

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

Catálogo para Infraestructuras Viales



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 Ciano, 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 Alvaro 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 Infraestructuras Viales. 2025.

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

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 Infraestructuras Viales

Siglas y abreviaturas	4
1. Introducción	5
2. Características particulares para infraestructura vial	6
2.1. Participantes	6
2.2. Revisión de información	7
2.3. Visita técnica	8
3. Modos de Fallo	9
3.1. Modos de Fallo hidrológicos	11
3.2. Modos de Fallo estructurales/sísmicos	24
3.3. Otros Modos de Fallo	40
4. Relación de estudios científico-técnicos	46
5. Recomendaciones y mejores prácticas	47
Referencias	49

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 infraestructura vial, 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 **infraestructuras viales.**

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

La segunda sección recoge los ejemplos de los **Modos de Fallo más representativos** clasificados según 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 vaya 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 infraestructura vial 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 **recomendaciones y mejores prácticas**, las cuales quedan agrupadas según la tipología de los Modos de Fallo empleadas 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 infraestructura vial

A lo largo de este documento se muestran las características particulares asociadas al Taller de Identificación de Modos de Fallo para las infraestructuras viales. En concreto, los aspectos específicos que varían respecto de la metodología general presentada en la guía están relacionados con el mínimo de participantes que deben asistir, los contenidos mínimos a considerar en la revisión de información y la viabilidad o no para realizar la visita técnica online.

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 infraestructuras viales es recomendable que como mínimo en el taller haya un técnico experto en los siguientes campos:

- **El diseño de la infraestructura vial.** 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 Identificación 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.** En infraestructuras viales la hidrología e hidráulica es relevante para evaluar el diseño de las obras de drenaje longitudinales (cunetas, etc.) y transversales (puentes, cajas, etc.). Se recomienda invitar al experto/s que haya participado en el estudio de la hidrología e hidráulica durante el diseño de la infraestructura vial o en su defecto a un experto en el tema que pueda aportar su opinión. El experto en hidrología e hidráulica es relevante independientemente de la fase en la que se encuentre la infraestructura a la hora de realizar el taller (proyecto, construcción u operación). En el caso de fase de proyecto es recomendable que participe el experto encargado.
- **Técnico con experiencia en medidas de adaptación al cambio climático.** Los proyectos de infraestructuras viales incluyen un estudio hidrológico y/o hidráulico de las obras de drenaje, 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 determinado periodo de retorno. Por lo tanto, 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 infraestructura vial, o en su defecto a un experto en el tema que pueda aportar su opinión respecto de los materiales de la cimentación y los potenciales deslizamientos en el talud de la obra vial, si procede. Asimismo, si la infraestructura se encuentra en una zona sísmica, el geólogo debe tener conocimientos suficientes para identificar si se han analizado los riesgos derivados y si se ha diseñado la infraestructura vial 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.
- **Mantenimiento.** Si el proyecto se encuentra en fase de operación, se recomienda la participación de los técnicos encargados de realizar las inspecciones y el mantenimiento

de la obra vial, pues su experiencia puede ser fructífera a la hora de identificar potenciales Modos de Fallo. Por otro lado, si se trata de un proyecto de nueva infraestructura, se recomienda invitar al personal técnico de la entidad que vaya a estar encargado de la operación y el mantenimiento de la infraestructura, pues los resultados de estos talleres les permitirán identificar riesgos en el futuro.

- **Gestión de emergencias.** En infraestructuras viales 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.
- También es relevante la participación de **especialistas locales** que pueden aportar conocimientos de la zona relevantes para el desarrollo del taller, por ejemplo, acerca de qué zonas de la vía o del emplazamiento donde se ubicará la vía se ven afectadas cuando hay fuertes lluvias.
- Finalmente, es recomendable la presencia de **expertos externos** al proyecto. Estos expertos no solo aportan su vasto conocimiento de infraestructuras viales, sino que ofrecen una visión ajena al proyecto, poniendo de manifiesto aspectos que pueden pasar desapercibidos frente a los técnicos encargados por el simple hecho de estar inmersos en el proyecto.

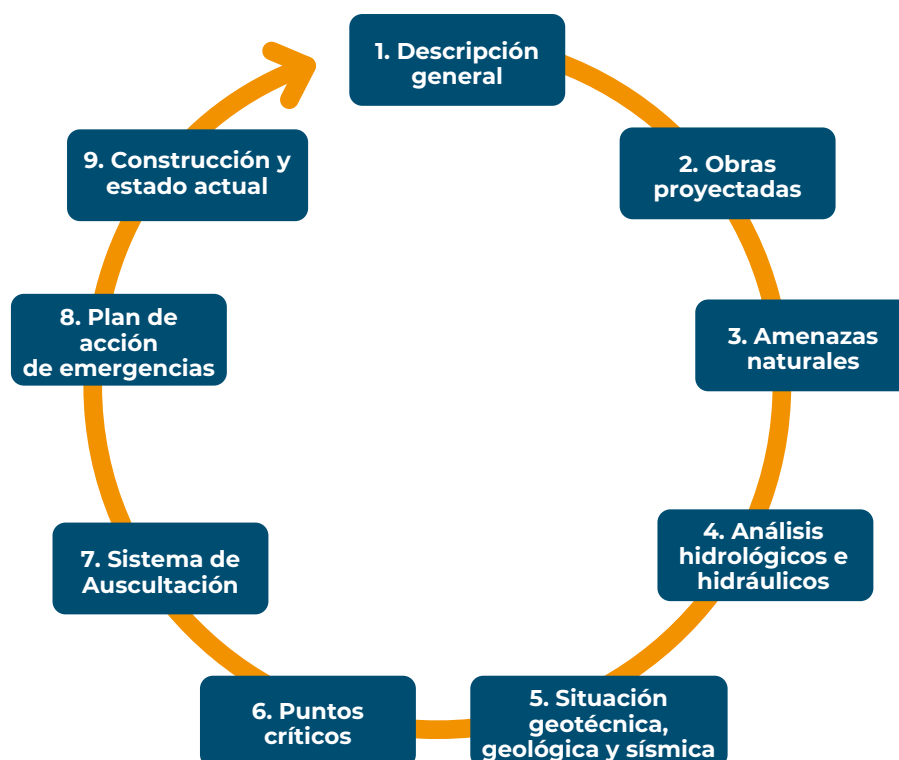
Si bien estos actores son los recomendables para la realización de talleres de Modos de Fallo para las infraestructuras viales, hay que estudiar cada obra y analizar qué actores de los presentados en el listado son realmente necesarios para cada caso concreto, así como la necesidad de incorporar otros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

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 infraestructuras viales durante la revisión de información se muestran en la Figura 1. Cabe destacar que 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.

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 este apartado se presenta la viabilidad o no de inspeccionar las infraestructuras viales de manera online.

En el caso de **carreteras** es interesante realizar el taller de manera **en línea**, mostrando videos y fotos aéreas de la infraestructura realizados por dron. Esto se debe a la elevada extensión a visitar que existe en un proyecto de carreteras. Por ello, es recomendable realizar el taller online, ya que el video realizado con dron ofrece de manera rápida una visión general de la infraestructura.

En caso de necesitar detalle de alguna **obra transversal**, como podría ser un puente, debe valorarse la opción de ir en persona, ya que, dependiendo de la tipología y dimensiones del puente, puede aportar información relevante que no se podría obtener a partir de imágenes dron.

3. Modos de Fallo

A continuación, se enumeran los Modos de Fallo más característicos para infraestructuras viales y una clasificación según la tipología de los Modos de Fallo, que se dividen en: Modos de Fallo hidrológicos, estructurales/sísmicos y otros.

3.1. Modos de Fallo hidrológicos	11
• Inundación a gran escala y deterioro general del trazado	11
• Daños y corte de tráfico por inundación de la vía	12
• Erosión de trazado en pendiente por escorrentía	13
• Erosión por falta de capacidad de drenaje	14
• Colmatación de drenaje longitudinal por sedimentos	15
• Colmatación del drenaje transversal por sedimentos	16
• Fallo de obras de drenaje transversal por falta de capacidad	17
• Fallo de obras de drenaje transversal por erosión al pie	19
• Nivel elevado del cauce, fallo y rotura del tablero	19
• Nivel elevado del cauce y fallo a cortante de las pilas	20
• Nivel elevado del cauce y socavación de terraplén	21
• Nivel elevado del cauce y arrastre de vehículos	22
• Reducción de capacidad hidráulica por arrastres y rotura del puente	23
3.2. Modos de Fallo estructurales/sísmicos	24
• Licuefacción del suelo de la vía en caso de sismo	24
• Derrumbe de obra de paso por sollicitación sísmica	25
• Socavación en carretera debido a sismo	26
• Fallo de tablero por sismo	27
• Bloqueo de la vía por inestabilidad debido a sismo	28
• Asentamiento de solera por lavado de finos en cimentación	29
• Asentamiento de carretera por formación de cavidades cársticas	30
• Asentamiento por erosión en apoyos/cimentación de puentes	31
• Deslizamiento de terraplén bajo carretera	32
• Deslizamiento de desmonte sobre carretera	33
• Caída de rocas sobre carretera	34
• Fallo del talud inducido por erosión	35
• Derrumbe de gaviones en los márgenes del cauce	36
• Fallo del puente por erosión de cimientos	37
• Daño en carretera por agrietamiento	38
• Daño a la plataforma por caída de material	39

3.3. Otros Modos de Fallo 40

- Material en la cuenca generado por incendios y rotura del puente 40
- Asentamientos informales en zonas inundables 41
- No abandono de las propiedades en inundaciones 42
- Fallo en los sistemas de alerta a la población 43
- Daños en la vía por arrastre de cenizas volcánicas 44
- Daños a vehículos y corte de tráfico por granizada 45

A continuación, se desarrollan los Modos de Fallo más representativos para infraestructuras viales 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 infraestructuras viales:

- Disponibilidad de recursos para realizar los estudios previos o de preinversión de los proyectos de infraestructuras viales.
- 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 infraestructuras viales.
- Control de calidad y supervisión en el diseño de infraestructuras viales y en su construcción.
- Experiencia de la empresa constructora y/o supervisora en la construcción de infraestructuras viales.

3.1. Modos de Fallo hidrológicos

INUNDACIÓN A GRAN ESCALA Y DETERIORO GENERAL DEL TRAZADO

En escenario hidrológico, se produce una crecida de magnitud suficiente que produce un aumento de los niveles en el cauce del río hasta superar la cota de trazado de la infraestructura vial produciendo una inundación en la misma. El flujo del agua sobre el pavimento provoca una erosión que se va desarrollando, produciendo finalmente la remoción del pavimento en la infraestructura, dejándolo total o parcialmente intransitable, pudiendo dejar aisladas poblaciones locales en casos de emergencia por inundación.



Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de cauces cercanos a la infraestructura.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia y funcionamiento adecuado de obras de drenaje longitudinal.
- Disponibilidad de estudios hidráulicos de las obras de drenaje.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.

DAÑOS Y CORTE DE TRÁFICO POR INUNDACIÓN DE LA VÍA

En escenario hidrológico, se produce una avenida de suficiente magnitud que produce un aumento de los niveles en el cauce del río hasta superar la cota de trazado de la carretera produciendo una inundación en la misma, dejándola total o parcialmente intransitable y afectando a la población con posibles cortes de tráfico. Esta inundación puede provocar arrastre de vehículos sobre la vía.



Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de cauces cercanos a la infraestructura.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia y funcionamiento adecuado de obras de drenaje longitudinal y transversal.
- Disponibilidad de estudios hidráulicos de las obras de drenaje.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.
- Existencia de vías alternativas de paso.
- Disponibilidad de unidades específicas para la gestión de emergencias.

EROSIÓN DE TRAZADO EN PENDIENTE POR ESCORRENTÍA

En escenario hidrológico, tras precipitaciones de intensidad elevada y en tramos del trazado donde la pendiente sea fuerte, las turbulencias y las velocidades del flujo de agua generadas por la escorrentía pueden provocar una erosión marcada en la infraestructura sin necesidad de una inundación de carácter general por crecida de los niveles del río y mal funcionamiento del drenaje longitudinal.



Factores que influyen en el riesgo

- Estado del pavimento: asfaltado, no asfaltado o mal asfaltado.
- Existencia y funcionamiento adecuado de obras de drenaje longitudinal y transversal.
- Disponibilidad de estudios hidráulicos de las obras de drenaje.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Labores de mantenimiento y revisión de las obras de drenaje transversal.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.

EROSIÓN POR FALTA DE CAPACIDAD DE DRENAJE

En escenario hidrológico, si las obras de drenaje no disponen de la capacidad de drenaje adecuada, el agua de escorrentía puede inundar la calzada. El flujo del agua sobre el pavimento provoca una erosión que se va desarrollando, produciendo finalmente la remoción del pavimento en la infraestructura, dejándola total o parcialmente intransitable.

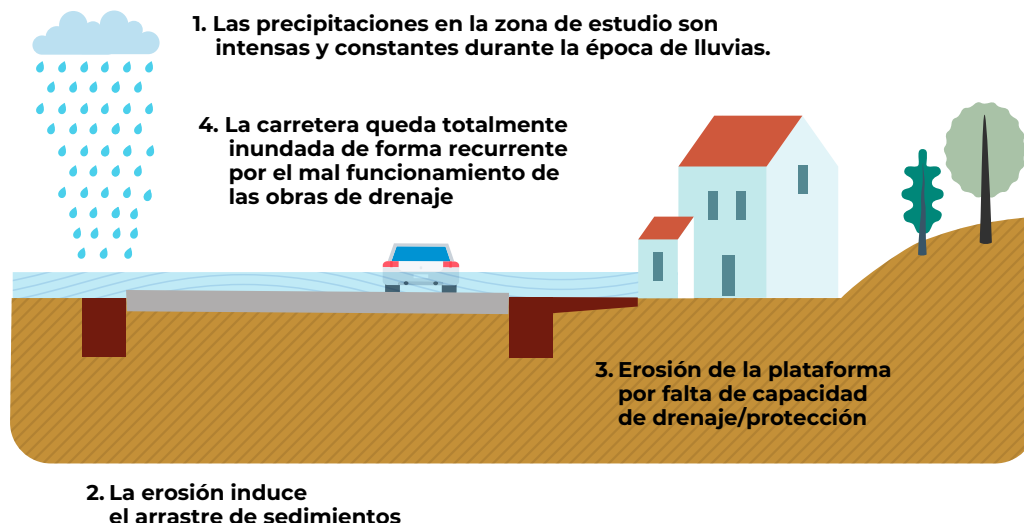


Factores que influyen en el riesgo

- Presencia de tráfico rodado pesado que pueda acelerar el deterioro de la solera.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia y funcionamiento de las obras de drenaje.
- Existencia de estudios geotécnicos que definan el material de la cimentación.

COLMATACIÓN DE DRENAJE LONGITUDINAL POR SEDIMENTOS

En escenario hidrológico o de operación normal, las obras de drenaje longitudinales pueden bloquearse por los sedimentos transportados por el agua o bien por los obstáculos construidos por la población local, aumentando el riesgo de inundación en la zona y la duración del agua sobre el trazado una vez producida la inundación.

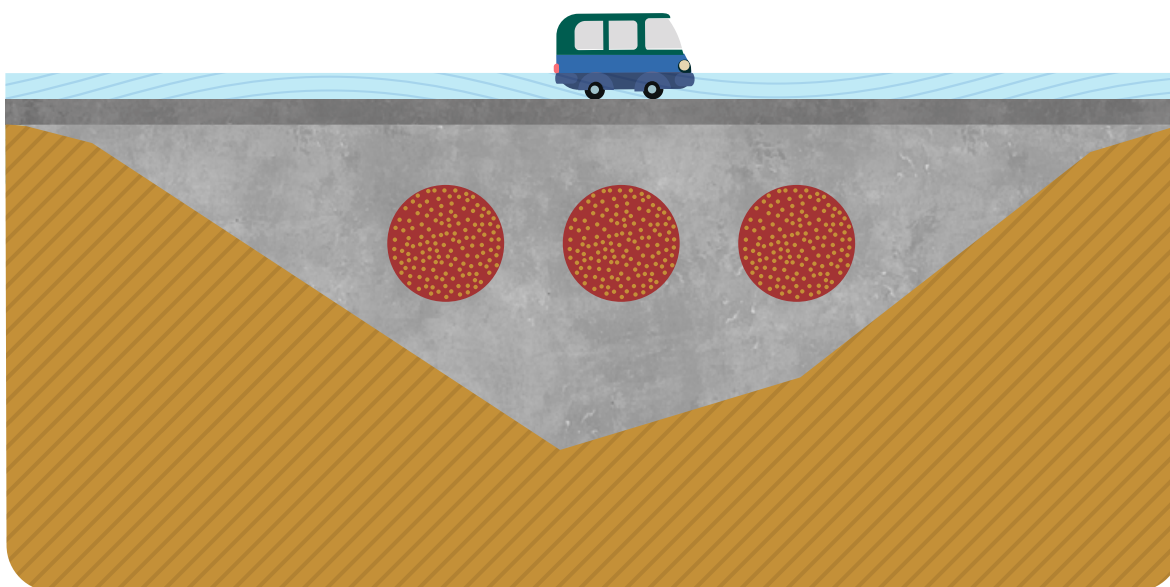


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de bloqueos en tramos de las obras de drenaje longitudinal.
- Funcionamiento adecuado de obras de drenaje longitudinal.
- Labores de mantenimiento y limpieza de la infraestructura vial.
- Disponibilidad de estudios hidráulicos de las obras de drenaje.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.

COLMATACIÓN DEL DRENAJE TRANSVERSAL POR SEDIMENTOS

En escenario hidrológico, el flujo de agua en el cauce puede arrastrar y transportar sedimentos como troncos, plantas y material sólido procedente de las cuencas que puede obstruir las obras de drenaje transversal. Este bloqueo incrementa el nivel de aguas arriba de la obra, provocando el desborde e inundando la carretera en ese punto.

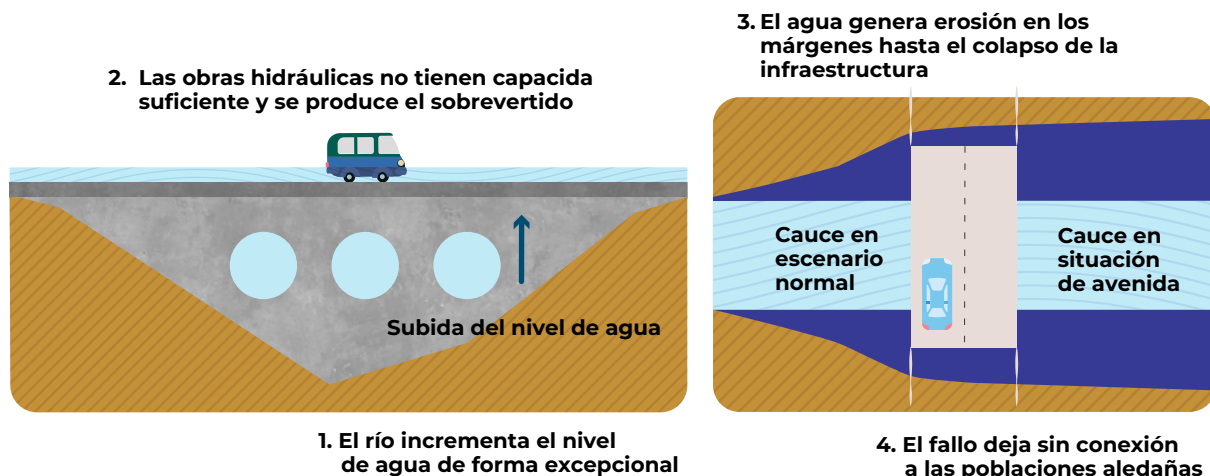


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de plantaciones cercanas a la obra de drenaje transversal.
- Funcionamiento adecuado de obras de drenaje transversal.
- Disponibilidad de estudios hidráulicos de las obras de drenaje.
- Labores de mantenimiento y revisión de las obras de drenaje transversal.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

FALLO OBRA DE DRENAJE TRANSVERSAL POR FALTA DE CAPACIDAD

En escenario hidrológico, la crecida de caudal del río puede ser de una magnitud suficiente para colapsar la capacidad de las obras de drenaje transversal a lo largo de la infraestructura vial. El agua se acumula aguas arriba de la obra hasta provocar el desborde sobre el pavimento de la obra de paso y las márgenes de la misma, imposibilitando el tráfico rodado sobre la infraestructura. Las turbulencias y la velocidad de la corriente generan erosión en la construcción hasta, en el peor de los casos, arrastrar consigo la obra de paso.



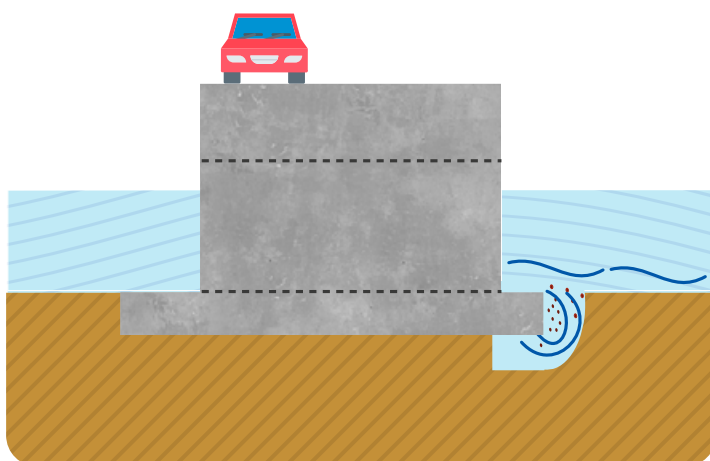
Factores que influyen en el riesgo

- Existencia y funcionamiento adecuado de obras de drenaje longitudinal y transversal.
- Disponibilidad de estudios hidráulicos de las obras de drenaje.
- Labores de mantenimiento y revisión de las obras de drenaje transversal.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, existencia de redes de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

FALLO DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL POR EROSIÓN AL PIE

En escenario hidrológico, la velocidad del flujo de agua y las turbulencias generadas a la salida de la obra de drenaje puede causar erosión en el pie de la cimentación de las obras de drenaje transversal si ésta no está debidamente protegida, produciendo un descalce en la misma, que, si progresa, puede producir el asentamiento y la desestabilización de la infraestructura por la pérdida de apoyo.

Corte transversal

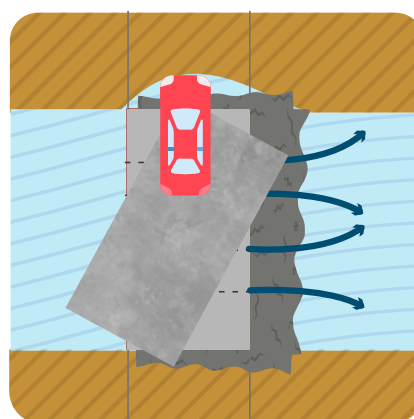


1. El estrechamiento de la obra de paso aumenta la velocidad y la turbulencia a la salida del *culvert*

2. Las turbulencias generan erosión en la cimentación

Corte transversal

4. Fallo por asentamiento o desestabilización de la obra transversal



3. La erosión puede desarrollarse hasta los estribos, desestabilizando la estructura

Factores que influyen en el riesgo

- Diseño de las cimentaciones y existencia de protección contra la erosión.
- Trabajos de extracción de áridos en la zona del cauce que puedan aumentar la velocidad del flujo y el riesgo de erosión de las obras hidráulicas.
- Aislamiento de la población en caso de fallo de una obra de paso durante un evento de inundación.
- Trabajos de mantenimiento y revisión de la infraestructura.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.
- Presencia de materiales no cohesivos y fácilmente erosionables.
- Existencia de estudios geotécnicos que definan el material de la cimentación.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Existencia de vías alternativas a la obra de paso, transitables, en caso de fallo de la vía.

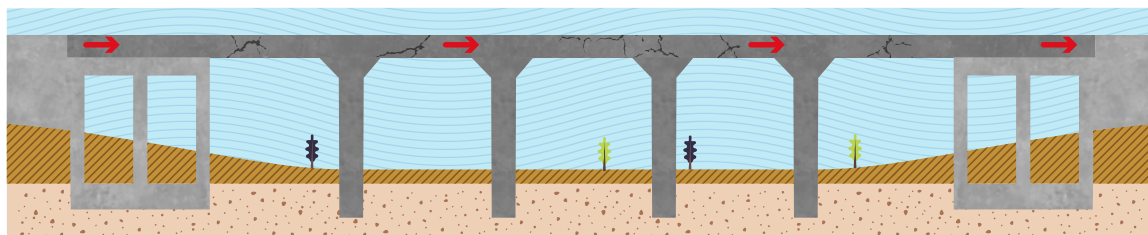
NIVEL ELEVADO DEL CAUCE, FALLO Y ROTURA DEL TABLERO

En escenario hidrológico se produce una crecida de gran magnitud del río que dificultaría el drenaje de agua y/o una gran avenida y, consecuentemente, una crecida del nivel del cauce en el entorno del puente, pudiendo provocar un sobrepaso de éste y posteriormente, el deslizamiento o rotura del tablero del puente debido al elevado empuje hidrostático.

1. Crecida del río

2. Nivel elevado del cauce

3. Fallo y rotura del tablero



Factores que influyen en el riesgo

- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia de estudios hidrológicos/hidráulicos y la relación entre niveles en el puente y periodos de retorno.
- Diseño estructural de la infraestructura.
- Existencia de vías alternativas a la obra de paso transitables en caso de fallo de la vía.
- Aislamiento de la población en caso de fallo de una obra de paso durante un evento de inundación.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.
- Trabajos de extracción de áridos en la zona del cauce puede aumentar la velocidad del flujo y, con ello, el empuje hidrodinámico sobre las pilas.

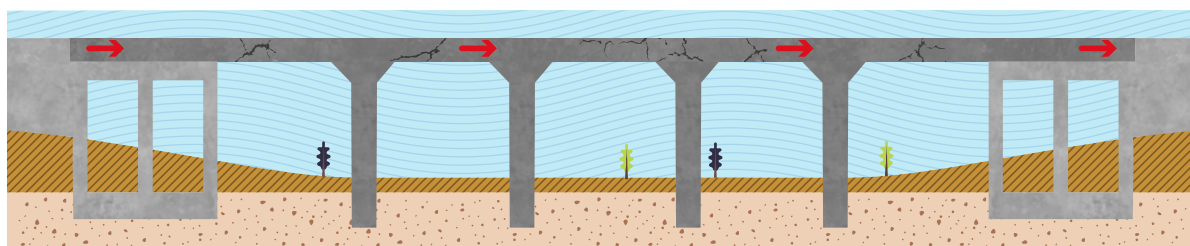
NIVEL ELEVADO DEL CAUCE Y FALLO A CORTANTE DE LAS PILAS

En escenario hidrológico, se produce una crecida de magnitud suficiente del río que dificultaría el drenaje de agua y/o una gran avenida y, consecuentemente, una crecida del nivel del cauce, pudiendo provocar el sobrepaso del puente y debido al elevado empuje hidrostático, el fallo a cortante de las pilas del puente, causando así la destrucción total o la inviabilidad de la infraestructura.

1. Crecida del río

2. Nivel elevado del cauce

4. Fallo a cortante en las pilas



3. Empuje y erosión en las pilas

Factores que influyen en el riesgo

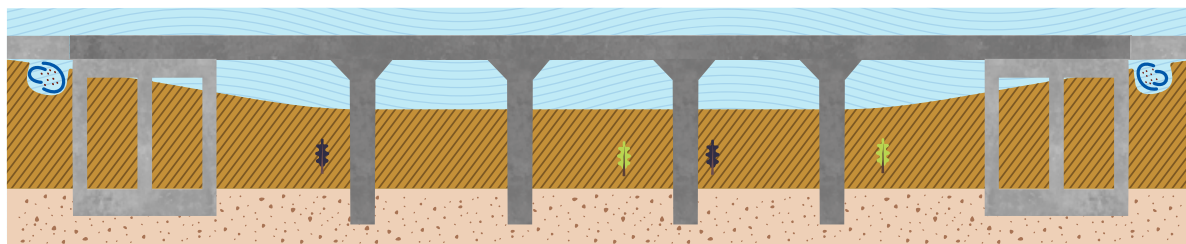
- Diseño estructural de la infraestructura y esbeltez de las pilas.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia de estudios hidrológicos/hidráulicos y la relación entre niveles en el puente y periodos de retorno.

NIVEL ELEVADO DEL CAUCE Y SOCAVACIÓN DE TERRAPLÉN

En escenario hidrológico, se produce una crecida de gran magnitud del río que dificultaría el drenaje de agua y/o una gran avenida y, consecuentemente, una crecida del nivel del cauce, pudiendo provocar la socavación en los estribos, en la unión del tablero del puente y el terraplén. Este fenómeno hará que el puente quede totalmente inoperativo y que los vehículos no puedan transitar sobre él.

1. Crecida del río

2. Socavación en la unión tablero y terraplén



3. Imposibilidad de acceder al puente

Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de protección en los terraplenes.
- Trabajos de mantenimiento y vigilancia de las infraestructuras.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Disponibilidad de estudios hidrológicos/hidráulicos y la relación real entre niveles en el puente y periodos de retorno.
- Disponibilidad de estudios geológicos y geotécnicos de la cimentación y terraplenes de la estructura.

NIVEL ELEVADO DEL CAUCE Y ARRASTRE DE VEHÍCULOS

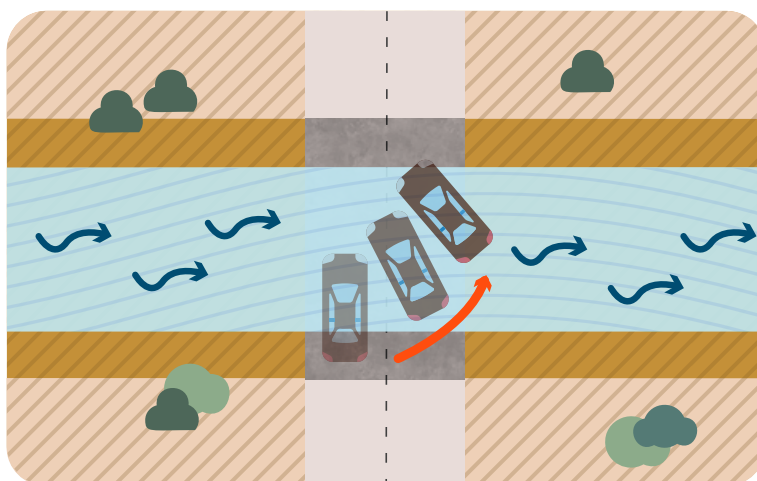
En escenario hidrológico, se produce una crecida del nivel del cauce, sobrepasando el puente y pudiendo provocar la flotación y el arrastre de vehículos que transiten sobre el mismo, con las consecuencias sociales que esto podría producir.

1. Nivel de agua elevado en cauce

2. Sobrepaso del puente



Vista en planta del puente



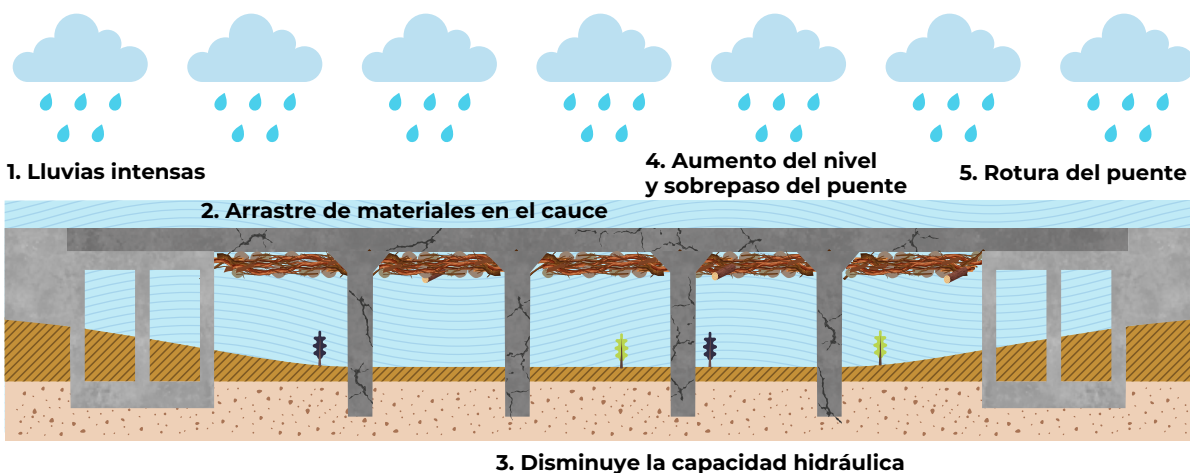
3. Arrastre del vehículo

Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de protocolos de actuación frente a emergencias (corte de accesos y evacuación del personal).
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Disponibilidad de estudios hidrológicos/hidráulicos y la relación real entre niveles en el puente y periodos de retorno.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.

REDUCCIÓN DE CAPACIDAD HIDRÁULICA POR ARRASTRES Y ROTURA DEL PUENTE

En escenario hidrológico, debido al arrastre de materiales, éstos pueden acumularse debajo del puente obstruyéndolo y disminuyendo así su sección. Esto reduciría considerablemente la capacidad hidráulica pudiendo provocar elevados niveles en el cauce, que por el empuje hidrostático podrían producir el fallo y rotura del tablero del puente, el fallo a cortante de las pilas o la socavación en la unión tablero-terraplén por los estribos, entre otros.



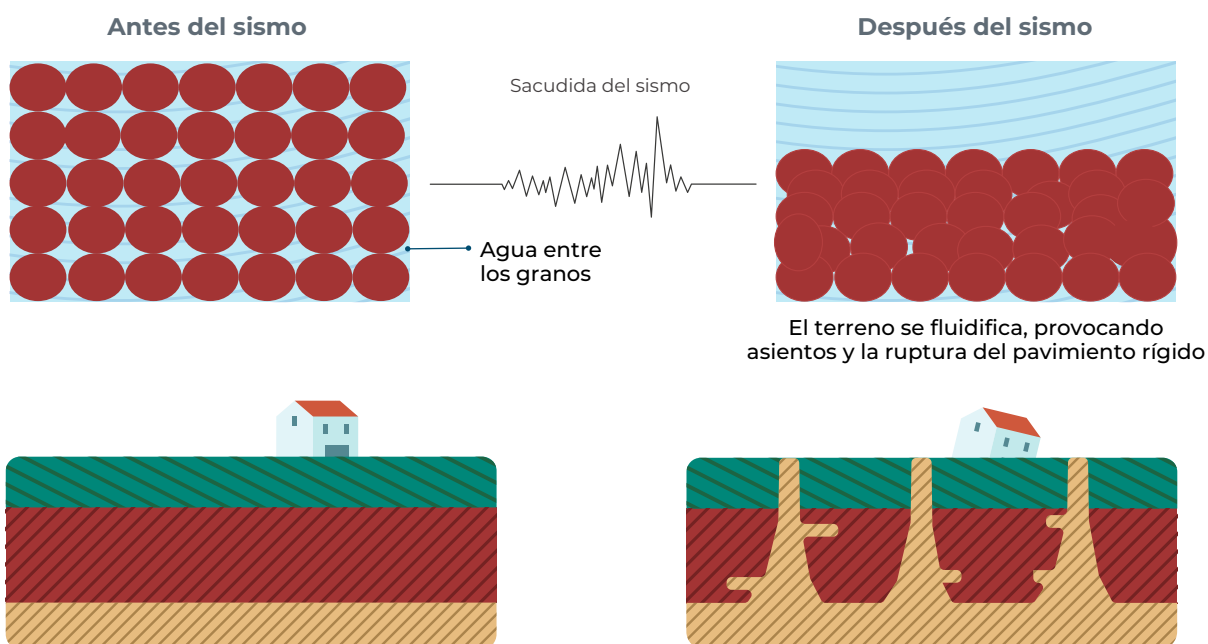
Factores que influyen en el riesgo

- Consideración del empuje de los arrastres en el cálculo estructural.
- Consideración de la pérdida de capacidad hidráulica por arrastres en el cálculo hidráulico.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Disponibilidad de estudios hidrológicos/hidráulicos y la relación real entre niveles en el puente y periodos de retorno.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.

3.2. Modos de Fallo estructurales/sísmicos

LICUEFACCIÓN DEL SUELO DE LA VÍA EN CASO DE SISMO

En escenario sísmico, la vibración en un material no consolidado (generalmente arenas o limos) y (normalmente) saturado induce la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante y rompe su estructura granular al reducir su presión intergranular. El suelo pasa a comportarse como un fluido y se produce el fallo de la vía cimentada sobre el mismo, provocando grandes asentamientos, el deterioro del material pavimentado menos flexible y haciendo imposible el tráfico rodado sobre la misma.

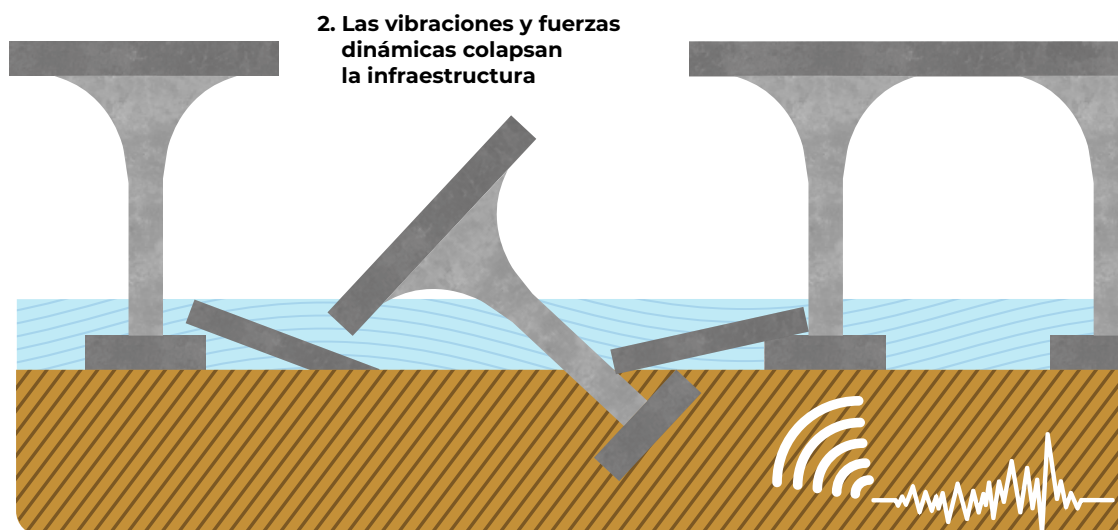


Factores que influyen en el riesgo

- Sismicidad de la zona.
- Caracterización geodinámica para determinar si existen suelos con riesgo de licuefacción.
- En época de lluvias, presencia de agua que sature los suelos.
- Trazado con terraplenes y desmontes con suelos no consolidados.
- Caracterización del riesgo de sismo en la ubicación de la infraestructura vial.
- Aislamiento de poblaciones en caso de emergencia por sismo.
- Existencia de estudios geotécnicos.

DERRUMBE DE OBRA DE PASO POR SOLICITACIÓN SÍSMICA

En escenario de sismo, las vibraciones inducidas generan aceleraciones y fuerzas cerca del cimientado de las pilas y estribos. En caso de no estar dimensionados a este tipo de evento, la intensidad de las fuerzas dinámicas desestabiliza los apoyos provocando el derrumbe total o parcial de los apoyos y el tablero de la infraestructura. El derrumbe imposibilita el tránsito de tráfico por la infraestructura, aislando a poblaciones que hayan quedado dañadas tras el terremoto.



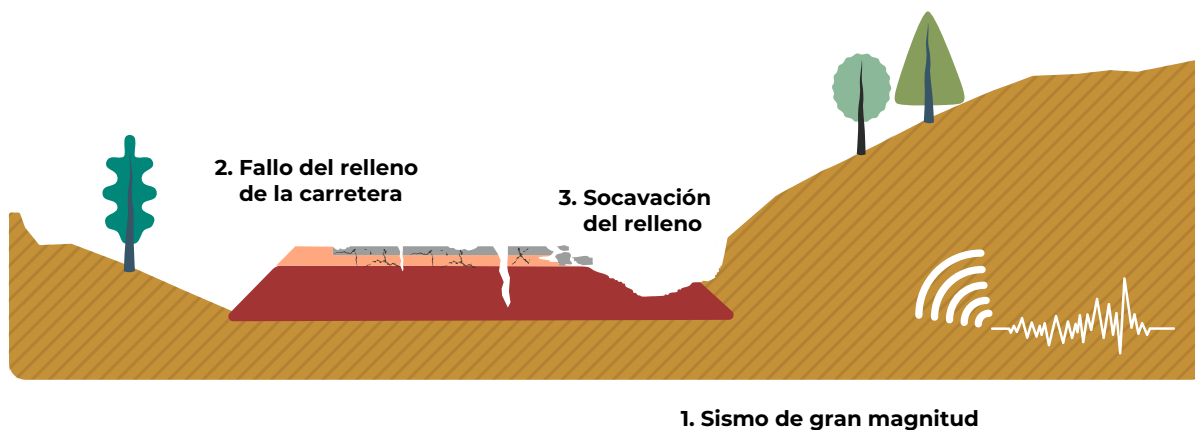
1. Los sismos se producen por cercanía a falla tectónica

Factores que influyen en el riesgo

- Sismicidad de la zona.
- Caracterización geodinámica para determinar si existen suelos con riesgo de licuefacción.
- Aislamiento de poblaciones en caso de emergencia por sismo.
- Caracterización del riesgo de sismo en la ubicación de la infraestructura vial.
- Existencia de estudios geotécnicos.
- Dimensionamiento de las obras de paso frente a sismo.

SOCACACIÓN EN CARRETERA DEBIDO A SISMO

En escenario sísmico, debido a la vibración del terreno se produce el fallo del relleno de la carretera por pérdida de resistencia estructural, provocando grandes asentamientos y/o socavones, haciendo imposible el tráfico rodado sobre la misma.

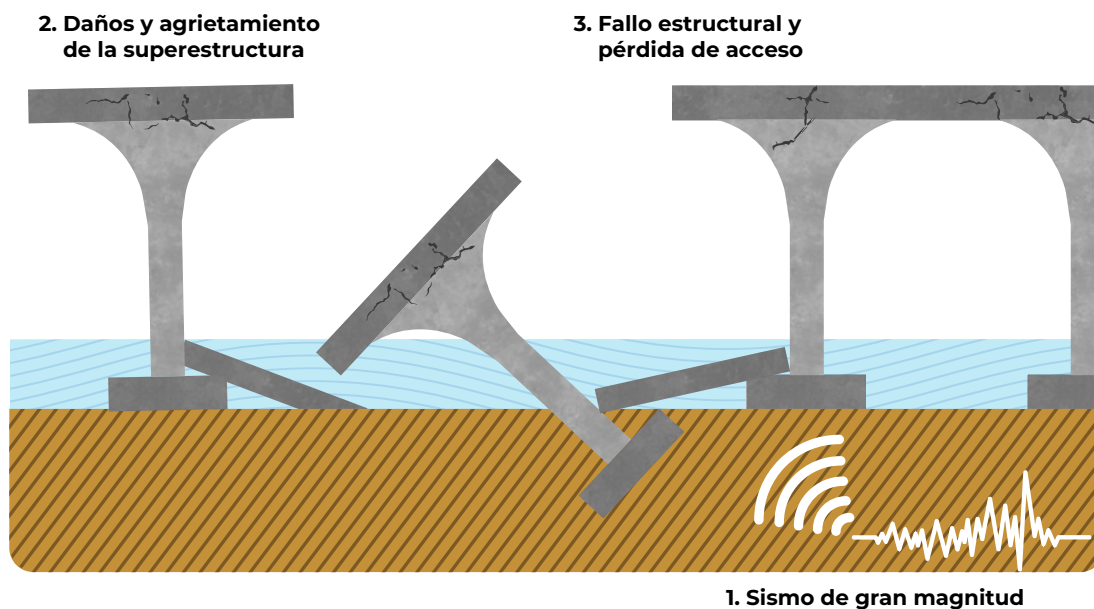


Factores que influyen en el riesgo

- Sismicidad de la zona.
- Aislamiento de poblaciones en caso de emergencia por sismo
- Caracterización del riesgo de terremoto en la ubicación de la infraestructura vial.
- Dimensionamiento de la infraestructura vial frente a sismo.
- Disponibilidad de estudios geotécnicos.

FALLO DE TABLERO POR SISMO

En escenario sísmico, las obras de paso y en especial los puentes, pueden sufrir daños y agrietamientos en la superestructura, llegando a la rotura del tablero y por ende a la pérdida del acceso.

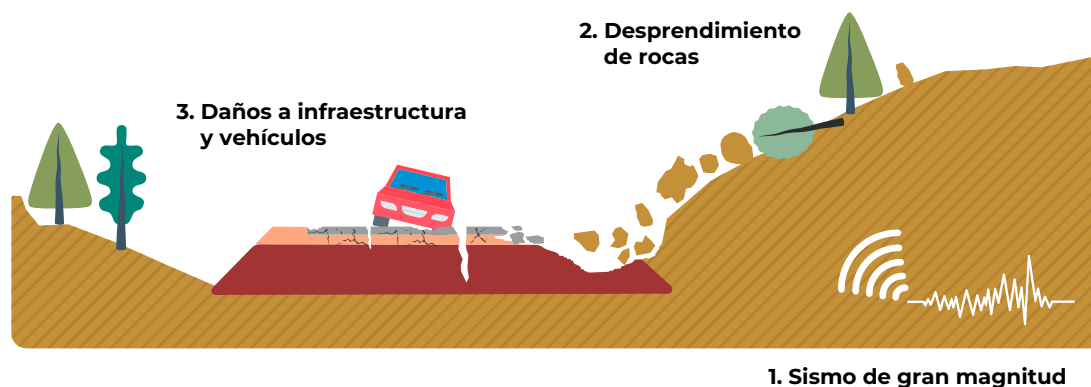


Factores que influyen en el riesgo

- Sismicidad de la zona.
- Aislamiento de poblaciones en caso de emergencia por sismo.
- Dimensionamiento de las obras de paso frente a sismo.
- Disponibilidad de estudios geotécnicos.
- Caracterización del riesgo de sismo en la ubicación de la infraestructura.

BLOQUEO DE LA VÍA POR INESTABILIDAD DEBIDO A SISMO

En escenario sísmico, puede generarse un desprendimiento de rocas y su posterior caída al trazado de la carretera. Esto puede dañar parte del mismo haciéndolo temporalmente intransitable o dañando alguno de los vehículos que la transitan.

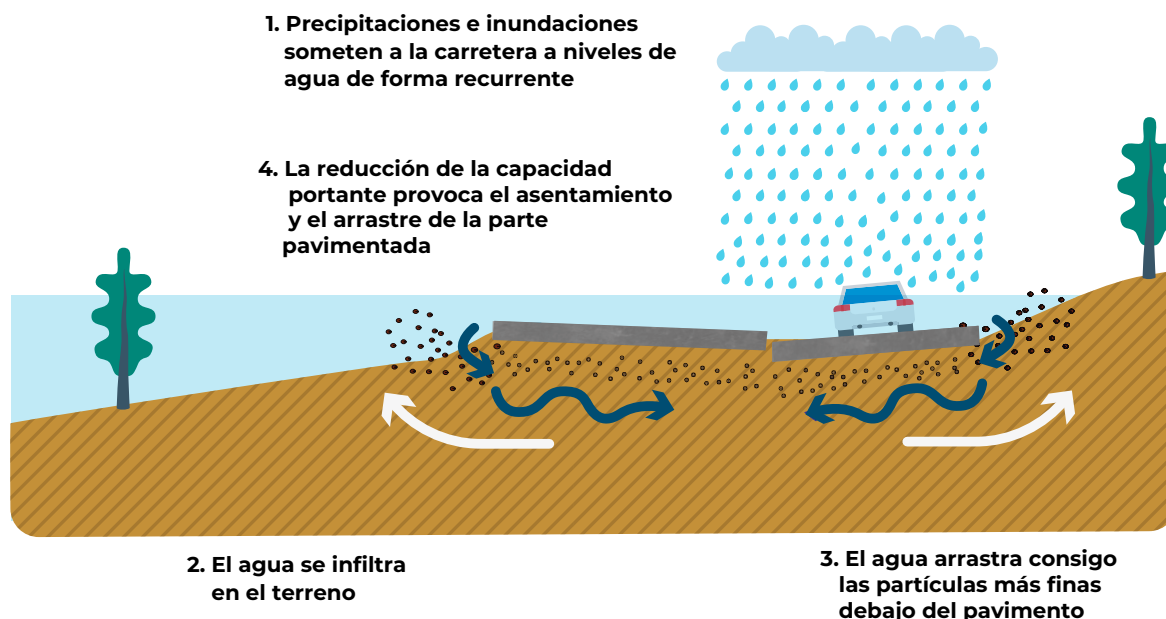


Factores que influyen en el riesgo

- Sismicidad de la zona.
- Dimensionamiento de las infraestructuras frente a sismo.
- Aislamiento de poblaciones en caso de emergencia por sismo
- Disponibilidad de estudios geotécnicos.
- Caracterización del riesgo de terremoto en la ubicación de la infraestructura vial.
- Labores de mantenimiento y vigilancia.

ASENTAMIENTO DE SOLERA POR LAVADO DE FINOS EN CIMENTACIÓN

En escenario hidrológico, si en el interior de alguno de los estratos del terreno natural granular discurre una corriente de agua, puede ocurrir que este flujo de agua arrastre consigo los áridos finos. Este transporte lleva consigo la disminución de la masa del terreno, el asentamiento de la solera asfaltada y más rígida al aparecer huecos donde antes había arena, limos u otras partículas de reducido tamaño, lo que facilita el deterioro de la carretera y su posterior arrastre por la corriente.

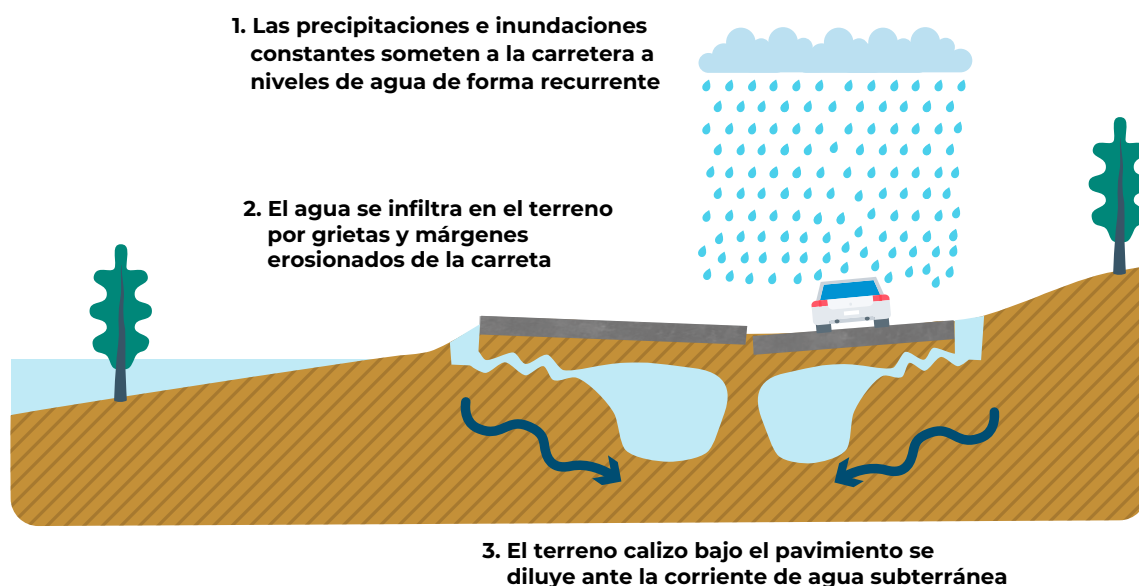


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia y funcionamiento de las obras de drenaje longitudinal.
- Existencia de estudios geotécnicos que definan el material de la cimentación.
- Existencia de cauces cercanos a la infraestructura.
- Presencia de tráfico rodado pesado que pueda acelerar el deterioro de la solera.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

ASENTAMIENTO CARRETERA POR FORMACIÓN DE CAVIDADES CÁRSTICAS

En escenario hidrológico o de gestión normal, si la carretera se encuentra dispuesta sobre un terreno calizo, y en el interior de alguno de los estratos del terreno discurre una corriente de agua, puede ocurrir que éste se diluya debido a la acción del agua sobre la caliza. Estas cavidades pueden provocar el hundimiento de la carretera en una parte de su trazado.



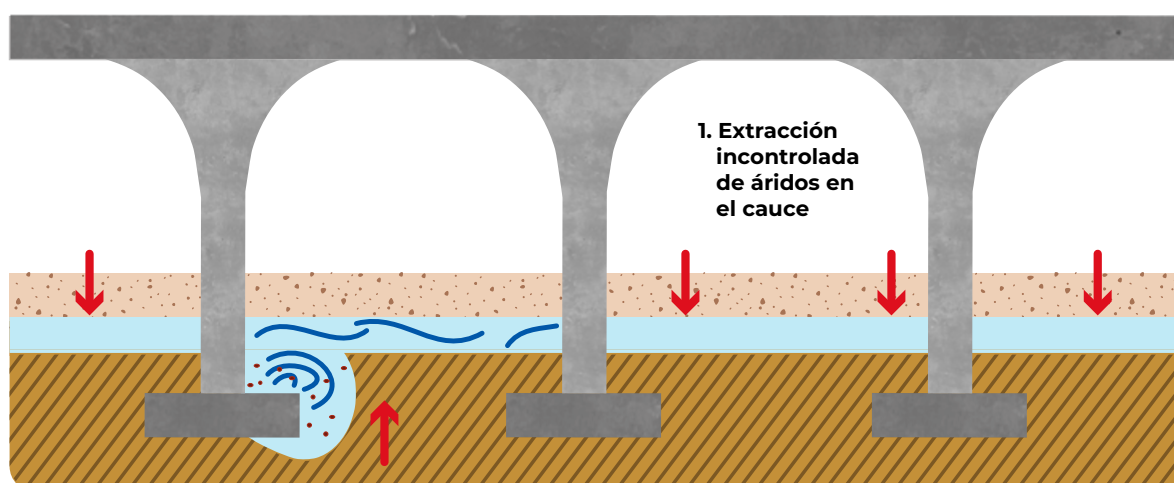
Factores que influyen en el riesgo

- Existencia y funcionamiento de las obras de drenaje longitudinal.
- Existencia de estudios geotécnicos que definan el material de la cimentación.
- Existencia de suelo calizo en la ubicación de la infraestructura.
- Existencia de cauces cercanos a la infraestructura.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda disminuir la interceptación de lluvia y aumentar la infiltración de agua en el suelo.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

ASENTAMIENTO POR EROSIÓN EN APOYOS/CIMENTACIÓN DE PUENTES

En escenario de operación normal, si la velocidad del flujo es suficientemente elevada, el terreno natural granular que rodea a la cimentación de los puentes puede ser arrastrado. La socavación puede generar el asentamiento de toda la infraestructura. La pérdida de apoyo acaba provocando desplazamientos del tablero perjudicando el paso de tráfico sobre la misma por deslizamiento.

2. La velocidad del agua aumenta en las crecidas, por el cambio climático, la deforestación y la extracción de áridos



Factores que influyen en el riesgo

- Trabajos de mantenimiento y revisión de la infraestructura.
- Presencia de materiales no cohesivos y fácilmente erosionables.
- Existencia de estudios geotécnicos que definan el material de la cimentación.
- Existencia de vías alternativas a la obra de paso, transitables, en caso de fallo de la vía.
- Trabajos de extracción de áridos en la zona del cauce que puedan aumentar la velocidad del flujo y el riesgo de erosión de las obras hidráulicas.
- Aislamiento de la población en caso de fallo de una obra de paso durante un evento de inundación.

DESLIZAMIENTO DE TERRAPLÉN BAJO CARRETERA

En escenario de operación normal, tras caer sobre el terraplén una precipitación persistente o tras una bajada rápida del nivel de aguas tras una inundación, el agua se infiltra y percola en el subsuelo a través de poros y fisuras, quedando saturado, disminuyendo la tensión efectiva y reduciendo la resistencia a cortante. Esto puede desencadenar un deslizamiento bajo el trazado haciéndolo temporalmente intransitable.

1. Las precipitaciones y/o cambios de nivel en el cauce del río inducen filtraciones en el terreno

3. La carretera queda intransitable por el deslizamiento



2. La tensión se reduce por la saturación y puede provocar el deslizamiento

Factores que influyen en el riesgo

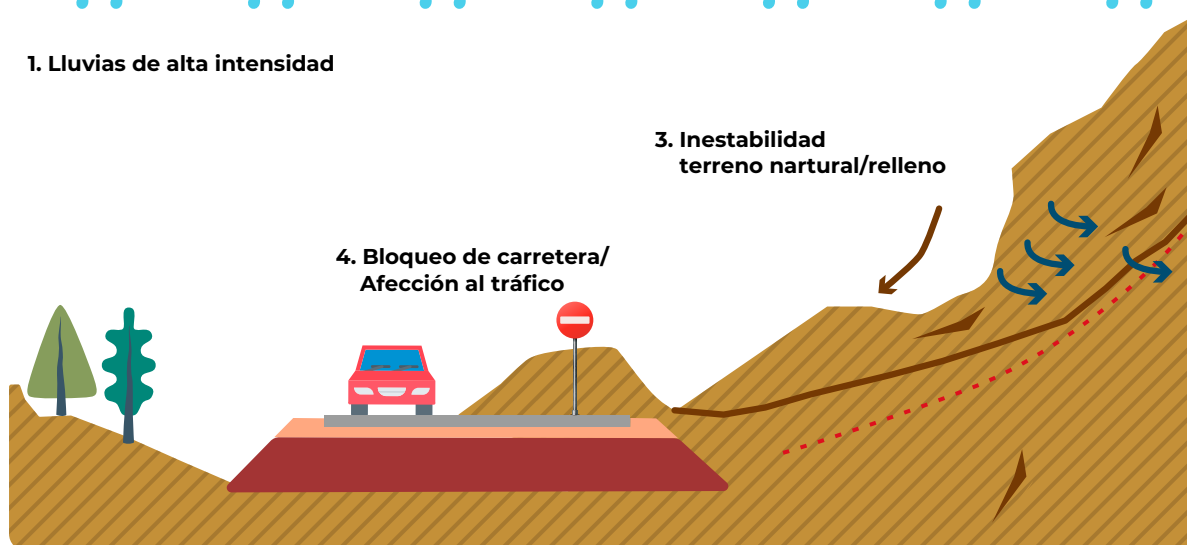
- Existencia de estudios geotécnicos previos a la construcción de un terraplén.
- Existencia de protección o vegetación en el terraplén.
- Pendiente del talud.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

DESLIZAMIENTO DE DESMONTE SOBRE CARRETERA

En escenario hidrológico o de gestión normal, tras caer sobre el desmonte una precipitación persistente, el agua se infiltra y percola en el subsuelo a través de poros y fisuras, quedando saturado, disminuyendo la tensión efectiva y reduciendo la resistencia a cortante. Esto puede desencadenar un deslizamiento sobre el trazado haciéndolo temporalmente intransitable. Este fallo también puede producirse sin necesidad de precipitación previa, siempre que las pendientes sean inestables o tras sismo.



1. Lluvias de alta intensidad



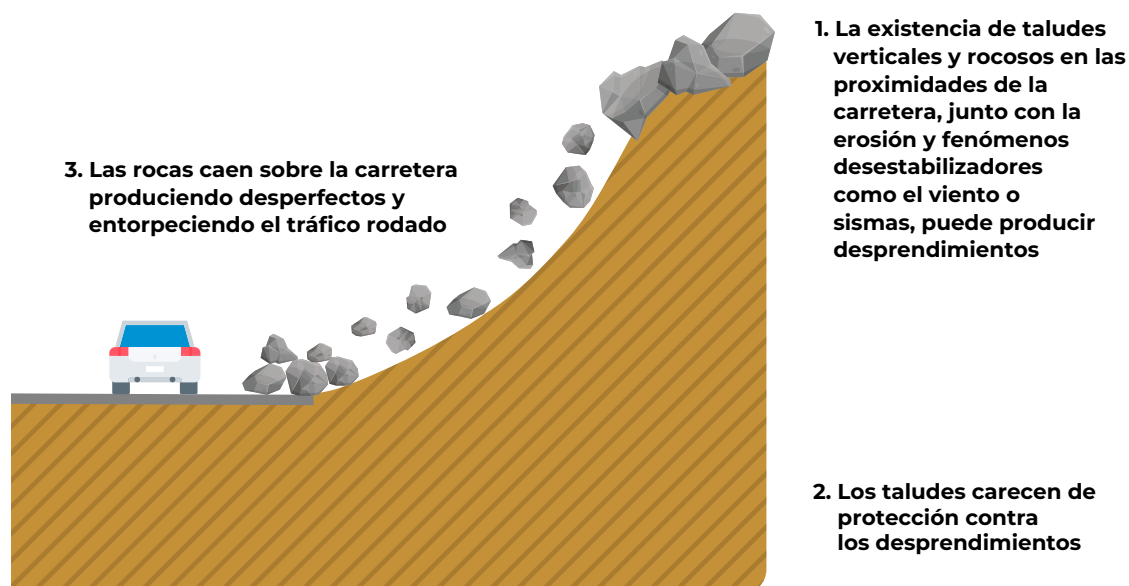
2. Saturación de suelo

Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de estudios geotécnicos previos a la construcción.
- Pendiente de las laderas y su estabilización.
- Tareas de mantenimiento e inspección.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Existencia de protección de las laderas y existencia de redes contra desprendimientos.
- Existencia de vías alternativas de paso.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

CAÍDA DE ROCAS SOBRE CARRETERA

En escenario de gestión normal o de sismo, puede generarse un desprendimiento de rocas y su posterior caída al trazado, pudiendo dañar parte del mismo haciéndolo temporalmente intransitable o dañando alguno de los vehículos que la transitan.



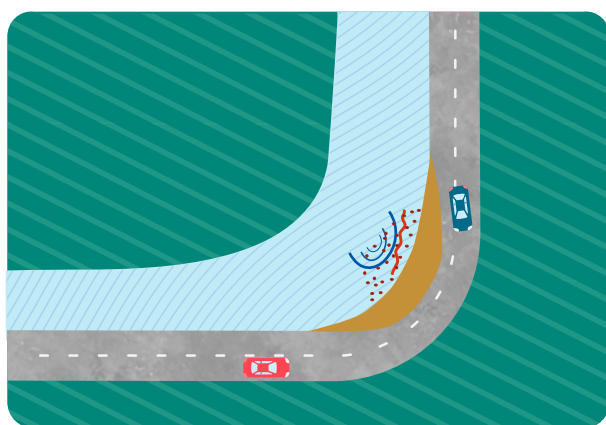
Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de estudios geotécnicos previos a la construcción.
- Pendiente de las laderas y su estabilización.
- Existencia de protección o vegetación en las laderas.
- Estudios de viento en la zona.
- Sismicidad de la zona.
- Existencia de gestión de emergencias.
- Labores de mantenimiento e inspección.

FALLO DEL TALUD INDUCIDO POR EROSIÓN

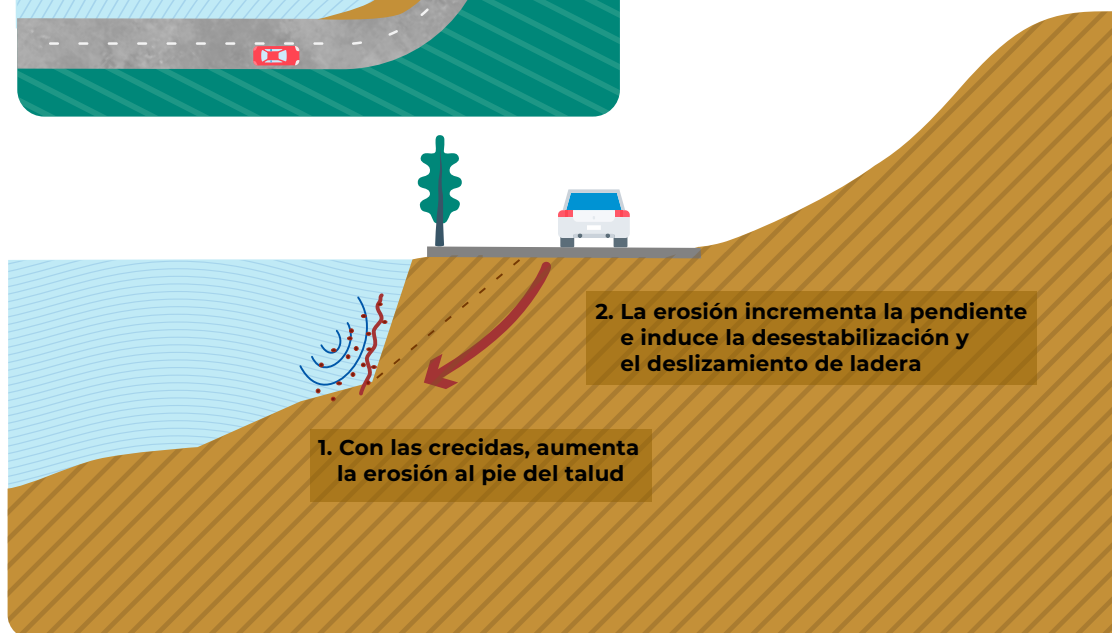
En escenario hidrológico, la velocidad del flujo puede inducir la erosión de las márgenes del río, siendo éste parte del talud (terraplén) del propio trazado. La erosión es más intensa en el tramo externo de las zonas del cauce con curvatura. Esta erosión al pie del talud puede inducir el deslizamiento del terreno en ese punto, que puede afectar a la normal circulación de tráfico rodado en la carretera. En el caso de bajada rápida de niveles de agua después de una inundación, la saturación de terraplén puede aumentar el riesgo de este Modo de Fallo.

Vista en planta



4. La erosión se acentúa en el margen exterior de los tramos con curvatura

3. El deslizamiento puede impedir total o parcialmente el tráfico rodado en el trazado



1. Con las crecidas, aumenta la erosión al pie del talud

2. La erosión incrementa la pendiente e induce la desestabilización y el deslizamiento de ladera

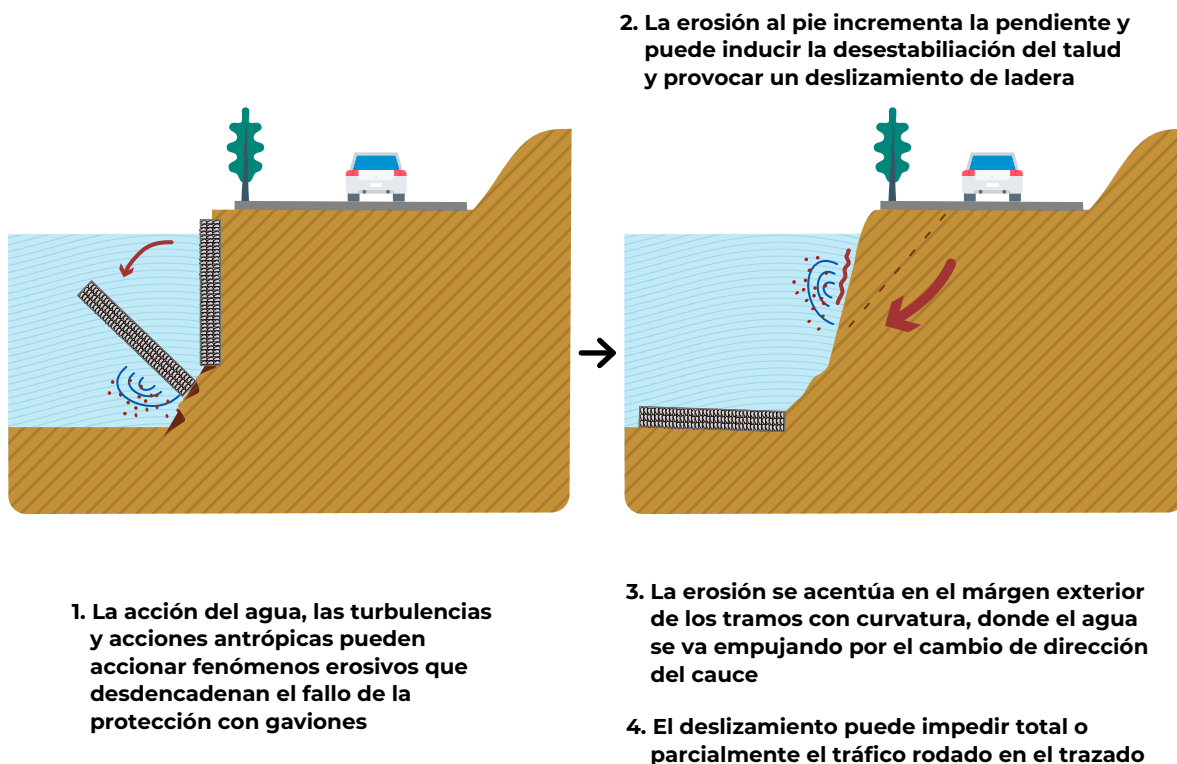
Vista transversal

Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de estudios geotécnicos previos a la construcción.
- Existencia de protección contra erosión o vegetación en las márgenes del río.
- Trabajos de extracción de áridos en el cauce que puedan incrementar la velocidad de flujo y, por consiguiente, agravar la erosión en las márgenes.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

DERRUMBE DE GAVIONES EN LAS MÁRGENES DEL CAUCE

En escenario de operación normal, la velocidad del flujo puede inducir la erosión de los márgenes del río, que en algunas partes está protegido por gaviones. Si la velocidad y el nivel de agua son suficientes, la protección puede fallar y derrumbarse por la erosión al pie o acciones antrópicas como el corte de las redes para la obtención de grandes rocas. El derrumbe de los gaviones deja sin protección al talud, que comienza a erosionarse y termina fallando.



Factores que influyen en el riesgo

- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.
- Concientización de la población.
- Existencia de estudios geotécnicos previos a la construcción.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.

FALLO DEL PUENTE POR EROSIÓN DE CIMIENTOS

En escenario hidrológico o de operación normal, si la velocidad del flujo es suficientemente elevada, el terreno natural granular que rodea a la cimentación de los puentes puede ser arrastrado. La socavación puede generar el asentamiento de toda la infraestructura. La pérdida de apoyo acaba provocando desplazamientos del tablero y perjudicando el paso del tráfico sobre la misma.

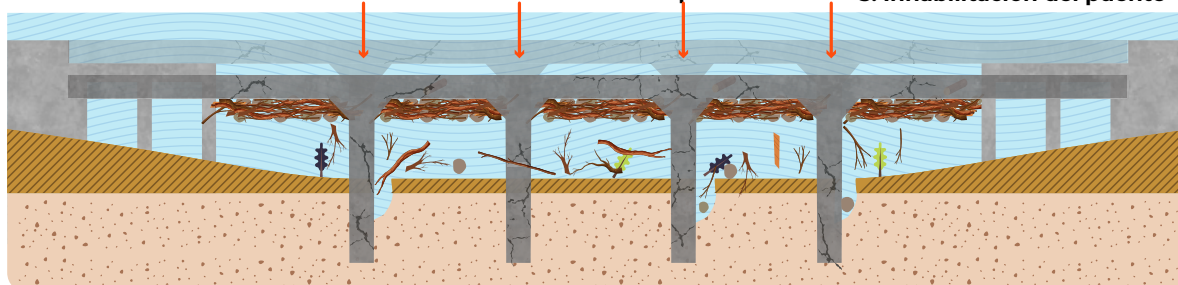
1. Lluvias del alta densidad



2. Grandes caudales

4. Asentamientos del puente

5. Inhabilitación del puente



3. Erosión y socavación de los cimientos

Factores que influyen en el riesgo

- Trabajos de mantenimiento y revisión de la infraestructura.
- Presencia de materiales no cohesivos y fácilmente erosionables.
- Presencia de lluvias frecuentes e inundaciones recurrentes en el área.
- Existencia de estudios geotécnicos que definan el material de la cimentación.
- Existencia de vías alternativas a la obra de paso, transitables, en caso de fallo de la misma.
- Trabajos de extracción de áridos en la zona del cauce que puedan aumentar la velocidad del flujo y el riesgo de erosión de las obras hidráulicas.
- Aislamiento de la población en caso de fallo de una obra de paso durante un evento de inundación.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

DAÑO EN CARRETERA POR AGRIETAMIENTO

En escenario normal, debido a las grandes diferencias de temperatura entre el día (calor) y la noche (heladas), el agua existente en las grietas de las infraestructuras o entre las rocas de los taludes puede congelarse, aumentando el agrietamiento de las mismas o incluso provocando el desprendimiento de rocas, lo cual puede causar daños en la carretera.

1. Fuertes variaciones de temperatura



Factores que influyen en el riesgo

- Zona de temperaturas extremas.
- Influencia del cambio climático en la variación de temperaturas.
- Existencia de protección contra erosión o vegetación en las márgenes de la infraestructura y en las laderas de los terraplenes.
- Existencia de protección contra erosión o vegetación en los terraplenes.

DAÑO A LA PLATAFORMA POR CAÍDA DE MATERIAL

En escenario con grandes vientos, puede generarse un proceso erosivo por el cual se provoque la caída de material proveniente de taludes secos en el trazado de la carretera, pudiendo dañar parte del mismo. Esto lo hace temporalmente intransitable o dañando alguno de los vehículos que la transitan.

1. Generación de fuertes vientos



2. Caída de material de taludes secos

3. Daños a infraestructura/vehículos

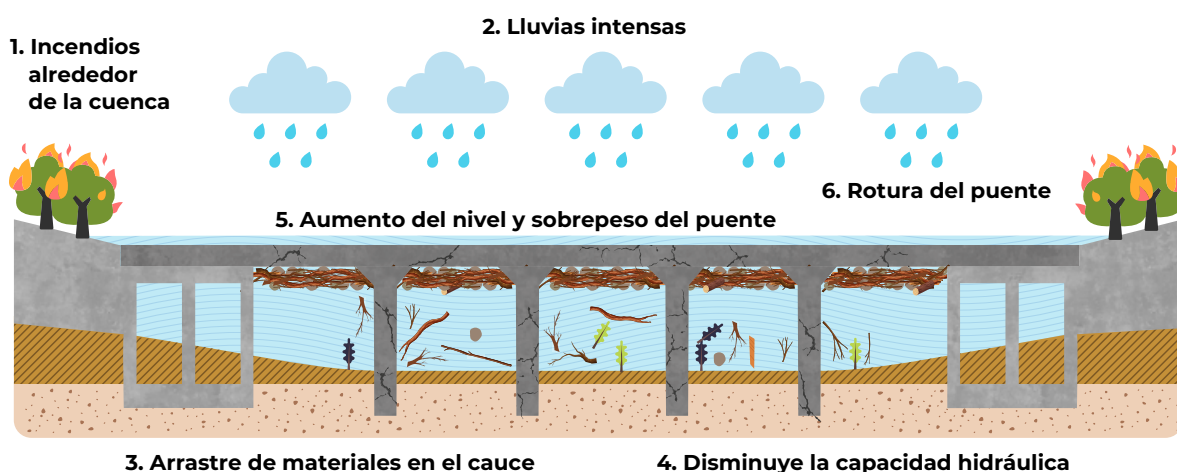
Factores que influyen en el riesgo

- Zona con vientos de gran intensidad.
- Existencia de estudios geotécnicos previos a la construcción.
- Existencia de protección contra erosión o vegetación en los terraplenes.
- Existencia de protección contra erosión o vegetación en las márgenes de la infraestructura y en las laderas de los terraplenes.

3.3. Otros Modos de Fallo

MATERIAL EN LA CUENCA GENERADO POR INCENDIOS Y ROTURA DEL PUENTE

En caso de producirse incendios alrededor de la cuenca, pueden generarse grandes cantidades de material que, tras episodios de fuertes lluvias, pueden acabar en el cauce del río, obstruyéndolo y reduciendo así su sección. Por ello, se podrían producir elevados niveles en el cauce, que por el empuje hidrostático podrían producir el fallo y rotura del tablero del puente, el fallo a cortante de las pilas o la socavación en la unión tablero-terraplén por los estribos, entre otros.



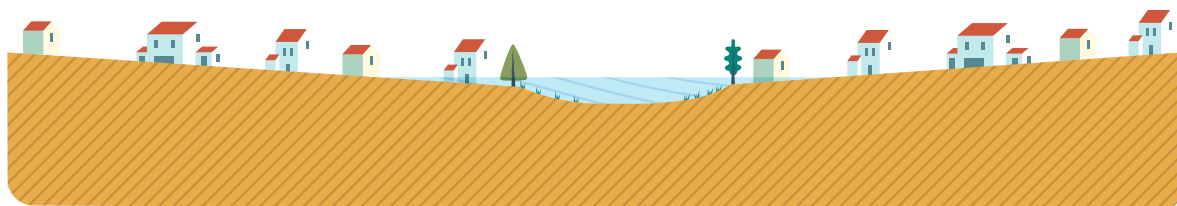
Factores que influyen el riesgo

- Consideración del empuje de los arrastres en el cálculo estructural.
- Consideración de la pérdida de capacidad hidráulica por arrastres en el cálculo hidráulico.
- Disponibilidad de estudios hidrológicos/hidráulicos y la relación real entre niveles en el puente y periodos de retorno.
- Existencia de deforestación en la cuenca, que pueda generar erosión, arrastre de sedimentos, mayores picos de avenida y menores tiempos de concentración.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones y el nivel de las crecidas para un determinado periodo de retorno.

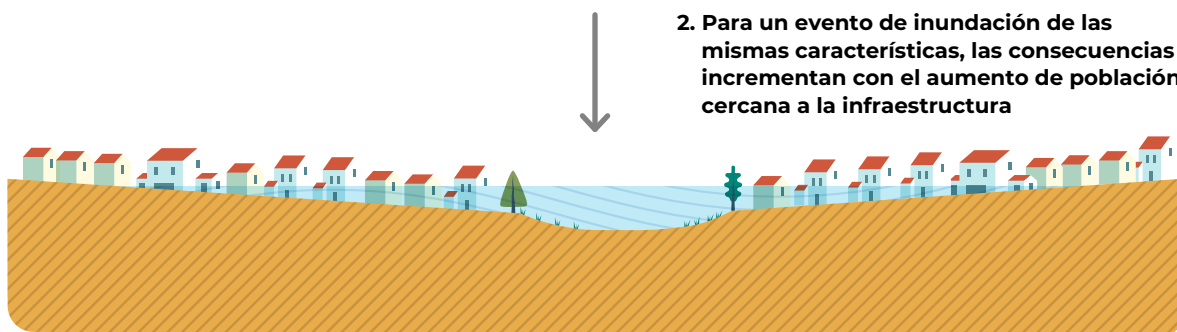
ASENTAMIENTOS INFORMALES EN ZONAS INUNDABLES

Tras la construcción de la infraestructura vial, se desarrollan viviendas y actividades comerciales y turísticas en las zonas inundables alrededor de la carretera, por la relevancia de la actividad económica alrededor de la infraestructura. En escenario hidrológico, se produce la inundación fluvial de estas zonas pobladas con un aumento en los daños a la población y económicos debido a estos asentamientos.

1. Nuevos asentamientos informales en zonas inundables próximas a la carretera



2. Para un evento de inundación de las mismas características, las consecuencias incrementan con el aumento de población cercana a la infraestructura

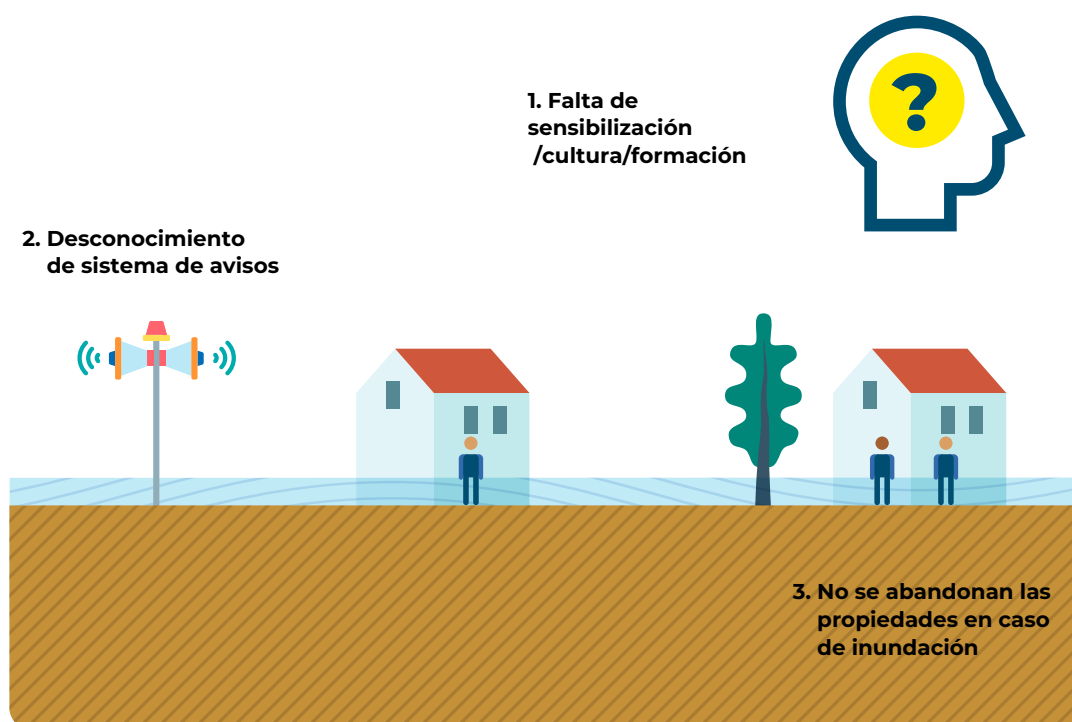


Factores que influyen en el riesgo

- Existencia de una franja de protección para evitar el desarrollo urbano alrededor de la infraestructura.
- Asentamientos de viviendas en zonas inundables.
- 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.
- Existencia de bloqueos en tramos de la infraestructura vial.
- Existencia y funcionamiento adecuado de obras de drenaje longitudinal y transversal.
- Estado de conservación de la cuenca en la que se ubica la infraestructura.

NO ABANDONO DE LAS PROPIEDADES EN INUNDACIONES

En escenario hidrológico, se produce la inundación pluvial o fluvial de algunos tramos de la carretera. Debido a la falta de sensibilización y formación en riesgos de inundación de la población residente en estas viviendas, los ciudadanos desconocen los protocolos de actuación y los sistemas de aviso, por lo que no han abandonado sus viviendas para ir a una zona segura cuando llega la inundación. Por este motivo, las inundaciones producen mayores pérdidas humanas.

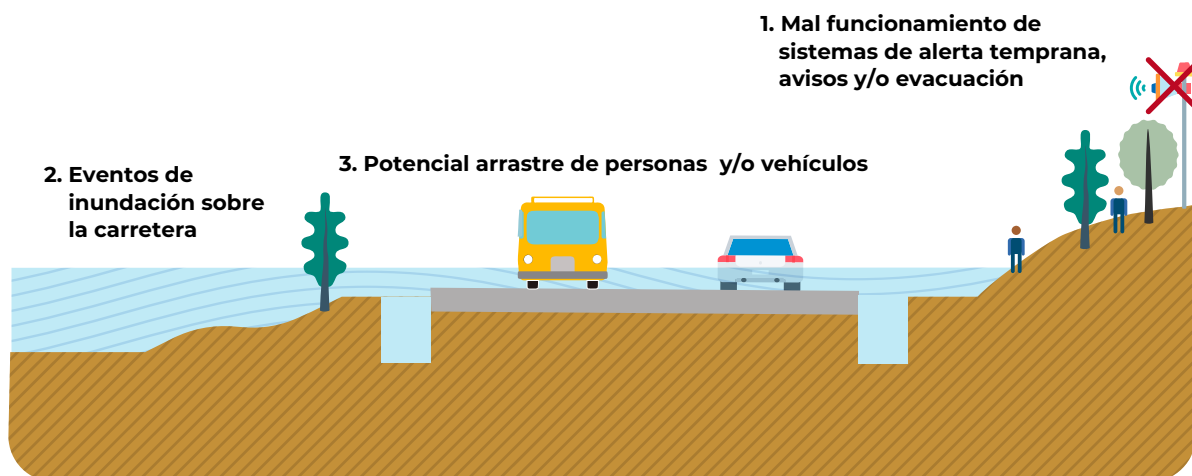


Factores que influyen en el riesgo

- Mantenimiento y realización de pruebas de los sistemas de aviso a la población.
- Existencia de Planes de Actuación Durante Emergencias.
- Conocimiento de los planes, campañas y normativas por la población.
- Campañas de información y sensibilización de la comunidad sobre la importancia y los riesgos frente a inundaciones.

FALLO EN LOS SISTEMAS DE ALERTA A LA POBLACIÓN

En caso de que se prevean inundaciones, podría ocurrir que no existan procedimientos de alerta o estos no funcionen correctamente, por lo que los vehículos seguirían transitando la carretera, así como las personas siguieran en sus casas, viéndose afectadas cuando lleguen las inundaciones a esta zona.

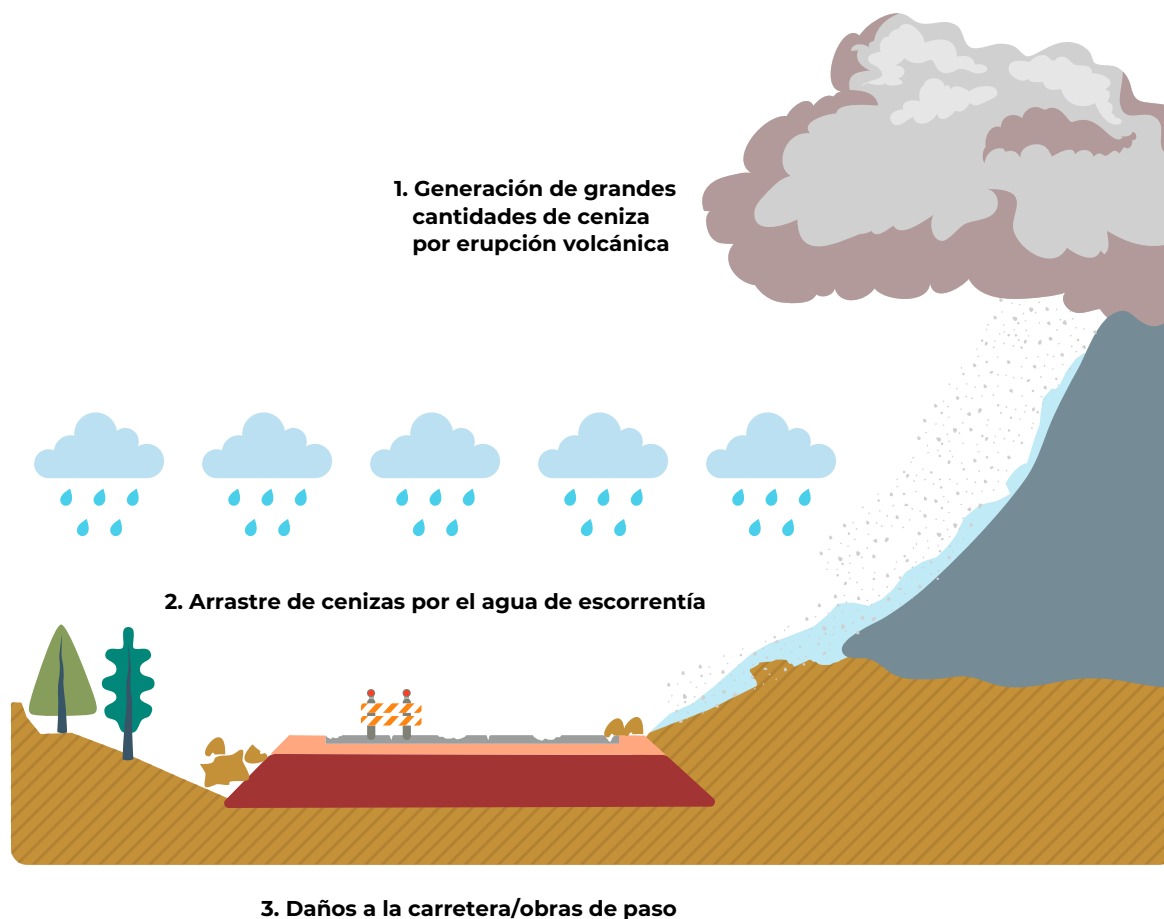


Factores que influyen en el riesgo

- Mantenimiento y realización de pruebas de los sistemas de aviso a la población.
- Existencia de Planes de Actuación Durante Emergencias.
- Campañas de información y sensibilización de la comunidad sobre la importancia y los riesgos frente a inundaciones.

DAÑOS EN LA VÍA POR ARRASTRE DE CENIZAS VOLCÁNICAS

En escenario sísmico, el volcán puede generar grandes cantidades de ceniza volcánica, las cuales son posteriormente arrastradas por el agua de escorrentía generando daños a la carretera y las obras de paso.



Factores que influyen en el riesgo

- Cercanía del trazado a un volcán.
- Dimensionamiento de las infraestructuras frente a sismo.
- Aislamiento de poblaciones en caso de emergencia por erupción del volcán.
- Disponibilidad de estudios geotécnicos.

DAÑOS A VEHÍCULOS Y CORTE DE TRÁFICO POR GRANIZADA

En escenario hidrológico, en cotas altas, se producen granizadas que paralizan la vía y pueden producir daños a los vehículos que transitan por la misma, así como cortes de tráfico por baja visibilidad.



1. Grandes granizadas en cotas altas

3. Baja visibilidad.
Corte de tráfico

2. Daños a infraestructura/vehículos

Factores que influyen en el riesgo

- Zona con bajas temperaturas.
- Disponibilidad de datos de precipitaciones, red de estaciones meteorológicas y variabilidad geográfica de la precipitación.
- Influencia del cambio climático en la intensidad de las precipitaciones para un determinado periodo de retorno.

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 por cambio climático.
- Estudio hidráulico.
- Considerar las actividades de la cuenca que puedan tener influencia sobre la infraestructura.
- Plan de gestión de la cuenca.
- Plan de acción durante emergencias.

MODO DE FALLO ESTRUCTURAL/SÍSMICO

- Estudio estructural de la infraestructura.
- Estudio geológico y geotécnico de la cimentación.
- Estudio de amenaza sísmica.

MODO DE FALLO POR OTRAS TIPOLOGÍAS

- Planes de ordenación urbana en zonas inundables.
- Protocolos de alerta a la población en caso de inundación.
- Programas de acción frente a emergencias.

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:

- Cuando se trate de infraestructuras viales que atraviesen cauces de ríos, por ejemplo, puentes, se determinarán los hidrogramas de las previsibles avenidas, 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.
- Los gálibos y la luz entre pilas de los vanos de los puentes estarán diseñados para permitir el paso de los elementos flotantes que puedan llegar arrastrados por el cauce.
- 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.
- 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 infraestructura vial sin reevaluar su comportamiento hidráulico.
- Realizar visitas técnicas al emplazamiento donde se ubica la infraestructura para detectar posibles aspectos que no se hayan tenido en cuenta durante el diseño o averiguar los motivos del mal funcionamiento de la infraestructura y de las obras de drenaje.
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento de la infraestructura vial, con el fin de disponer de los procedimientos y el personal necesario para la realización de la operación y el mantenimiento de la vía. 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.

MODO DE FALLO ESTRUCTURAL/SÍSMICO

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

- Deberán analizarse las características topográficas, geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del terreno donde se vaya a ubicar la infraestructura vial. El alcance de las investigaciones y estudios a realizar será tal que permita caracterizar los terrenos afectados por la obra 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.
- Se comprobará la estabilidad del conjunto infraestructura-terreno teniendo en cuenta sus características geomorfológicas, geotécnicas y tectónicas y, en particular, todas las peculiaridades que el cimiento pudiera presentar.
- 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.
- Se tendrán en cuenta las acciones sísmicas sobre la infraestructura, de conformidad con la actividad sísmica de la región en la que se ubica.
- En caso de estructuras de hormigón, la puesta en obra del hormigón se debe realizar de forma adecuada para evitar la segregación de sus áridos.
- En caso de estructuras de hormigón, suele ser recomendable disponer de juntas para que la disipación del calor durante el fraguado no origine la fisuración del hormigón.
- Se investigará si en las márgenes de la infraestructura vial existen terrenos con riesgo de inestabilidad que pudieran provocar deslizamientos de las laderas. En este caso se estudiarán las condiciones de estabilidad de las laderas, particularmente ante situaciones de fuertes lluvias, analizándose la posible obstrucción de la vía por la masa deslizada.
- La infraestructura, su cimiento y sus márgenes de ésta deberán disponer de equipos de auscultación adecuados para poder analizar su comportamiento de forma periódica y detectar las anomalías que pudieran afectar a su seguridad.
- Proteger los equipos de monitorización con herramientas para la detección y prevención del vandalismo frente a estos elementos.

MODO DE FALLO OTRAS TIPOLOGÍAS

Para disminuir el riesgo de los Modos de Fallo de otras tipologías se tendrá en cuenta los siguientes aspectos:

- Los equipos y sistemas de comunicación deberán diseñarse de forma que puedan estar permanentemente operativos y ser redundantes.
- Cuando se trate de problemas sociales, se tendrá en cuenta la opinión de la población y se realizarán reuniones para tratar de llegar a acuerdos.
- Se crearán alertas de aviso de incendios, se diseñarán planes de evacuación y procedimiento de actuación de los servicios de emergencia.
- Se elaborará un plan ambiental que especifique los usos y limitaciones del suelo.

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.

