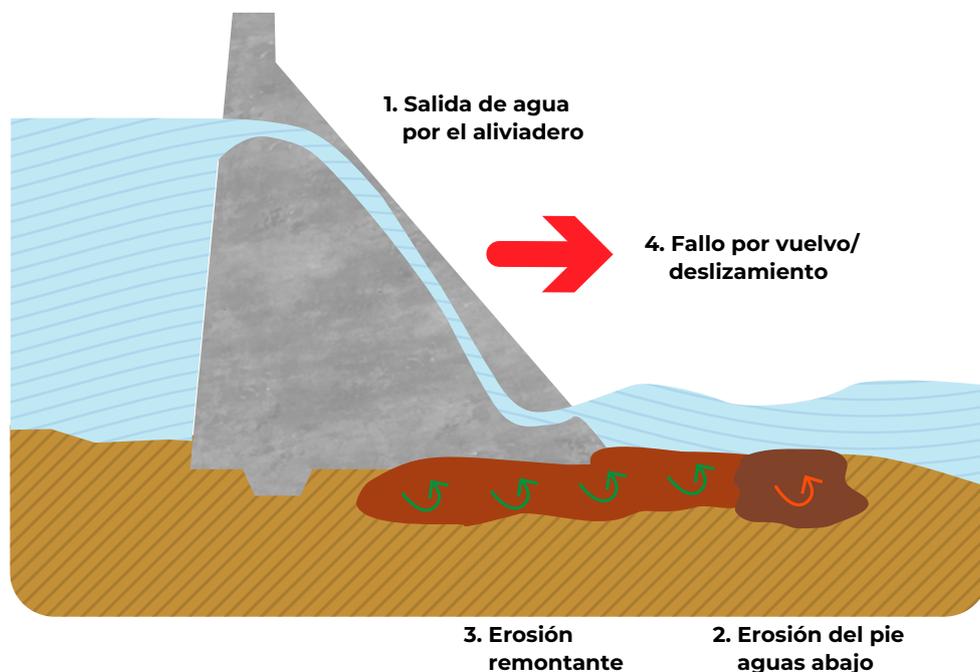


Factores que influyen en el riesgo

- Calidad de los estudios hidráulicos que permiten evaluar el comportamiento de los vertederos y la amortiguación de los caudales en el cauce.
- Ubicación del vertedero.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño utilizada para la comprobación del vertedero.
- Modificaciones de los órganos de desagüe de la presa durante la construcción de la misma.
- Existencia de procesos de degradación de la vegetación de las cuencas que pueden aumentar los caudales previstos.
- Existencia de zonas potencialmente erosionables o con inadecuado funcionamiento hidráulico en la salida del vertedero de las presas.

EROSIÓN DEL PIE DE VERTEDERO Y DESCALCE DE LA PRESA

En escenario normal con el aliviadero vertiendo, el resalto hidráulico se sale del cuenco de amortiguación por ser demasiado corto. A lo largo del tiempo, este resalto hidráulico erosiona el pie de presa, provocando el descalce y la rotura de la presa por vuelco o deslizamiento.



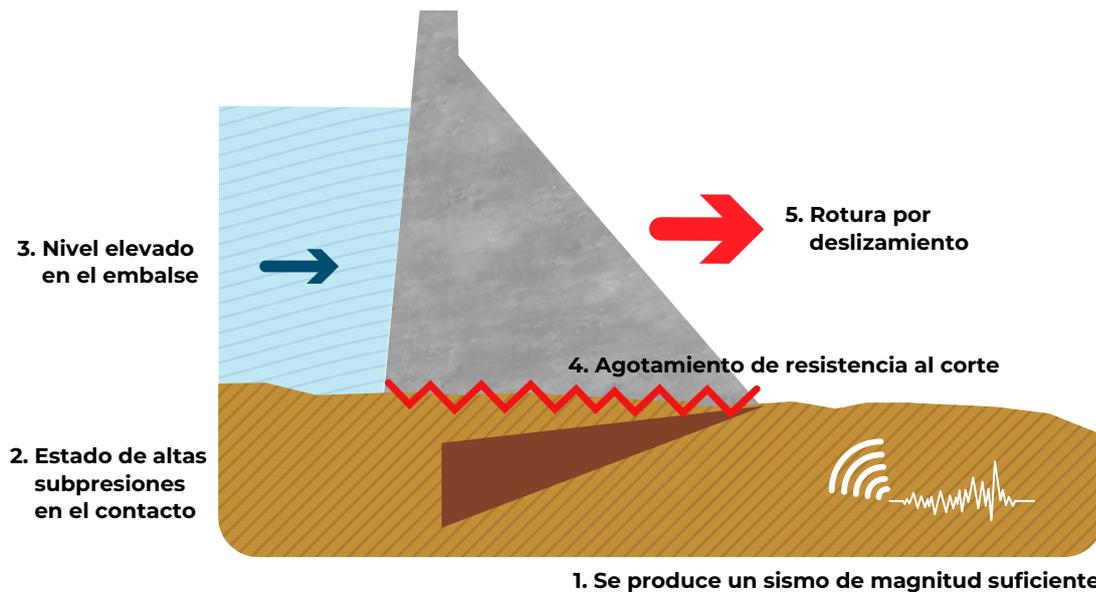
Factores que influyen en el riesgo

- Calidad de los estudios hidráulicos que permiten evaluar el comportamiento de los vertederos y la amortiguación de los caudales en el cauce.
- Experiencia de los proyectistas en la utilización y la calibración de los modelos hidrológicos empleados.
- Ubicación del vertedero.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Periodo de retorno de la crecida de diseño utilizada para la comprobación del vertedero.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Modificaciones de los órganos de desagüe de la presa durante la construcción de la misma.
- Existencia de procesos de degradación de la vegetación de las cuencas y/o cambio en los usos del suelo que pueden aumentar los caudales previstos.

3.2. Modos de Fallo geotécnicos – Presas de hormigón

DESLIZAMIENTO DEL PRESA POR SISMO

En escenario sísmico, con un nivel elevado en el embalse se produce un sismo de magnitud suficiente que produce un agotamiento de la resistencia al corte en el contacto presa-cimiento, lo que a su vez produce el fallo de la presa por el deslizamiento de algunos de sus bloques.

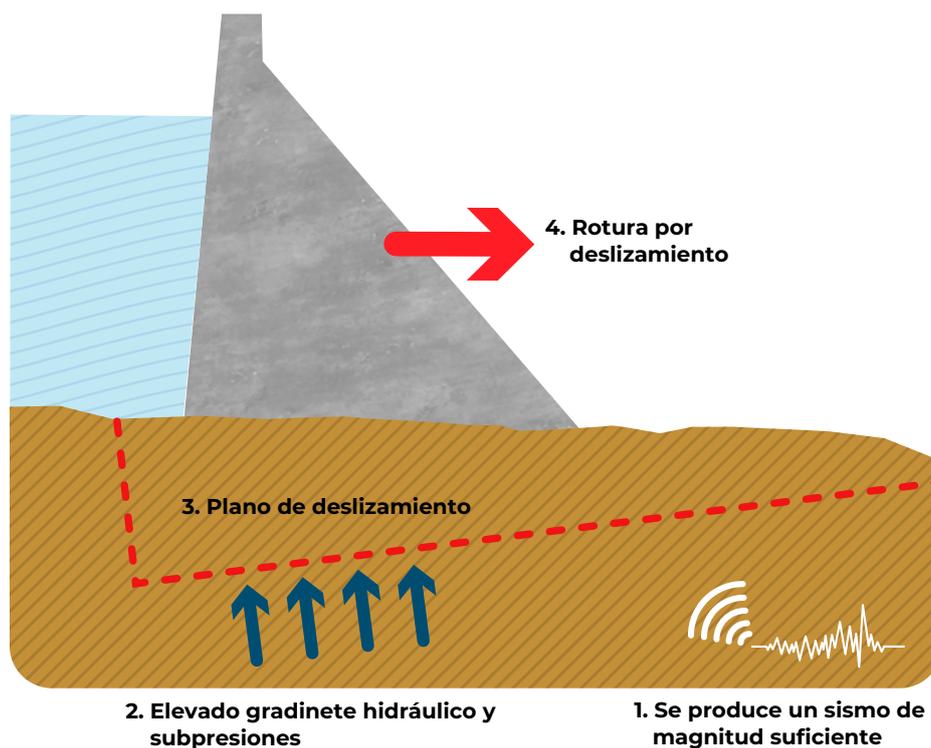


Factores que influyen en el riesgo

- Actividad sísmica de la zona del emplazamiento de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa, que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.
- Factores de seguridad calculados frente a deslizamientos.
- Disponibilidad de galería de inspección.
- Estado del sistema de drenaje.
- Existencia de instrumentos de auscultación y vigilancia que permitan el control de subpresiones.

DESLIZAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN POR SISMO

En escenario sísmico, se produce un estado de altas subpresiones y un elevado gradiente hidráulico en la cimentación de la presa debido a la permeabilidad de la cimentación, la inexistencia o ineficiencia del sistema de drenaje y el deterioro de la lámina impermeable. Este gradiente produce la migración de los finos de la cimentación hacia aguas abajo deteriorando su capacidad resistente, por lo que se forma un plano de deslizamiento en la cimentación de la presa. La combinación del empuje del agua y las subpresiones produce el fallo de la presa por el deslizamiento a través del plano de inestabilidad.

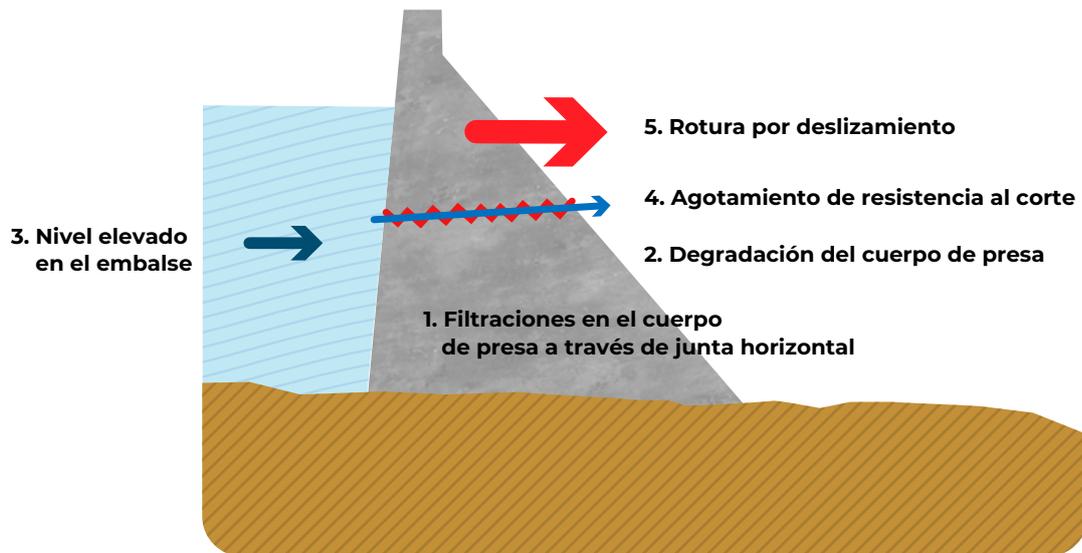


Factores que influyen en el riesgo

- Actividad sísmica de la zona del emplazamiento de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa, que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.
- Factores de seguridad calculados frente a deslizamientos.
- Disponibilidad de galería de inspección.
- Estado del sistema de drenaje.
- Existencia de sistemas que permitan el control de subpresiones.

DESlizamiento de cuerpo de presa

En escenario hidrológico o de explotación normal, con un nivel elevado en el embalse se produce una degradación del cuerpo de presa de hormigón por las filtraciones a través de alguna de las juntas horizontales o fisuras en el hormigón. La combinación del empuje del agua y las presiones en la fisura acaban produciendo un agotamiento de la resistencia al corte en el cuerpo de presa, lo que a su vez produce el fallo de la presa por el deslizamiento de su parte superior.

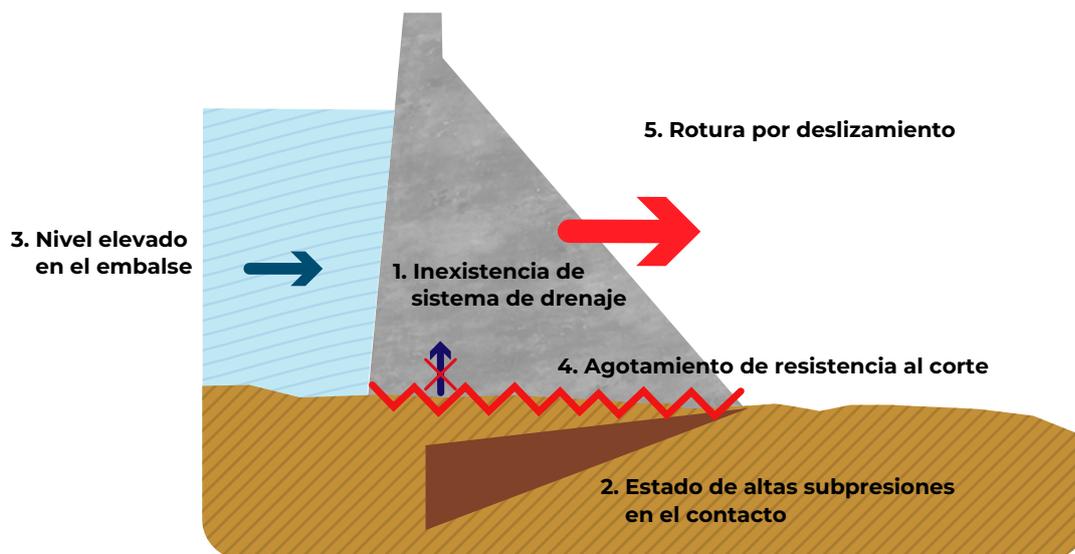


Factores que influyen en el riesgo

- Puesta en obra del hormigón, existencia de segregación de sus áridos.
- Existencia de juntas horizontales y disipación del calor durante el fraguado.
- Existencia de fisuración en el hormigón.
- Existencia de galerías para facilitar la vigilancia de la presa y el drenaje.
- Factores de seguridad frente a deslizamiento.
- Resistencia del hormigón.

DESLIZAMIENTO PRESA-CIMIENTO

En escenario hidrológico o de explotación normal, con un nivel elevado en el embalse se produce un estado de altas subpresiones en la cimentación de la presa debido al funcionamiento inadecuado o inexistencia del sistema de drenaje. La combinación del empuje del agua y las subpresiones acaba produciendo un agotamiento de la resistencia al corte en el contacto presa-cimiento, lo que a su vez produce el fallo de la presa por el deslizamiento de algunos de sus bloques.

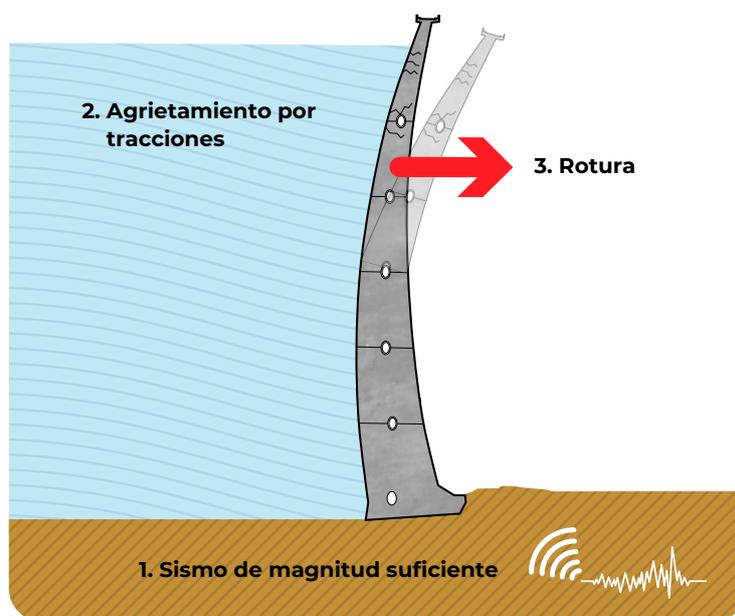


Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Puesta en obra del hormigón, existencia de segregación de sus áridos.
- Existencia de juntas y disipación del calor durante el fraguado.
- Existencia de fisuración en el hormigón.
- Existencia de juntas transversales de contracción y separación.
- Existencia de galerías para facilitar la vigilancia de la presa y el drenaje del cimiento.
- Factores de seguridad de diseño frente a deslizamientos y existencia de incertidumbres.
- Existencia de sistemas que permitan el control de subpresiones.

ROTURA DEL ARCO SUPERIOR O AGRIETAMIENTO POR SISMO EN PRESAS BÓVEDA

En escenario sísmico, se produce un terremoto de magnitud suficiente que genera excesivas tracciones que generan daños en el arco superior. Esto provoca un gran agrietamiento en la estructura llevando a la rotura del cuerpo de presa.

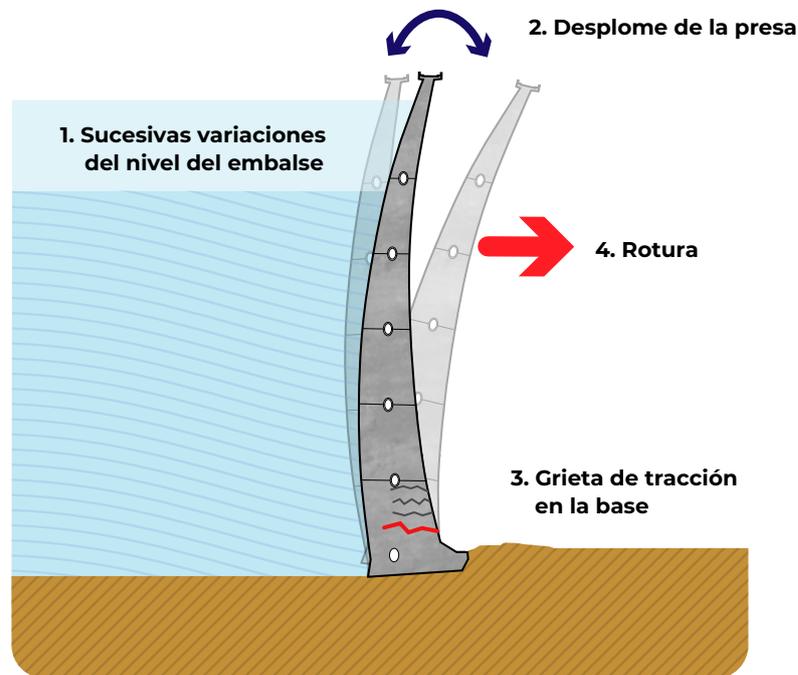


Factores que influyen en el riesgo

- Actividad sísmica de la zona del emplazamiento de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Frecuencia de inspecciones y monitorización.
- Conocimiento del comportamiento de la presa mediante la medición y control de los desplazamientos.
- Disponibilidad de galería de inspección.
- Factores de seguridad calculados frente a sismo, considerando el efecto sobre la presa de varios sismos encadenados.

ROTURA POR GRIETA DE TRACCIÓN EN LA BASE EN PRESAS BÓVEDA

En escenario de explotación normal, ante sucesivas variaciones del nivel del embalse se produce un desplome de la presa que genera un agrietamiento en la base. Debido a este agrietamiento, se produce una inestabilidad en la estructura que conduce a la rotura del cuerpo de presa.

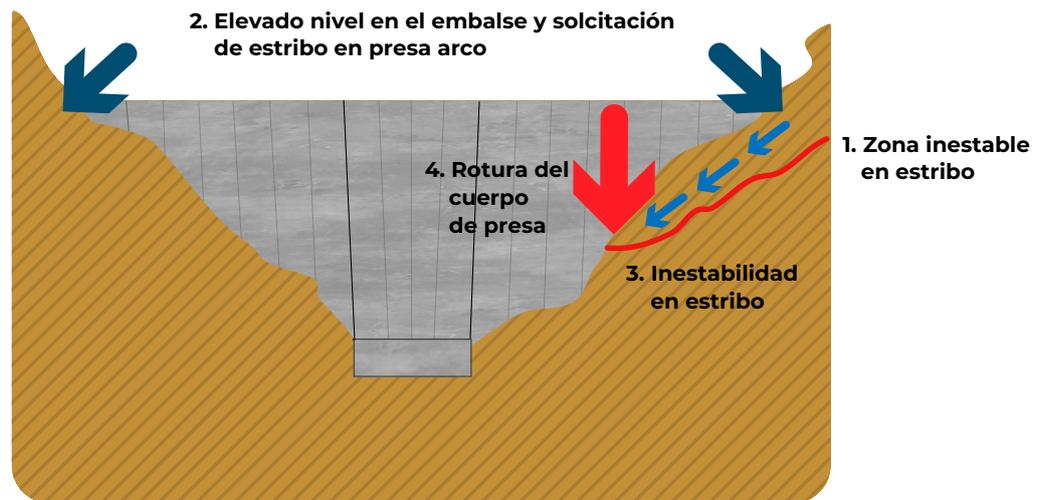


Factores que influyen en el riesgo

- Conocimiento del comportamiento de la presa mediante la medición y control de los desplazamientos.
- Existencia de muleta aguas arriba que evite el desplome de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Variabilidad del nivel del embalse.
- Existencia de presas aguas arriba que regulen el nivel del embalse.

INESTABILIDAD EN ESTRIBO Y ROTURA DE PRESA ARCO

En escenario hidrológico o de explotación normal, se produce el empuje de la presa arco hacia los estribos y debido a la existencia de un sustrato más débil en la roca de los estribos, se produce el deslizamiento de material de este estribo hacia el cauce y el descalce de la presa, lo que conlleva la pérdida de su resistencia estructural y su rotura.



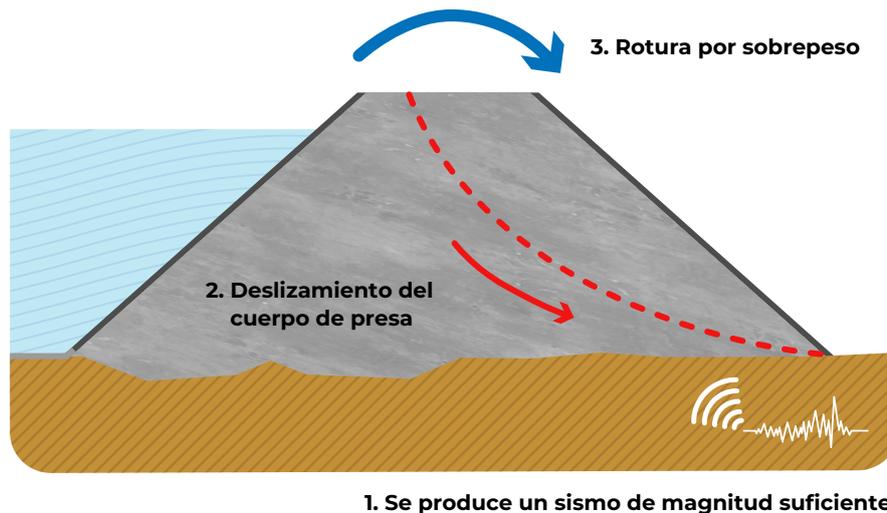
Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de ensayos geotécnicos, que corroboren que la ubicación de la presa y la selección de tipologías arco es adecuada.
- Existencia de filtraciones en los estribos.
- Sismicidad de la zona.

3.3 Modos de Fallo geotécnicos – Presas de materiales sueltos

INESTABILIDAD POR SISMO

En escenario sísmico, un sismo de magnitud suficiente produce aceleraciones en el terreno e importantes movimientos en el cuerpo de la presa. Estos movimientos producen el agotamiento de la resistencia al corte en el cuerpo de presa, lo que lleva a un deslizamiento global y la rotura por sobrepeso tras este deslizamiento.

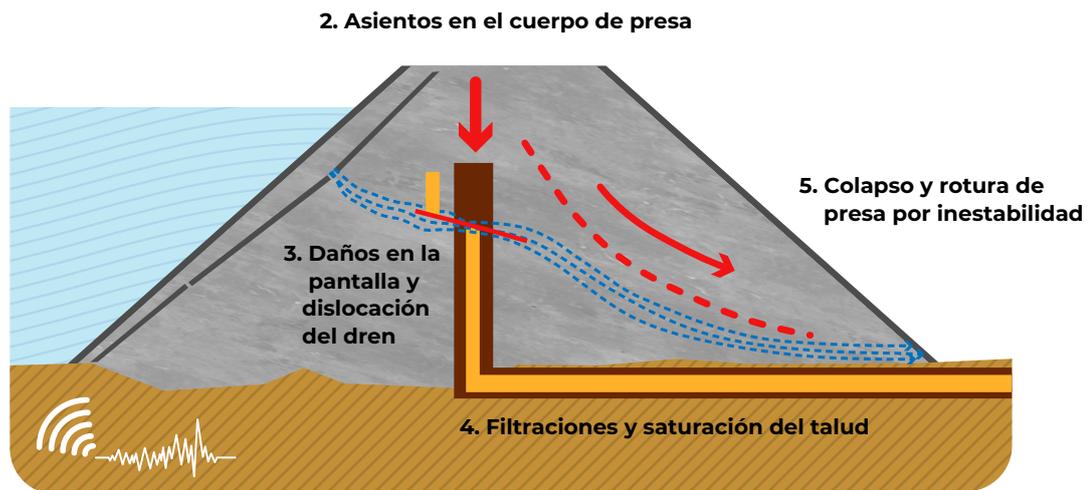


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Actividad sísmica de la zona del emplazamiento de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa, que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

INESTABILIDAD POR FALLO DEL DREN TRAS SISMO

En escenario sísmico, un sismo de magnitud suficiente produce el asiento del cuerpo de presa, dañando la pantalla y sus juntas y limitando la capacidad del dren por su dislocación. Debido a estos daños en la pantalla, se produce un aumento en las filtraciones del cuerpo de presa que saturan el talud de la misma (al no ser el dren efectivo) y generan una gran inestabilidad del cuerpo de presa y la rotura.



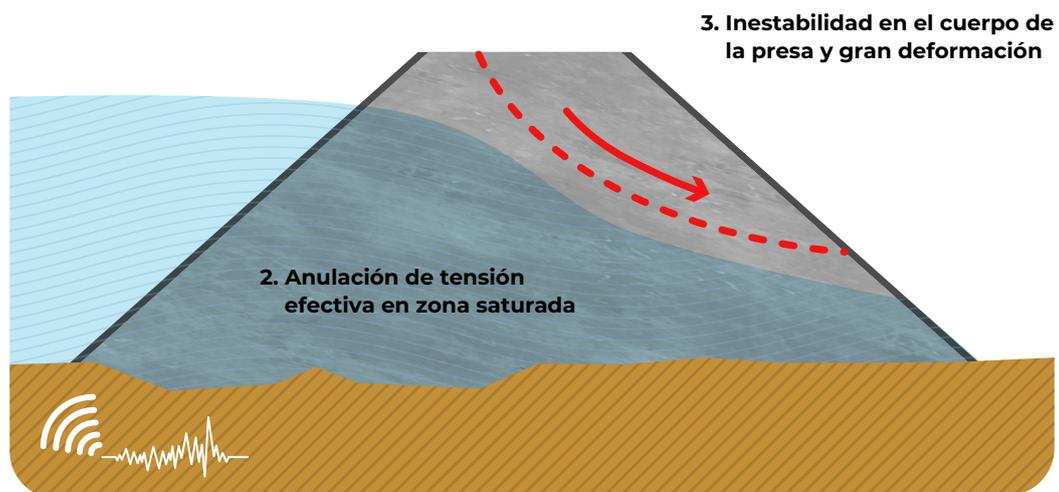
1. Se produce un sismo de magnitud suficiente

Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Actividad sísmica de la zona del emplazamiento de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa, que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

LICUEFACCIÓN POR SISMO

En escenario sísmico, un sismo de magnitud suficiente produce aceleraciones en el terreno e importantes movimientos en el cuerpo de presa. Estos movimientos producen la anulación de la tensión efectiva de los materiales no cohesivos de la cimentación en el pie del cuerpo de presa, debido a la sobrepresión dinámica producida en las presiones intersticiales. Esto produce una licuefacción de estos materiales no cohesivos en el pie de presa y una inestabilidad importante del pie de presa que lleva a la rotura por sobrepaso tras esta inestabilidad.

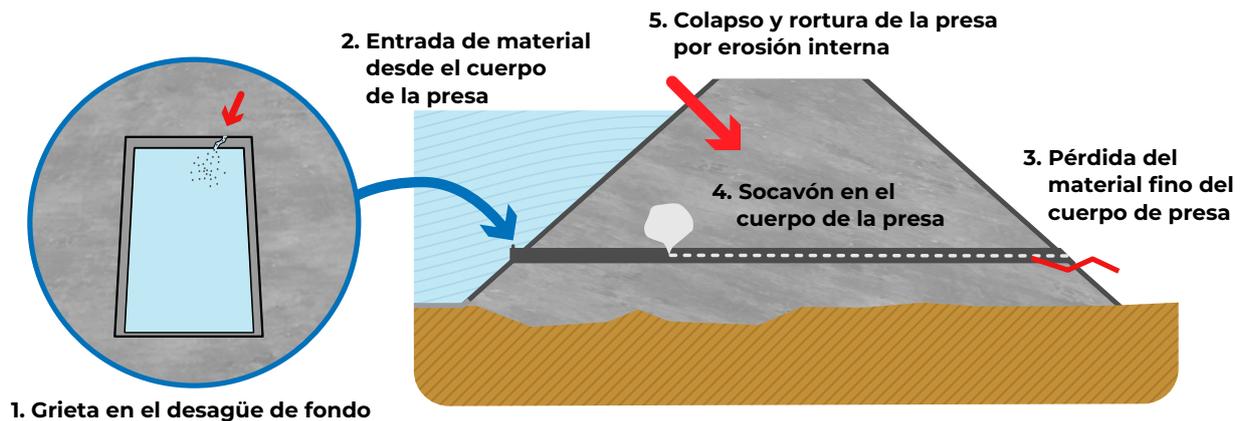


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Actividad sísmica de la zona del emplazamiento de la presa.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa, que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

EROSIÓN INTERNA A TRAVÉS DE CONDUCTO

En escenario de explotación normal, se produce una grieta en el desagüe de fondo por la que penetra material del cuerpo de presa. Esta entrada de material produce arrastre del material aguas abajo. Este arrastre progresa formando un hueco en el cuerpo de presa, derivando en inestabilidades del talud en forma de socavones que finalmente llevan a la rotura por erosión interna de la presa.

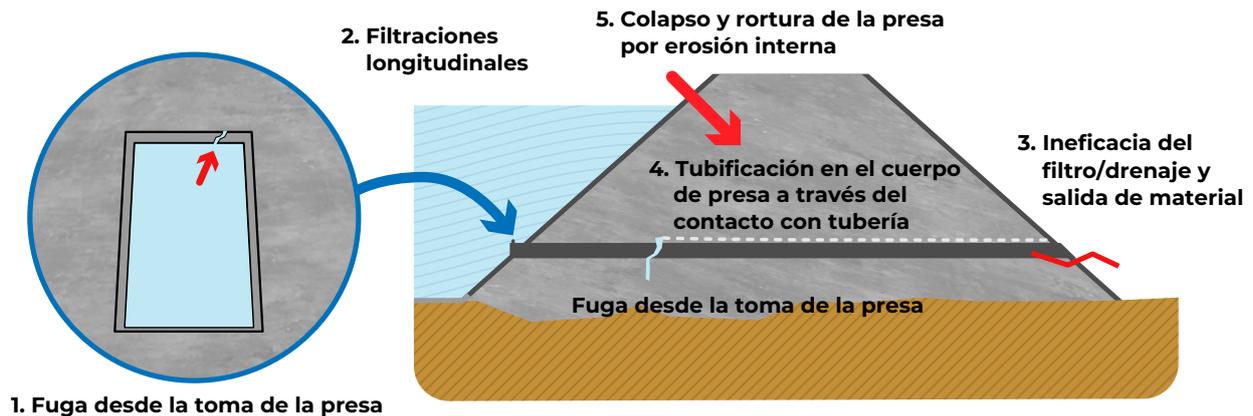


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Sustitución de materiales pétreos para los filtros de las presas por geotextiles, con menor durabilidad y eficiencia menos comprobada.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa, que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

EROSIÓN INTERNA POR FUGA EN LA OBRA DE TOMA/DESAGÜE DE FONDO

En escenario de operación normal se produce una fuga en la tubería de toma o filtraciones en el desagüe de fondo que logra alcanzar el cuerpo de la presa. Estas filtraciones junto con el inadecuado funcionamiento del filtro, producen arrastre del material aguas abajo. Este arrastre progresa formando tubificaciones, las cuales derivan en inestabilidades del talud en forma de socavones que finalmente llevan a una rotura de la presa.

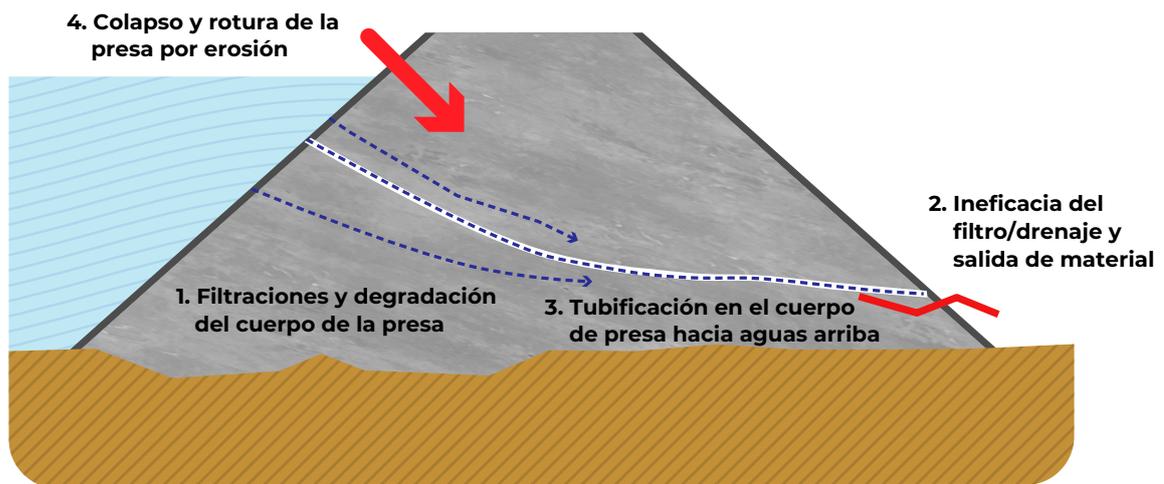


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.
- Frecuencia de inspecciones de los conductos.

EROSIÓN INTERNA EN EL CUERPO DE PRESA DE MATERIALES SUELTOS

En escenario de operación normal, existe una red de filtraciones con un gradiente hidráulico suficiente para originar una filtración con arrastre de material sin que un filtro evite este arrastre. El fenómeno progresa y se origina una erosión remontante hacia el espaldón aguas arriba por un proceso de tubificación, provocando un lavado del material más fino, que deriva en inestabilidades del talud en forma de socavones que finalmente llevan a la rotura de la presa.

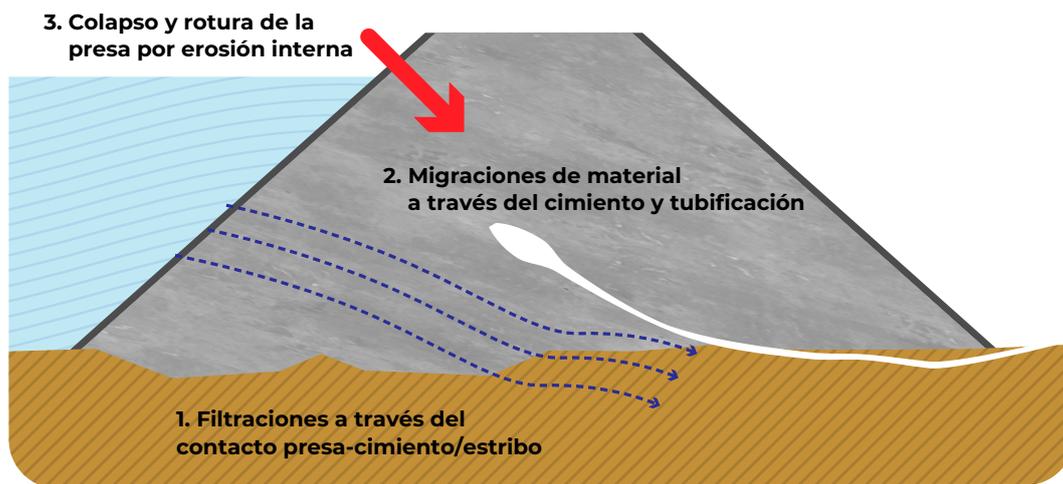


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

EROSIÓN INTERNA DESDE LA PRESA HACIA LA CIMENTACIÓN

En escenario de operación normal, se producen filtraciones desde el cuerpo de presa hacia la cimentación/estribos debido a la presencia de zonas de mayor permeabilidad. Debido a un inadecuado funcionamiento del filtro se produce arrastre de material formando tubificaciones que finalmente llevan a una rotura de la presa por una combinación de mecanismos de inestabilidad del talud aguas abajo y erosión interna.

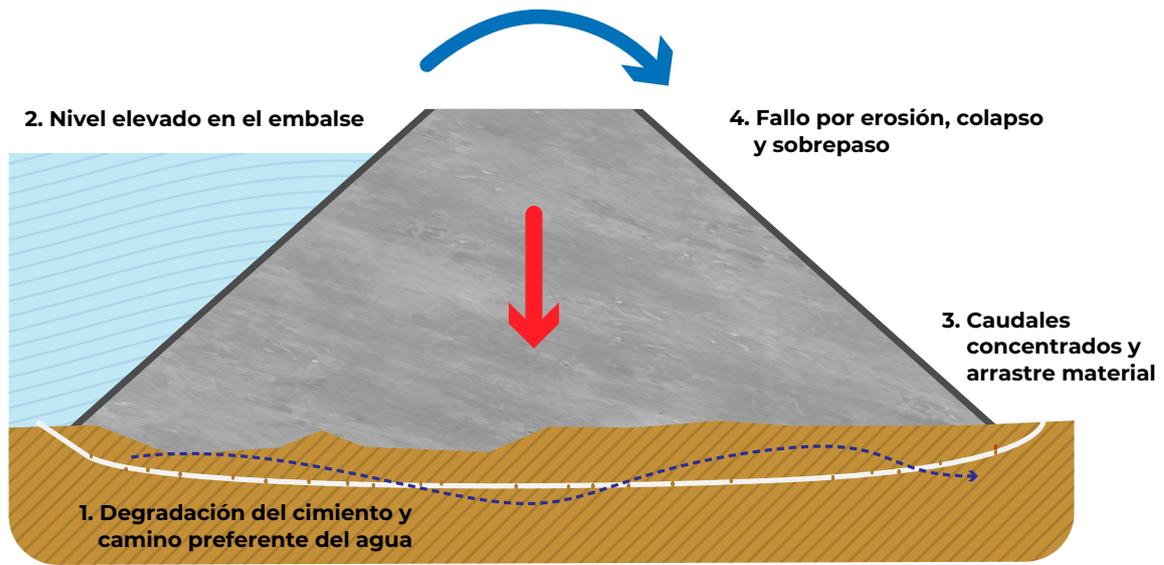


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

EROSIÓN INTERNA EN LA CIMENTACIÓN DE LA PRESA

En escenario de operación normal, se produce a lo largo del tiempo una degradación del cemento por el paso del flujo de agua. Con un nivel alto del embalse se produce un aumento de las filtraciones y el arrastre del material a través de la cimentación con salida hacia aguas abajo. Este arrastre progresa formando tubificaciones que finalmente llevan a la formación de una gran cavidad en el cemento que, al colapsar, produce un gran asiento en el cuerpo de la presa y la rotura de éste por sobrepaso.

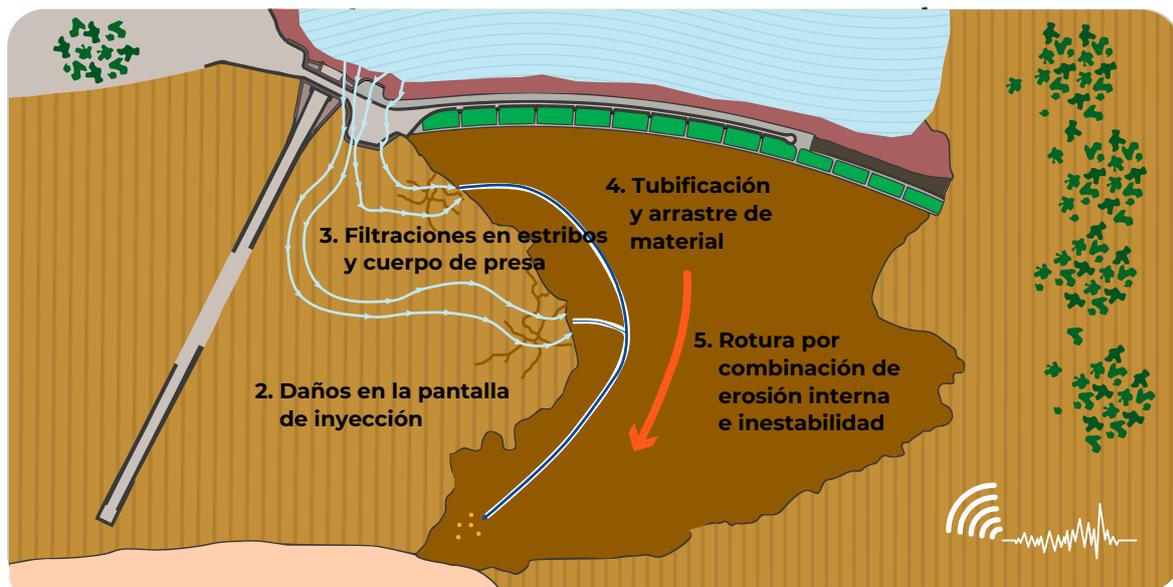


Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.
- Impermeabilización de la cimentación.

ROTURA POR EROSIÓN INTERNA DESDE ESTRIBOS TRAS SISMO

En escenario sísmico, se da un sismo de magnitud suficiente que genera daños en la pantalla de inyección de los estribos. Estos daños en la pantalla de inyección merman la capacidad de ésta de sellar las posibles vías de filtración en los estribos, permitiendo que el agua se filtre a través del cuerpo de presa y erosionando la presa internamente. Esta erosión interna progresa comprometiendo la estabilidad estructural de la presa que finalmente falla por una combinación de mecanismos de inestabilidad del talud aguas abajo y erosión interna.



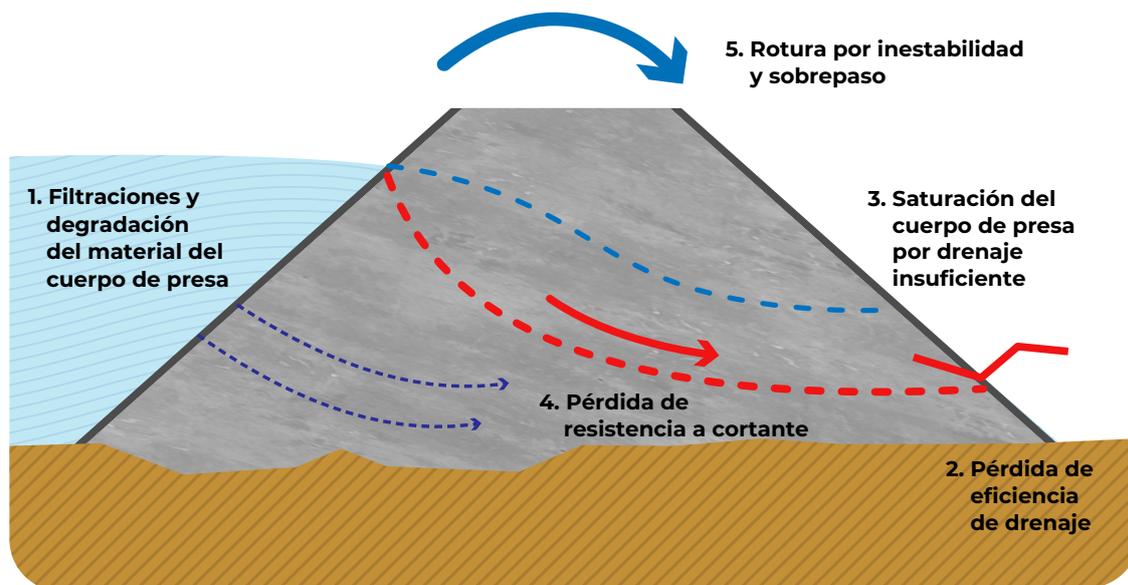
1. Se produce un sismo de magnitud suficiente

Factores que influyen en el riesgo

- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Existencia de mantenimiento de las presas y desarrollo vegetativo que pueda dificultar la inspección.
- Información de base sobre los materiales empleados en la presa que asegure el uso de materiales adecuados.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Plazos para la construcción de presas que influyen en la compactación de los materiales.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.
- Impermeabilización de la cimentación.

INESTABILIDAD AGUAS ABAJO POR SATURACIÓN

En escenario de operación normal, debido a un mal funcionamiento de los filtros/drenes se produce una saturación del cuerpo de presa. Esta saturación conlleva la disminución de los parámetros resistentes del cuerpo, produciendo la formación de una superficie inestable en el cuerpo de presa y un deslizamiento global del talud aguas abajo, lo que conlleva la rotura de la presa.

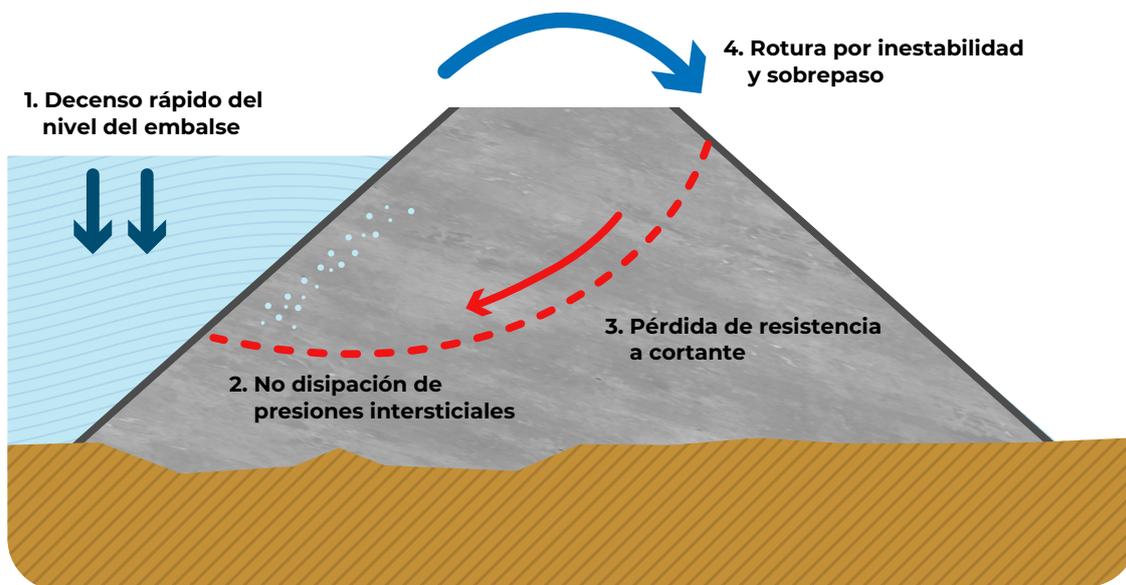


Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

INESTABILIDAD POR DESEMBALSE RÁPIDO

En escenario de operación normal, se produce un descenso rápido del nivel de embalse que conlleva la no disipación de las presiones intersticiales en el cuerpo de presa de materiales sueltos. Esto produce la formación de una superficie inestable en el cuerpo de presa y un deslizamiento global del talud aguas arriba, lo que conlleva la rotura de la presa.



Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Proceso de compactación de los materiales del cuerpo de presa y especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Materiales utilizados para filtros y drenes.
- Existencia de desagüe de fondo que permita el vaciado del embalse si se detecta un problema en la presa.

3.4. Modos de Fallo del embalse

VACIADO DEL EMBALSE POR ESTRIBOS/LADERAS EMBALSE

Tras la construcción de la presa y al iniciar el llenado del embalse, se detecta un estrato especialmente permeable en las laderas del embalse que produce filtraciones o se generan estas filtraciones debido a la elevada meteorización de los estribos. Estas filtraciones son de suficiente magnitud como para hacer inviable el llenado del embalse, provocando su vaciado.

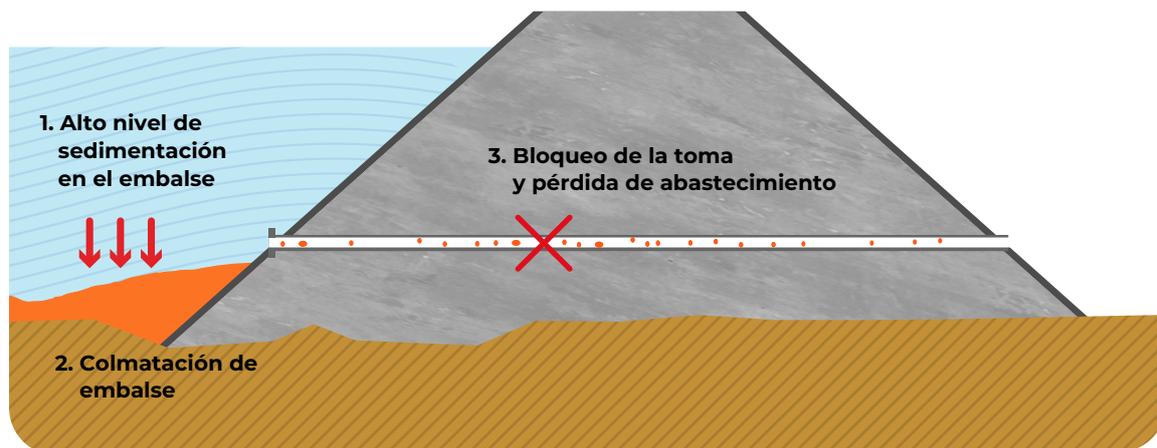


Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Existencia de estudios sobre caracterización granulométrica de los suelos en el embalse y los potenciales procesos de erosión y sedimentación.
- Disponibilidad de estudios geológicos (presencia de fallas).

COLMATACIÓN DEL EMBALSE POR SEDIMENTOS

En escenario de operación normal, se produce un aumento de las erosiones de material en la cuenca aguas arriba y de los procesos de sedimentación en el embalse reduciendo su volumen. Al cabo del tiempo, el nivel de sedimentos en el embalse es suficiente para llegar a la tubería de toma, produciendo una entrada de sedimentos en las tuberías, bloqueándolas e impidiendo finalmente el abastecimiento de agua desde el embalse.

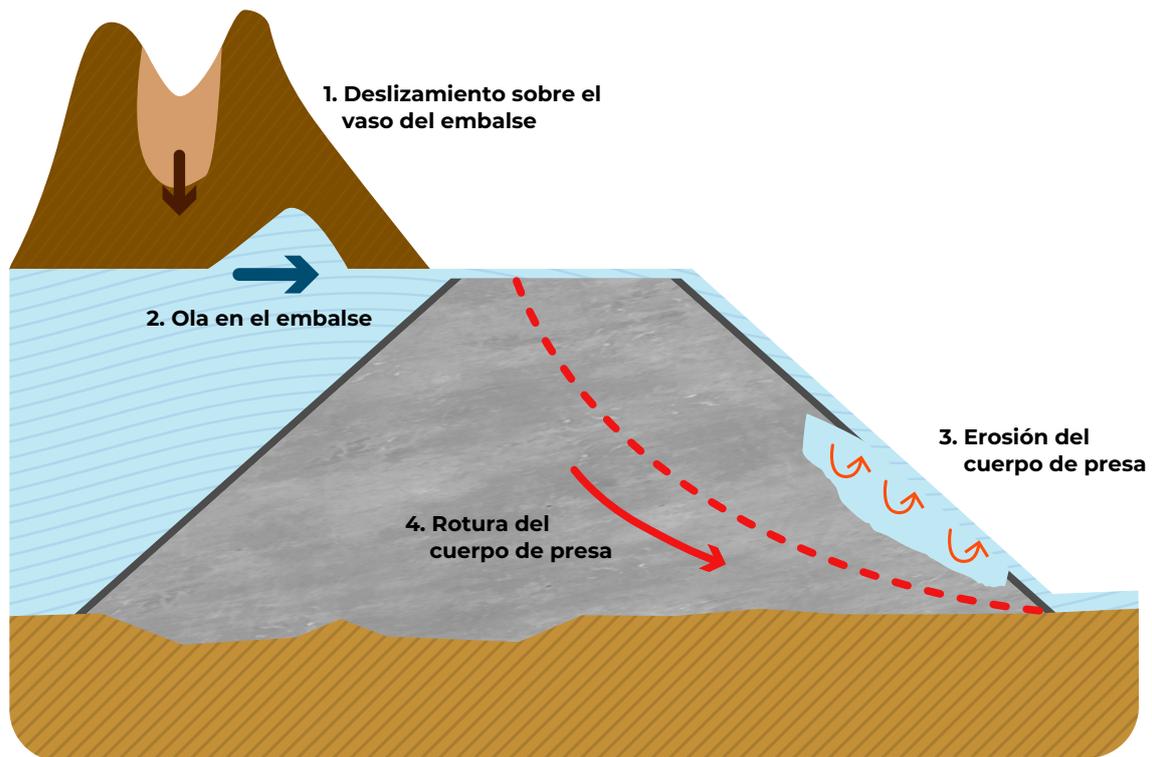


Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Existencia de estudios sobre caracterización granulométrica de los suelos en el embalse y los potenciales procesos de erosión y sedimentación.
- Plazos suficientes para realizar los estudios de sedimentación.
- Experiencia en el diseño y utilización de los desagües de fondo para la limpieza de sedimentos.
- Gestión y reforestación de la cuenca aguas arriba durante el proyecto, la construcción y la explotación de la presa.
- Presencia de especialistas en procesos de sedimentación de embalses.
- Previsión del volumen muerto del embalse y su vida útil.
- Reforestación de la cuenca aguas arriba con especies autóctonas o foráneas, lo que puede conllevar impactos ambientales significativos.
- Influencia del cambio climático y de la desertificación en los procesos de erosión en las cuencas.
- Inclusión de planes de contingencia ambiental en el proyecto.

INESTABILIDAD DE LADERAS EN EMBALSE Y ROTURA DE PRESA

En escenario sísmico o de operación normal, se produce un deslizamiento de un elevado volumen de tierra en las laderas que rodean el embalse. Este deslizamiento al caer en el embalse produce una ola de magnitud suficiente como para producir un sobrevertido sobre la coronación de la presa, dañando los espaldones de esta obra e incluso su rotura, produciendo importantes consecuencias en las zonas urbanas aguas abajo.



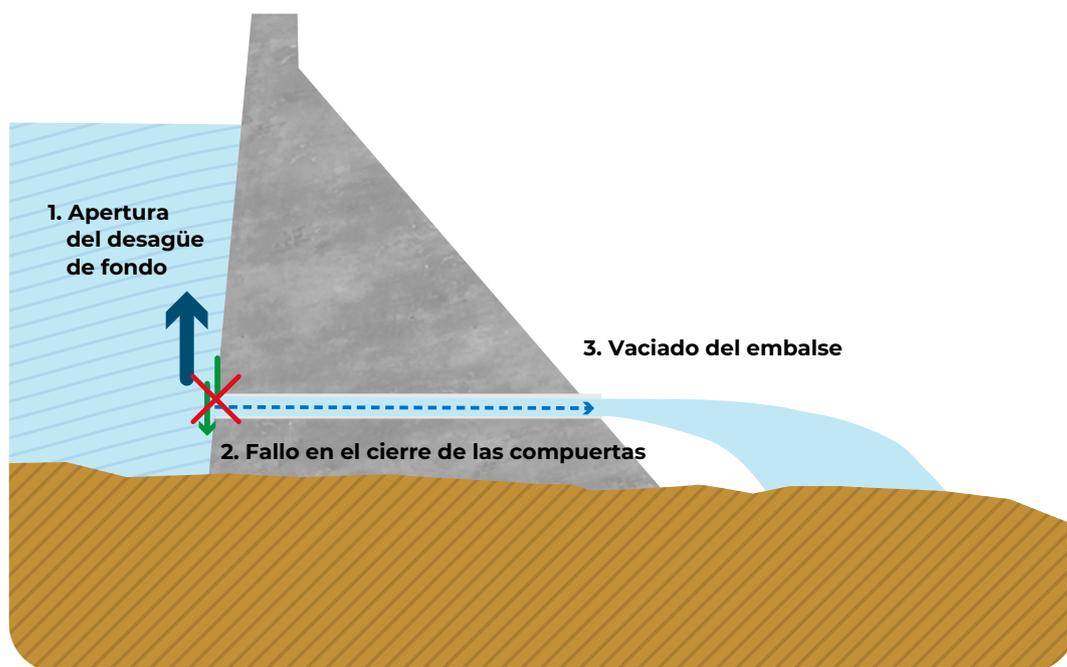
Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Existencia de estudios sobre caracterización granulométrica de los suelos en el embalse y los potenciales procesos de erosión y sedimentación.
- Resguardo disponible.
- Disponibilidad de estudios geotécnicos del vaso del embalse (identificación de fallas y/o posibles zonas de deslizables).
- Capacidad de los órganos de desagüe que permitan un vaciado preventivo ante posibles movimientos de laderas del embalse.
- Monitorización y vigilancia de zonas inestables del embalse.

3.5. Otros Modos de Fallo

ROTURA DE DESAGÜE DE FONDO Y VACIADO

En escenario de explotación normal, se hace necesario abrir el desagüe de fondo para limpiar los sedimentos o garantizar los caudales ecológicos aguas abajo. Cuando se quiere cerrar el desagüe de fondo, se produce un fallo en el cierre de la compuerta por la existencia de algún arrastre que lo impide o algún problema mecánico o eléctrico, llevando a la imposibilidad de cierre del desagüe y el vaciado del embalse, con las consiguientes consecuencias económicas por la pérdida de esta agua.

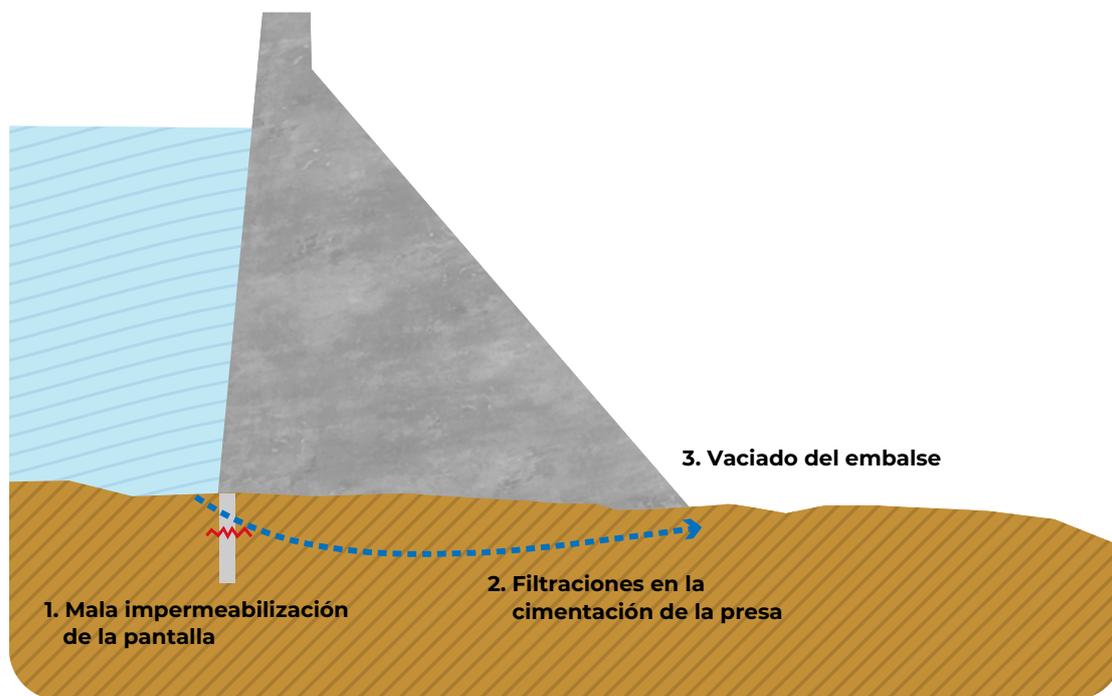


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de labores de mantenimiento de las presas y sus válvulas.
- Existencia de sistemas que eviten la entrada de grandes sólidos al desagüe de fondo.
- Número de compuertas del desagüe de fondo y existencia de sistema de cierre de emergencia aguas arriba.
- Disponibilidad de memoria de cálculo y diseño de las compuertas, para que resistan las solicitaciones en su operación.
- Sustitución de las compuertas previstas en proyecto por otras durante la construcción.
- Operación del desagüe de fondo de forma periódica para limpieza de sedimentos y asegurar su correcto funcionamiento.

FALLO DE LA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN Y VACIADO

En la operación normal del embalse, debido a un fallo de la pantalla de impermeabilización, se producen filtraciones por la cimentación, derivando en el vaciado del embalse, con las consiguientes consecuencias económicas por pérdida de esta agua.

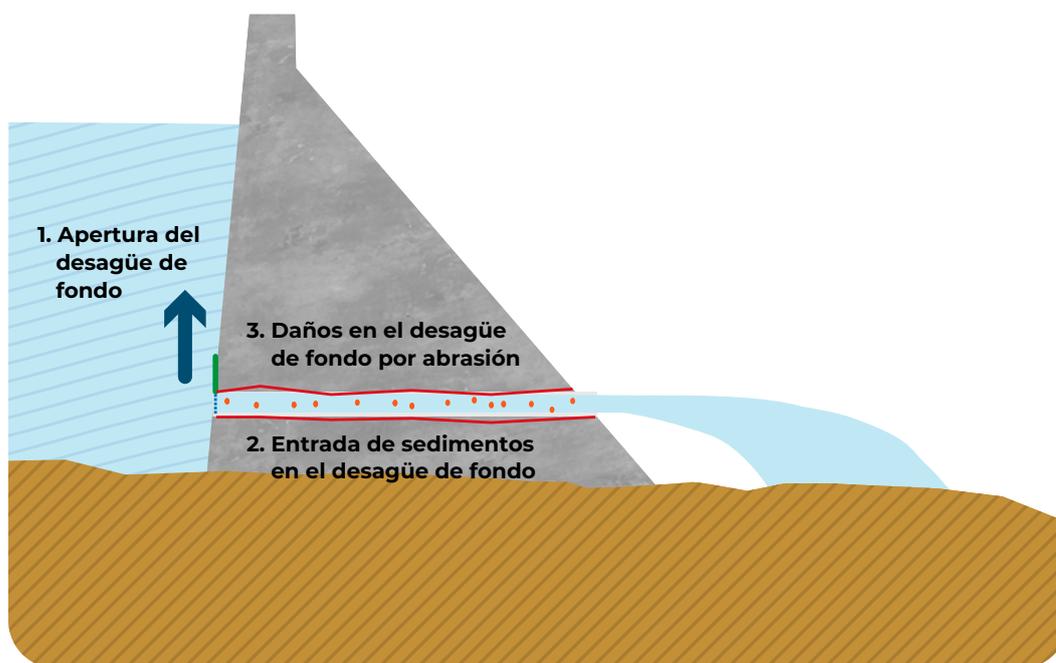


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de campañas de inyecciones para impermeabilizar el terreno.
- Disponibilidad de estudios y ensayos geotécnicos.
- Disponibilidad de piezómetros y galería de inspección.
- Frecuencia del registro de datos (monitorización).
- Frecuencia de inspecciones visuales.

DAÑOS EN EL DESAGÜE DE FONDO POR SEDIMENTOS

En escenario de explotación normal, se hace necesario abrir el desagüe de fondo para limpiar los sedimentos o garantizar los caudales ecológicos aguas abajo. Sin embargo, estos sedimentos pueden dañar el conducto del desagüe de fondo por abrasión, inhabilitando su uso durante el periodo de tiempo de reparación o pudiendo afectar a otros elementos si no se detecta a tiempo.

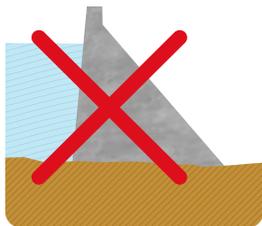


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de sistemas que eviten la entrada de grandes sólidos al desagüe de fondo.
- Frecuencia de la operación del desagüe de fondo.

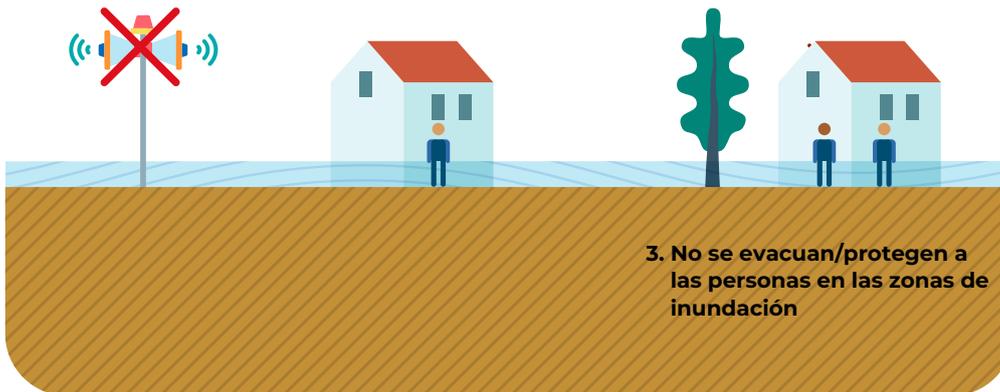
INADECUADA RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS EN CASO DE ROTURA DE PRESA

En escenario hidrológico, sísmico o de operación normal, se produce una rotura de la presa producida por un grave problema de seguridad. Debido a un error en la comunicación de las alertas y/o la inexistencia de procedimientos de aviso y evacuación de la población, no se realizan los avisos adecuadamente y la población no abandona las propiedades antes de la inundación, aumentando las consecuencias sociales de la rotura de la presa.



1. Rotura de presas aguas arriba

2. No se realizan los avisos y/o funcionan adecuadamente los procedimientos



3. No se evacuan/protegen a las personas en las zonas de inundación

Factores que influyen en el riesgo

- Campañas de información y sensibilización de la comunidad sobre la importancia y los riesgos de un proyecto de presa localizado aguas arriba.
- Existencia de un mantenimiento y la realización de pruebas de los sistemas de aviso a la población.
- Grado de preparación de los organismos responsables de gestión de emergencias.
- Comunicación entre los responsables de operación de la presa y los organismos de gestión de emergencia.

CONFLICTOS SOCIALES POR FALTA DE SOCIALIZACIÓN DE NUEVOS PROYECTOS

Durante la construcción de las obras y debido a la incorrecta socialización de las obras especialmente entre la población cercana al embalse y los futuros beneficiarios, se producen conflictos sociales que van en aumento, produciendo el rechazo a la presa y bloqueos durante la construcción de las obras, impidiendo el éxito del proyecto desarrollado.

1. Conflictos sociales por mala socialización de las obras



2. Bloqueos y robos durante la construcción de las obras



Factores que influyen en el riesgo

- Acompañamiento social en las fases de preinversión, de proyecto y de construcción, de manera que los beneficiarios conozcan el proyecto.
- Disponer de vigilancia durante la construcción para evitar robos.

DESARROLLO DE ASENTAMIENTOS EN EL EMBALSE

Tras la construcción de la presa y el llenado del embalse, se desarrollan viviendas y actividades comerciales y turísticas alrededor del embalse por la disponibilidad del agua. Este desarrollo produce una contaminación del agua del embalse y la degradación de la cuenca aguas arriba, afectando a la calidad del agua y a su uso, así como a la respuesta hidrológica de la cuenca.

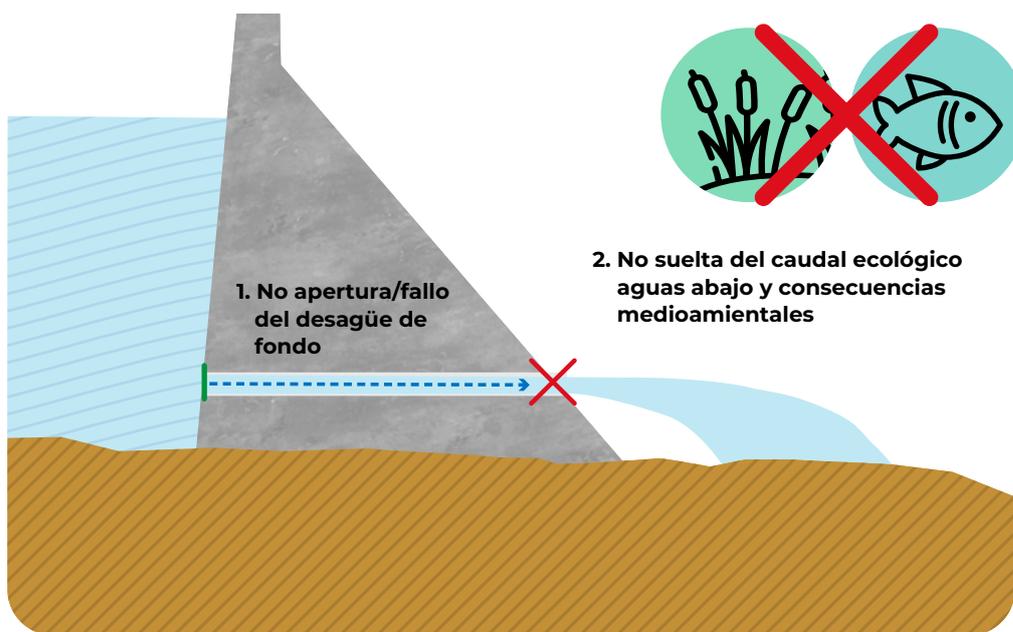


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de una franja de protección para evitar el desarrollo urbano alrededor del embalse.
- Acompañamiento social en las fases de preinversión, de proyecto y de construcción, de manera que los beneficiarios conozcan el proyecto.
- Campañas de información y sensibilización de la comunidad sobre la importancia de mantener en buen estado la cuenca aguas arriba.
- Capacidades de las comunidades que posteriormente se encargarán del funcionamiento del proyecto, lo que afecta a la sostenibilidad del mismo.
- Infraestructura de saneamiento urbano en forma conjunta con el desarrollo de viviendas.

RETENCIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

En escenario de operación normal, debido a un problema en alguna de las válvulas o compuertas de las tomas y desagües o debido a las retenciones de la población beneficiaria, no se suministra el caudal ecológico hacia el cauce aguas abajo, lo que produce elevadas consecuencias medioambientales en la fauna y flora del río.

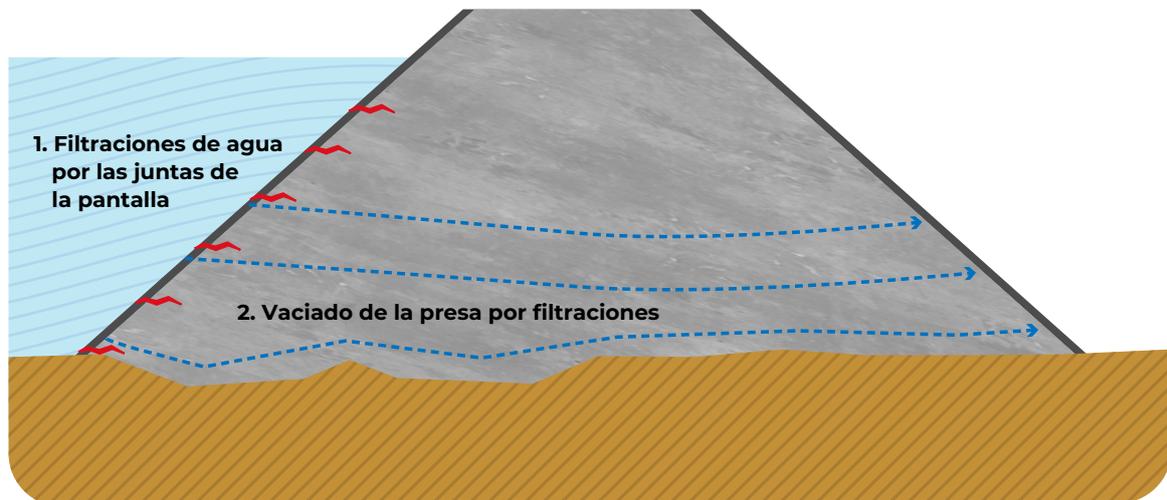


Factores que influyen en el riesgo

- Campañas de información y sensibilización de la comunidad sobre la importancia del caudal ecológico.
- Disponibilidad de un análisis del caudal ecológico necesario a lo largo del año, no únicamente un porcentaje fijo.
- Existencia de planes de contingencia ambiental en el proyecto.
- Existencia de mantenimiento de las compuertas de los órganos de desagüe.

AGRIETAMIENTO DE LA PANTALLA DE HORMIGÓN

En escenario de operación normal, debido al fallo de las juntas de las pantallas o el agrietamiento de la pantalla, se producen filtraciones a través del cuerpo de presa o de la cimentación (dependiendo de qué junta haya fallado). Estas filtraciones son elevadas y acaban provocando el vaciado de la presa.



Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de mantenimiento de la pantalla de impermeabilización.
- Existencia de auscultación.
- Frecuencia de inspecciones visuales.
- Existencia de galería de rastrillo e inspección de filtraciones en la misma.
- Tipología de la presa de materiales sueltos.

4. Relación de estudios científico-técnicos

En este apartado se mencionan una serie de estudios científico-técnicos, según la tipología de Modos de Fallo, que deben tenerse en cuenta para reducir el riesgo de los Modos de Fallo y disminuir la incertidumbre para mejorar el diseño de las infraestructuras.

MODO DE FALLO HIDROLÓGICO

- Recopilar datos meteorológicos.
- Tener en cuenta eventos extremos incorporando los efectos por cambio climático.
- Realizar una modelación hidrológica de calidad y calibración del modelo.
- Considerar las actividades de la cuenca que puedan tener influencia sobre la presa.
- Plan de gestión de la cuenca.
- Plan de acción durante emergencias.

MODO DE FALLO GEOTÉCNICO

- Estudio estructural de la estabilidad de la presa para situación estática y dinámica.
- Estudio geológico y geotécnico de la cimentación.
- Estudio geológico y geotécnico del material que conforme la presa.
- Estudio de amenaza sísmica.

5. Recomendaciones y mejores prácticas

A continuación, se recopilan una serie de recomendaciones y mejores prácticas de intervención según las tipologías de Modos de Fallo.

MODO DE FALLO HIDROLÓGICO

Para disminuir el riesgo de los Modos de Fallo de tipología hidrológica se tendrá en cuenta los siguientes aspectos:

- Determinación de los hidrogramas de las previsible avenidas afluentes al embalse, junto con la caracterización estadística de sus probabilidades de ocurrencia. Se analizarán, asimismo, y se tendrán en cuenta, las avenidas históricas. Se considerará el conocimiento disponible sobre los posibles cambios a largo plazo en las condiciones hidrológicas de la cuenca y las posibles repercusiones del cambio climático. Se analizará y concluirá la incidencia de los caudales desaguados por los embalses situados aguas arriba. Se justificará el grado de fiabilidad de las metodologías utilizadas en el proyecto para la determinación de las diferentes avenidas y su adecuación a las características de la cuenca vertiente al embalse.
- La seguridad hidrológica del sistema presa-embalse se definirá en términos de período de retorno (o su inversa, la probabilidad anual de excedencia) asociado a distintos niveles de embalse y se definirán los resguardos asociados que podrán tener carácter estacional.
- Para el dimensionamiento del sistema de desvío del río durante la construcción de la presa se determinará una avenida de construcción, en función de los riesgos asumibles durante el periodo de ejecución de las obras.
- En las presas de materiales sueltos, se tendrá en cuenta la máxima sobreelevación del oleaje originada por la acción del viento y no se admitirán vertidos sobre la coronación, salvo que estén específicamente proyectadas para ello. En las presas de fábrica sólo se admitirán vertidos accidentales sobre la coronación debido a las sobreelevaciones del oleaje producidas por la acción del viento. En todo caso, se justificará que tales vertidos no comprometen la seguridad de la presa.
- Los órganos de desagüe se dimensionarán en función de las avenidas que se hayan seleccionado y los resguardos establecidos. Se comprobará que el funcionamiento de los órganos de desagüe en condiciones límite no compromete la seguridad de la presa. Los desagües intermedios y de fondo de las presas se dimensionarán de forma que puedan facilitar el control del nivel del embalse, en particular durante su primer llenado.
- Los elementos de control de los órganos de desagüe deberán estar proyectados de tal forma que se asegure su funcionamiento en cualquier situación y, en particular, en situaciones de avenida. Deberán disponer de dispositivos de accionamiento redundantes, estar alimentados por fuentes de energía independientes y tener accesos garantizados y controlados. Se deberá asegurar que los elementos de control de los órganos de desagüe presentan una alta fiabilidad.
- Los gálibos y la luz entre pilas de los vanos de los aliviaderos de superficie estarán diseñados para permitir el paso de los elementos flotantes que puedan llegar al

embalse durante las avenidas. Los aliviaderos controlados exclusivamente por compuertas deberán disponer, como mínimo, de dos vanos. Los desagües de fondo constarán como mínimo de dos conductos, provistos, cada uno, de, al menos, dos elementos de cierre instalados en serie susceptibles de ser ataguados en su extremo de aguas arriba, en caso de necesidad.

- No se permitirán los conductos de desagüe en presión discurriendo a través del cuerpo de una presa de materiales sueltos, a menos que estén situados en el interior de galerías que los aíslen del contacto directo con el material de la presa o, si el cimientado lo permite y se justifica adecuadamente, en zanjas excavadas bajo el cuerpo de presa, convenientemente diseñadas, excavadas y hormigonadas posteriormente.
- De acuerdo a recomendaciones internacionales, las presas no deben ser sobrepasadas por avenidas inferiores a 5000-10 000 años de período de retorno y, en el caso de presas de materiales sueltos, debe no solo considerarse la avenida de 10 000 años sino garantizarse un resguardo equivalente a la altura de ola de viento en dicha situación próxima al sobrepaso.
- De acuerdo a recomendaciones internacionales, las presas y sus órganos de desagüe deben funcionar correctamente para avenidas de período de retorno de 1000 años.
- En caso de que haya falta de datos de precipitaciones en el país por escasez de red de estaciones meteorológicas y alta variabilidad geográfica de la precipitación, se realizarán los análisis y ajustes pertinentes de las series históricas.
- En el caso de que la red de aforo de caudales sea muy poco densa, se podrá estudiar la posibilidad de instalar estaciones adicionales de aforo para el proyecto.
- Disponer de una estación meteorológica en la presa que permita recopilar datos de precipitación, viento y otros parámetros interesantes para la cuenca.
- Se considerará la incertidumbre en los datos de precipitaciones existentes por problemas en el registro de datos y el mantenimiento de la red.
- No realizar modificaciones durante la construcción de la presa sin reevaluar su comportamiento hidráulico.
- Realizar una batimetría del pie de presa para observar potenciales erosiones, siendo la primera inmediatamente después de finalizar la construcción de la presa. Esta batimetría permitirá evaluar la erosión del pie de presa y la necesidad de protección.
- Realizar visitas técnicas al emplazamiento donde se ubica la presa para detectar posibles aspectos que no se hayan tenido en cuenta durante el diseño o averiguar los motivos del mal funcionamiento de la presa.
- Elaborar un Manual de operación y mantenimiento de la presa, con el fin de disponer de los procedimientos y el personal necesario para la realización de la operación y el mantenimiento de la presa. Se recomienda que el manual incluya: tareas a realizar (inspecciones, mediciones, mantenimiento de auscultación, revisiones de seguridad, etc.), los responsables de realizar cada tarea, la periodicidad de cada una y el departamento/administración local de la que dependen.

Realizar un Plan de manejo integral de la cuenca de manera que se realice una gestión y operación de la presa teniendo en cuenta todos los factores implícitos en la cuenca. Por ello, se recomienda que el plan incorpore un estudio detallado de los sedimentos que llegarán al embalse desde cualquier punto de la cuenca. Se recomienda planificar, a partir

de los resultados de dicho estudio, el flushing o suelta de sedimentos a través del desagüe de fondo para evitar el aterramiento del embalse. Además, la gestión integral de la cuenca debe ir acompañada de otras acciones que reduzcan el aporte de sedimentos al embalse, como la reforestación, la protección de la cuenca y la construcción de obras de retención de sedimentos.

MODO DE FALLO GEOTÉCNICO

Para disminuir el riesgo de los Modos de Fallo de tipología geotécnica se tendrá en cuenta los siguientes aspectos:

- Deberán analizarse las características topográficas, geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del terreno de la cerrada y embalse. El alcance de las investigaciones y estudios a realizar será tal que permita caracterizar los terrenos afectados por la presa y los correspondientes al vaso del embalse y obtener los parámetros de cálculo necesarios para determinar la resistencia, deformabilidad, permeabilidad y estabilidad físico-química del terreno.
- Los parámetros resistentes a emplear en los cálculos se justificarán con un número suficiente de ensayos, además de con otros métodos indirectos que redunden en una mayor robustez de la estimación.
- Dada la incertidumbre inherente a la estimación de la resistencia al corte de los macizos rocosos y, en particular, la de su contacto con las presas de fábrica, se adoptarán valores conservadores de las características resistentes de dicho contacto para la comprobación de la estabilidad al deslizamiento de la presa.
- Se comprobará la estabilidad del conjunto presa-terreno teniendo en cuenta sus características geomorfológicas, geotécnicas y tectónicas y, en particular, todas las peculiaridades que el cimientado pudiera presentar.
- Reevaluar el estado de la cimentación tras realizar las excavaciones consideradas pertinentes, así como comprobar que las inyecciones de lechada han sido eficaces para la impermeabilización de la cimentación una vez realizadas.
- El proyecto deberá definir los materiales a emplear, determinar su procedencia, localización geográfica y los volúmenes disponibles, establecer las características que deben cumplir y concretar los procedimientos para su comprobación y control. Los materiales deberán ensayarse y las unidades de obra se ejecutarán conforme a las especificaciones del proyecto.
- En los cálculos de verificación se usarán los valores característicos de los parámetros resistentes de los materiales. Si no existiese base estadística suficiente para establecer tales valores, éstos se asignarán mediante estimaciones conservadoras a partir de los datos disponibles.
- Las acciones sobre la presa a considerar para su cálculo de estabilidad serán las siguientes: Peso propio, Empuje hidrostático, Presiones intersticiales en el cuerpo de presa y en el cimientado, Efectos térmicos, Empuje de los sedimentos, Efecto del oleaje, Efectos sísmicos, Empuje del hielo y cualesquiera otras que se estimen necesarias.
- La combinación de acciones se realizará atendiendo a su probabilidad de presentación y a su permanencia en el tiempo.

- El empuje hidrostático sobre la presa se considerará que actúa íntegramente hasta el punto más bajo de la cimentación de cada bloque, en el caso de las presas de fábrica, o hasta el punto más bajo del elemento impermeable en el de las de materiales sueltos.
- Deberán estudiarse en cada situación de proyecto los procesos de generación y disipación de las presiones intersticiales en el cimiento y cuerpo de presa.
- En las presas de materiales sueltos se cuidará el diseño de filtros y drenes para evitar la aparición de fenómenos de erosión interna y se estudiarán de forma especial en ellas los contactos con obras de desagüe o galerías que puedan atravesarlas y los cimientos que puedan ser susceptibles de ser erosionados.
- Se tendrán en cuenta las acciones sísmicas sobre la presa y sobre el embalse, de conformidad con la actividad sísmica de la región en la que se ubica el embalse y la clasificación de las presas. Se justificará la metodología utilizada para considerar el efecto hidrodinámico del agua del embalse sobre la presa y sus estructuras anexas.
- En las presas en las que por las características sismotectónicas del emplazamiento y las dimensiones del embalse pueda preverse la generación de una sismicidad inducida, se indicarán las acciones oportunas para establecer la correspondiente vigilancia, analizando los efectos del posible seísmo.
- De acuerdo con recomendaciones internacionales, las presas deben poder resistir sin daños estructurales sismos de 1000 años de período de retorno y mantener su integridad para sismos de 5000-10 000 años de período de retorno, para los cuales pueden aceptarse daños, pero no la ruina de la presa.
- En las presas de tipología bóveda de simple o doble curvatura se justificará la distribución de temperaturas adoptada en el cuerpo de presa en cada una de las hipótesis de cálculo. Se determinarán las temperaturas máximas de colocación del hormigón, así como el efecto de los sistemas de refrigeración y la temperatura de inyección de las juntas. Asimismo, se analizarán los movimientos y estados tensionales para diferentes épocas del año y diferentes niveles de embalse.
- De acuerdo con recomendaciones internacionales, en condiciones normales, los coeficientes de seguridad a deslizamiento deberán ser superiores a 1.4, pudiendo establecerse coeficientes inferiores para situaciones accidentales o extremas siempre superiores a 1.
- De acuerdo con recomendaciones internacionales, en condiciones normales, los coeficientes de seguridad tensional deberán ser superiores a 3, pudiendo establecerse coeficientes inferiores para situaciones accidentales o extremas siempre superiores a 1.
- Cuando se trate de la tipología de presas de materiales sueltos, realizar la adecuada compactación de los materiales del cuerpo de presa, especialmente de los núcleos de arcilla en presas heterogéneas. Las zonas especialmente delicadas son los contactos con cualquier elemento rígido (tuberías, túneles, muros...) y el contacto con la cimentación y los estribos.
- Los materiales utilizados para filtros y drenes deben ser adecuados y no estar contaminados. Realizar estudios sobre caracterización granulométrica de los suelos del embalse y los potenciales procesos de erosión y sedimentación.
- En caso de presas de hormigón, la puesta en obra del hormigón se debe realizar de forma adecuada para evitar la segregación de sus áridos.

- En caso de presas de hormigón, suele ser recomendable disponer de juntas para que la disipación del calor durante el fraguado no origine la fisuración del hormigón.
- En caso de presas de hormigón, suele ser recomendable disponer de juntas transversales de contracción a una distancia adecuada para evitar la fisuración del hormigón.
- En presas de más de 15 metros, construir galerías en las presas de hormigón para facilitar su vigilancia y drenaje del cimiento.
- En caso de presas de hormigón, realizar reperforación de drenes con cierta frecuencia o cuando se detecte un aumento de las subpresiones.

MODO DE FALLO DEL EMBALSE

Para disminuir el riesgo de los Modos de Fallo del embalse se tendrá en cuenta los siguientes aspectos:

- Se investigará si en las márgenes del embalse existen terrenos con riesgo de inestabilidad que pudieran provocar deslizamientos de las laderas, al variar rápidamente el nivel del agua. En este caso se estudiarán las condiciones de estabilidad de las laderas, particularmente ante situaciones de desembalse rápido, analizándose la posible obstrucción del embalse por la masa deslizada y la generación de ondas en el mismo.
- Realizar una batimetría del embalse de manera periódica, tanto del cauce como del embalse, siendo la primera inmediatamente después de finalizar la construcción de la presa. Esta batimetría permitirá evaluar la sedimentación en el embalse y la necesidad de implementar una mejor gestión de la cuenca.
- Evaluación del balance tras el llenado con el objetivo de identificar potenciales filtraciones a través de la cimentación, el cuerpo de presa o los estribos, para asegurar el buen funcionamiento del sistema presa-embalse.

Referencias

- Banco Interamericano de Desarrollo. *Resumen ejecutivo de la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático del BID*. 2018.
- Banco Interamericano de Desarrollo. *Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID*. 2019.
- International Standardization Organization (ISO). *Risk Management – Principles and Guidelines*. ISO 31000. 2009.
- International Electrotechnical Commission. *Analysis Techniques for System Reliability – Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. International Standard. 2006.
- Mecca, S., y Masera, M. *Technical Risk Analysis in Construction by Means of FMEA Methodology*. 1999.
- Kim, J. H., H. Y. Jeong, y J. S. Park. *Development of the FMECA Process and Analysis Methodology for Railroad Systems*. 2009.
- Aguilar Otero, J., Torres Arcique, R., y Magaña Jiménez, D. *Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad (FMECA) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*. 2010.
- Zeng, S. X., Tam, C. M., y Tam, V. W. Y. *Integrating Safety, Environmental and Quality Risks for Project Management using a FMEA Method*. 2010.
- Carlson, C. S. *Effective FMEAs. Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*. 2012.
- SPANCOLD. *Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Guía Técnica N° 8 de Explotación de Presas y Embalses. Análisis de Riesgos aplicado a la Gestión de Seguridad de Presas y Embalses*. 2012.
- Hwang, H., Lansey, K., y Quintanar, D. R. *Resilience-based Failure Mode Effects and Criticality Analysis for Regional Water Supply System*. 2015.
- Rasoul, Y. y Hanewinkel, M. *Climate Change and Decision-Making Under Uncertainty*. 2016.
- Marchau, Vincent A.W.J., Warren E. Walker, Pieter J.T.M. Bloemen, y Steven W. Popper. *Decision Making Under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. 2019.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Bolivia). *Medidas de protección y mitigación para reducir riesgos para eventos de inundación y crecidas en áreas agrícolas y urbanas en cuencas Alta y Baja*. 2021.

