



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Afección de los riesgos geotécnicos por deslizamiento de  
ladera a la gestión de proyectos de Ingeniería civil.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Planificación y Gestión en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Serrato Prada, Diana Patricia

Tutor/a: Yepes Piqueras, Víctor

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# **AFECCIÓN DE LOS RIESGOS GEOTÉCNICOS POR DESLIZAMIENTO DE LADERA A LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL.**

**Estudiante: Diana Serrato Prada**

**Tutor: Víctor Yepes**

**Fecha: Julio 7 de 2024**

## Resumen

En este estudio se realiza un análisis de la importancia de la gestión de los riesgos geotécnicos en los proyectos de ingeniería civil en España. Mediante el marco teórico se contextualiza al lector en las diferentes etapas de un proyecto utilizando como guía el PMBOK, seguido por la explicación de las actividades cíclicas del proceso de gestión de riesgos y una explicación de los procesos de identificación de riesgos geotécnicos generales que se han planteado. A continuación, se describe el proceso de análisis cualitativo mediante matrices de probabilidad -impacto que se va a utilizar para reflejar la relevancia de los riesgos geotécnicos en España.

En el estudio se hace un proceso de identificación de cada tipo de riesgo geotécnico que se puede presentar en España. Se utilizan como insumo los mapas realizados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) para filtrar, por cada zona de España, los riesgos geotécnicos con alguna probabilidad de ocurrencia. A partir de estos riesgos, se diseña una Estructura de Desglose del Riesgo y una metodología de investigación mediante estudio de casos y encuestas de riesgo geotécnico a profesionales de ingeniería o arquitectura.

En el estudio se llevan a cabo las dos metodologías propuestas para llegar a construir una matriz de probabilidad impacto sobre el coste y el cronograma de un proyecto. Se pudo llegar a conclusiones sobre los riesgos geotécnicos son mayor impacto sobre los costes y el cronograma, así como estudiar la diferencia entre las percepciones de riesgo de profesionales expertos y todo el grupo encuestado.

## Resum

En este estudi es realitza una anàlisi de la importància de la gestió dels riscos geotècnics en els projectes d'enginyeria civil a Espanya. Mitjançant el marc teòric es contextualitza al lector en les diferents etapes d'un projecte utilitzant com a guia el PMBOK, seguit per l'explicació de les activitats cícliques del procés de gestió de riscos i una explicació dels processos d'identificació de riscos geotècnics generals que s'han plantejat. A continuació, es descriu el procés d'anàlisi qualitativa mitjançant matrius de probabilitat -impacte que s'utilitzarà per a reflectir la rellevància dels riscos geotècnics a Espanya.

En l'estudi es fa un procés d'identificació de cada tipus de risc geotècnic que es pot presentar a Espanya. S'utilitzen com a input els mapes realitzats per l'El Institut Geogràfic Nacional (IGN) per a filtrar, per cada zona d'Espanya, els riscos geotècnics amb alguna probabilitat d'ocurrència. A partir d'estos riscos, es dissenya una Estructura de Desglossament del Risc i una metodologia d'investigació \*mediante estudi de casos i enquestes de risc geotècnic a professionals d'enginyeria o arquitectura.

En l'estudi es duen a terme les dos metodologies proposades per a arribar a construir una \*matríz de probabilitat impacte sobre el cost i el cronograma d'un projecte. Es va poder arribar a conclusions sobre els riscos geotècnics són major impacte sobre els costos i el cronograma, així com estudiar la diferència entre les percepcions de risc de professionals experts i tot el grup enquestat.

## **Abstract**

In this study, an analysis of the importance of geotechnical risk management in civil engineering projects in Spain is carried out. Through the theoretical framework, the reader is contextualized in the different stages of a project using the PMBOK as a guide, followed by the explanation of the cyclical activities of the risk management process and an explanation of the general geotechnical risk identification processes that have been carried out. Next, the qualitative analysis process is described using probability-impact matrices that will be used to reflect the relevance of geotechnical risks in Spain.

In the study, a process is done to identify each type of geotechnical risk that may occur in Spain. The maps made by the National Geographic Institute (IGN) are used as input to filter, for each area of Spain, the geotechnical risks with some probability of occurrence. Based on these risks, a Risk Breakdown Structure and a research methodology are designed through case studies and geotechnical risk surveys of engineering or architectural professionals.

In the study, the two proposed methodologies are carried out to construct an impact probability matrix on the cost and schedule of a project. It was possible to reach conclusions about geotechnical risks that have a greater impact on costs and schedule, as well as study the difference between the risk perceptions of expert professionals and the entire surveyed group.

## **Palabras Clave**

Riesgos geotécnicos; proyectos; gestión de proyectos; obra civil; evaluación de riesgos



**TÍTULO DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:**

Afección de los riesgos geotécnicos por deslizamiento de ladera a la gestión de proyectos de Ingeniería civil.

**AUTOR:**

Diana Patricia Serrato Prada

**RESUMEN EJECUTIVO**

1. Planteamiento del problema a resolver	La materialización de riesgos geotécnicos como deslizamientos de ladera, hundimientos, colapsos de estructuras e inundaciones han sido con frecuencia causantes de elevados sobrecostos en los proyectos, demoras, pérdidas materiales y, en algunos casos, pérdidas de vidas humanas. se pretende identificar cuáles de los anteriores riesgos son los que más se presentan en España y cómo se podría mitigar su impacto mediante la gestión de riesgos geotécnicos en las diferentes etapas de los proyectos de obra civil.
2. Objetivos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Analizar la naturaleza de los riesgos geotécnicos que se materializan con mayor frecuencia en los proyectos de obra civil en España.</li><li>• Analizar la importancia de la identificación, evaluación y mitigación de los riesgos geotécnicos en un proyecto de ingeniería civil.</li><li>• Evaluar el impacto de los riesgos geotécnicos en las diferentes fases del proyecto (planificación, diseño, construcción y operación).</li><li>• Realizar un análisis cualitativo de los riesgos geotécnicos en España mediante las respuestas de un cuestionario sobre su ocurrencia.</li></ul>
3. Estructura organizativa	Inicialmente, se realiza un análisis de la importancia de la gestión de los riesgos geotécnicos en los proyectos de ingeniería civil en España. Mediante el marco teórico se contextualiza al lector en las diferentes etapas de un proyecto utilizando como guía el PMBOK, seguido por la explicación de las actividades cíclicas del proceso de gestión de riesgos y una explicación de los procesos de identificación de riesgos geotécnicos generales que se han planteado. A continuación, se describe el proceso de análisis cualitativo mediante matrices de probabilidad -impacto que se va a utilizar para reflejar la relevancia de los riesgos geotécnicos en España.
4. Método	En la Fase 1 del estudio fue posible crear una EDR de los riesgos geotécnicos generales en España a partir de investigación bibliográfica. Además, se logró determinar los niveles de exposición a estos riesgos dependiendo de la localización del proyecto de acuerdo con mapas que caracterizan el territorio. En la Fase 2, se hizo un estudio de casos en los cuales se han materializado uno o varios riesgos geotécnicos a lo largo de las etapas del proyecto y permite plantear posibles acciones correctivas que se pudieron realizar para mitigar el impacto de los riesgos o prevenir su ocurrencia.



5. Cumplimiento de objetivos	<p>A partir de los resultados del análisis de casos y de las encuestas de riesgos geotécnicos, se logró cumplir con los siguientes objetivos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Se analizó la exposición a riesgos geotécnicos en diferentes zonas de España</li><li>- Se logró llegar a una estructura de desgloce del riesgo para diseñar un cuestionario en el cual, la participación de expertos, permitió llegar a construir matrices de probabilidad-impacto.</li></ul>
6. Contribuciones	<p>El trabajo permitió evidenciar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- La gestión de riesgos en un proyecto es parte integral de todos los procesos de la organización</li><li>-La integración entre la gestión de riesgos geotécnicos y la gestión de riesgos es fundamental en todas las etapas del proyecto e implica la identificación y estudio conjunto de los riesgos asociados a las condiciones geotécnicas del sitio y demás riesgos inherentes al proyecto. Para lograrlo, es necesario que el equipo de geotecnistas y geólogos tenga una comunicación constante y efectiva con el equipo de gestión del proyecto en todos los procesos de gestión del riesgo.</li><li>- Se proporcionan modelos de árboles de fallo para los casos de estudio y el riesgo de deslizamientos en ladera en particular</li><li>- Se proporcionan matrices de riesgos geotécnicos que permitan desarrollar estrategias de manejo en cada proyecto particular.</li></ul>
7. Recomendaciones	<p>La detección de riesgos geotécnicos y su comunicación e integración con la gestión de riesgos del proyecto son procesos fundamentales en las etapas iniciales del proyecto y deben ser iterativos a lo largo de su ciclo de vida. La comprensión de los tres elementos principales: perfil del Terreno, comportamiento del terreno y modelo del terreno, permite una visión completa de la situación geológica y geotécnica de un proyecto, así como la identificación explícita de los elementos que generan incertidumbre, los cuales que se pueden traducir en riesgos para el proyecto durante las siguientes etapas.</p>
8. Limitaciones	<p>Información limitada para la investigación de casos de estudio por temas legales. El proyecto original no se encontró publicado en el caso de Yesa. Número limitado de respuestas a los cuestionarios. Se esperaban 100 pero se obtuvieron 68</p>

## Índice

Capítulo 1.	Introducción y Objetivos.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivo .....	2
Capítulo 2.	Marco Teórico.....	3
2.1	Etapas de gestión de proyectos y gestión de riesgos.....	3
2.2	Identificación de Riesgos Geotécnicos .....	6
2.2.1	Perfil del Terreno.....	8
2.2.2	Comportamiento del Terreno .....	8
2.2.3	Modelo del Terreno .....	9
2.3	Evaluación del riesgo geotécnico .....	10
2.3.1	Análisis cualitativo del riesgo geotécnico .....	10
2.3.2	Análisis cuantitativo del riesgo geotécnico .....	11
2.4	Estrategias del manejo del riesgo geotécnico .....	13
2.5	Monitoreo y control del riesgo geotécnico .....	14
2.6	El riesgo geotécnico en España.....	16
2.6.1	Categorización de riesgos geotécnicos en España.....	16
2.6.2	Riesgos Inherentes a la Localización.....	16
2.6.3	Riesgos Propios del Diseño .....	25
2.6.4	Riesgos Propios de la Construcción .....	26
2.6.5	Riesgos Durante Operación.....	27
2.7	Estructura de Desglose del Riesgo Geotécnico en España .....	27
Capítulo 3.	Metodología .....	32
3.1	Investigación de Casos de Estudio.....	33
3.1.1	Selección de Casos .....	34
3.1.2	Preguntas de Investigación .....	34
3.1.3	Arboles de Fallo .....	35
3.2	Criterios para la Elaboración de Encuestas de Riesgo Geotécnico.....	36
3.2.1	Escalas de Likert en Encuestas.....	36
3.2.2	Muestreo y Nivel de Confianza.....	37
3.2.3	Diseño del Cuestionario .....	38
Capítulo 4.	Presentación y Análisis de Casos de Estudio .....	42
4.1	Ladera del Estribo Derecho de la Presa de Yesa .....	42



4.1.1	Antecedentes .....	42
4.1.2	Descripción de la obra .....	44
4.1.3	Características Geológicas y Geotécnicas .....	46
4.1.4	Procesos de Gestión de Riesgos Geotécnicos.....	47
4.1.5	Riesgos Geotécnicos Materializados en el Proyecto y su Impacto.....	50
4.1.6	Propuestas de Estrategias de Mitigación y Gestión de Riesgos .....	53
4.2	Ladera en Cerro Gordo Almuñécar, Granada- Urbanización Cármenes del Mar .....	55
	Nombre del Proyecto Inicial: Urbanización Cármenes del Mar .....	55
4.2.1	Antecedentes .....	55
4.2.2	Descripción de la obra .....	56
4.2.3	Características Geológicas y Geotécnicas .....	58
4.2.4	Procesos de Gestión de Riesgos Geotécnicos.....	58
4.2.5	Riesgos Geotécnicos Materializados en el Proyecto y su Impacto.....	60
4.2.6	Propuestas de Estrategias de Mitigación y Gestión de Riesgos .....	62
Capítulo 5.	Resultados de Encuestas de Riesgo Geotécnico en Proyectos de Ingeniería Civil	65
	65	
5.1	Resultados Grupo General .....	65
5.1.1	Caracterización del grupo y respuestas .....	65
5.1.2	Matriz de Impacto en Costes .....	69
5.1.3	Matriz Impacto en Cronograma.....	70
5.2	Resultados Grupo Experto .....	71
5.2.1	Caracterización del grupo y respuestas .....	71
5.2.2	Matriz de Impacto en Costes .....	72
5.2.3	Matriz Impacto en Cronograma.....	73
5.3	Comparación de Resultados Grupo General y Grupo Experto .....	74
5.3.1	Comparación resultados de costes.....	74
5.3.2	Comparación resultados de cronograma.....	76
5.4	Análisis de Resultados por Etapas del Proyecto .....	77
5.4.1	Riesgos Propios del Diseño .....	78
5.4.2	Riesgos Durante Construcción .....	80
5.4.3	Riesgos Durante Operación.....	83
5.4.4	Riesgos Organizacionales y de Gestión de Proyectos .....	84
Capítulo 6.	Conclusiones y Recomendaciones .....	87
Capítulo 7.	Bibliografía .....	89



## Capítulo 1. Introducción y Objetivos

### 1.1 Introducción

Los aspectos geológicos y geotécnicos han sido un pilar fundamental en el desarrollo de proyectos de ingeniería civil a nivel mundial. Las condiciones del terreno enmarcan un grupo de características que condicionarán la gestión del proyecto, el diseño, la construcción y la operación.

Según la guía PMBOK (7 edición, 2021), en el grupo de procesos de la Dirección de Proyectos se incluyen procesos de Gestión de Riesgos para identificar, analizar y dar respuesta a los diferentes factores de incertidumbre que puedan tener algún impacto sobre el proyecto. La importancia del desarrollo de estos procesos puede determinar el éxito o fracaso de un proyecto de obra civil, cumpliendo con el costo, plazo, calidad y alcance pactados con el cliente.

En el caso de los riesgos geológicos y geotécnicos incluyen la incertidumbre de las características referentes a:

- Perfil del terreno
- Comportamiento del suelo e interacción suelo estructura
- Simulaciones y modelos del terreno que se desarrollan para el proyecto

En España, según el tipo de obra civil existen normativas que establecen los requisitos para la evaluación, gestión y mitigación de riesgos geológicos y geotécnicos; para la regulación de la edificación el Código Técnico de la Edificación (CTE) y para las obras de infraestructura vial aplican las normativas del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España.

Sin embargo, la materialización de riesgos geotécnicos como deslizamientos, hundimientos, colapsos de estructuras e inundaciones han sido con frecuencia causantes de elevados sobrecostos en los proyectos, demoras, pérdidas materiales y, en algunos casos, pérdidas de vidas humanas. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en Convenio Específico de Colaboración con el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) ha realizado un análisis del impacto de dos riesgos geológicos en España. Se ha estimado que entre 1987 y 2002 las pérdidas por materialización de estos riesgos ascienden a 12.124 millones de euros. Durante el año de este estudio (2002) se estimó que entre el 2004 y el 2033, las pérdidas ascenderían a 27.818 millones de euros.

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha realizado un registro de la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa como: deslizamientos de tierras, colapsos, desprendimientos de rocas y presencia de suelos expansivos. Aunque el registro no se realiza durante la etapa de construcción, nos da una evidencia de algunas características de los movimientos en masa que han ocurrido durante la etapa de operación de las obras. En España, desde el año 2000, se han registrado 1215 eventos de remoción en masa, de los cuales solo se cuenta con información detallada de 500. Dentro de estos 500 eventos registrados, 30 eventos tuvieron víctimas mortales y heridos, adicional a los daños materiales que produjeron. En particular solo se registra la estabilización de 67 taludes, 313 procesos que continúan activos o se han reactivado y 40 procesos de los cuales no se tiene información o no se ha hecho seguimiento.

A partir de estos datos se ha planteado el problema central de la presente investigación, en la cual se pretende identificar cuáles de los anteriores riesgos son los que más se presentan en España y cómo se podría mitigar su impacto mediante la gestión de riesgos geotécnicos en las diferentes etapas de los proyectos de obra civil.



## 1.2 Objetivo

- Analizar la naturaleza de los riesgos geotécnicos que se materializan con mayor frecuencia en los proyectos de obra civil en España.
- Analizar la importancia de la identificación, evaluación y mitigación de los riesgos geotécnicos en un proyecto de ingeniería civil.
- Evaluar el impacto de los riesgos geotécnicos en las diferentes fases del proyecto (planificación, diseño, construcción y operación).
- Realizar un análisis cualitativo de los riesgos geotécnicos en España mediante las respuestas de un cuestionario sobre su ocurrencia.

## Capítulo 2. Marco Teórico

En este marco teórico se expone la estructura conceptual en la cual se basó la investigación, empezando por una descripción general de las etapas de un proyecto de obra civil en las cuales se involucra la gestión de riesgos y una descripción general de los procesos involucrados. Posteriormente, se hace énfasis en la definición de riesgos geológicos y geotécnicos, y sus respectivas técnicas de análisis dentro del proyecto. Finalmente, se describen técnicas de mitigación de los riesgos geológicos y geotécnicos que se usan comúnmente en las diferentes etapas del proyecto.

### 2.1 Etapas de gestión de proyectos y gestión de riesgos

Para este estudio se toman como referencia las etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción según el PMBOK (7 edición, 2021). En la Figura 1 se encuentran las diferentes etapas de un proyecto de construcción, con las actividades comunes de cada etapa. En la séptima edición del PMBOK (7 edición, 2021), este tipo de proyecto se conoce como “*ciclo de vida predictivo*”, en el cual cada fase se realiza una vez y cada fase termina antes de iniciar la siguiente.

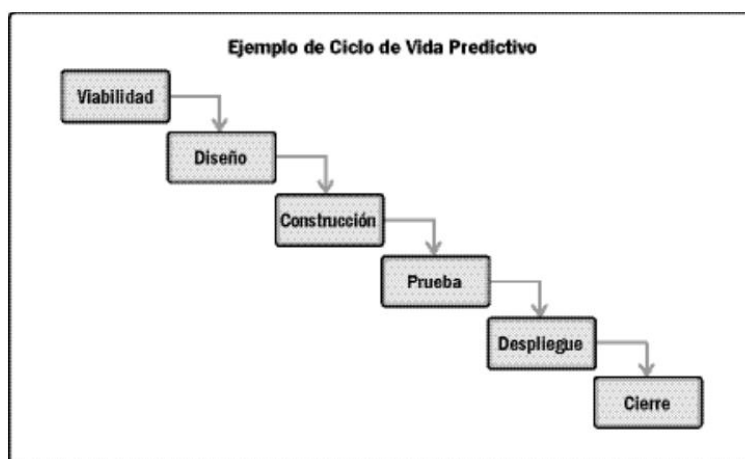


Figura 1 Etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción predictivo

Fuente: PMBOK (2013)

- **Viabilidad:** Incluye los estudios preliminares del proyecto, su formulación y estrategia de diseño. Al final de esta fase se espera una decisión de llevar a cabo o no el proyecto.
- **Diseño:** Se desarrolla un diseño básico del proyecto en el cual, dependiendo del tipo de proyecto, se realizará el estudio geotécnico y geológico que cumpla con la reglamentación del país. Posteriormente, se realiza un diseño de detalle, evaluación de costos y cronograma y una planeación detallada.
- **Construcción:** Etapa en la que se realizan los trabajos civiles y se entrega el producto pactado. Durante construcción se vuelven a evaluar los riesgos geotécnicos y geológicos, comprobando las características del terreno presentadas en el estudio geotécnico y detectando nuevos riesgos.
- **Prueba:** Se hace una revisión de la calidad final e inspección de los entregables del proyecto. Al final de la etapa se espera la aceptación o no por parte del cliente.
- **Despliegue:** El entregable o entregables se ponen en operación. Se hacen los mantenimientos correspondientes. En esta etapa se pueden hacer controles o seguimiento de los riesgos geológicos y geotécnicos.
- **Cierre:** Se cierra el proyecto y el equipo del proyecto se libera.

En el PMBOK (7 edición, 2021) se incluye un ciclo de vida de proyecto desde una perspectiva incremental como se presenta en la Figura 2. En este tipo de proyectos hay una serie de iteraciones de diseño y construcción que agregan funcionalidad a la estructura.

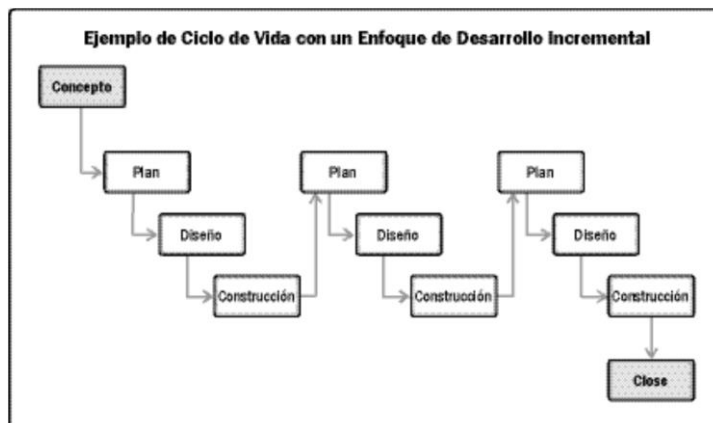


Figura 2 Etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción incremental

Fuente: PMBOK (2021)

El riesgo en un proyecto es definido según el PMBOK (7 edición, 2021) como el “*Evento o condición incierta que, si se produce, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos de un proyecto*” y por lo tanto la incertidumbre se define en la misma guía como “*Falta de comprensión y conciencia de los problemas, eventos, caminos a seguir o soluciones a buscar*”.

Este estudio se basa en los riesgos de tipo geotécnico, en cuyo caso la incertidumbre se enmarca en el conocimiento limitado de las propiedades del suelo, su estratificación, el nivel freático, las fallas geológicas de la zona, la variabilidad espacial del terreno y la idoneidad del tipo de modelo aplicado. En los estudios geológicos y geotécnicos se busca reducir esta incertidumbre a niveles aceptables según el tipo de obra y sus condiciones. Los análisis geotécnicos como el cálculo de capacidad portante, desplazamientos, estabilidad de taludes entre otros, se hacen a partir de exploración del terreno y ensayos de laboratorio, con el fin de determinar la probabilidad de falla, donde falla se define como cualquier condición que no permita cumplir con los criterios de funcionalidad definidos para la estructura.

En general, las actividades geotécnicas de un proyecto se centran en (Henderson et al., n.d.):

- Investigación geotécnica y geológica de la zona
- Caracterización del perfil de suelo encontrado como insumo para el diseño, así como la capacidad portante y asentamientos esperados
- Supervisión geotécnica de los trabajos de construcción.

Tanto la investigación geotécnica como la caracterización del suelo se realizan en las etapas iniciales de los proyectos; en los predictivos se realiza durante la viabilidad o diseño básico y en los de desarrollo incremental dependerá el objeto de cada iteración por lo que, normalmente, no se hacen nuevos estudios geotécnicos si la estructura no cambia de localización geográfica.

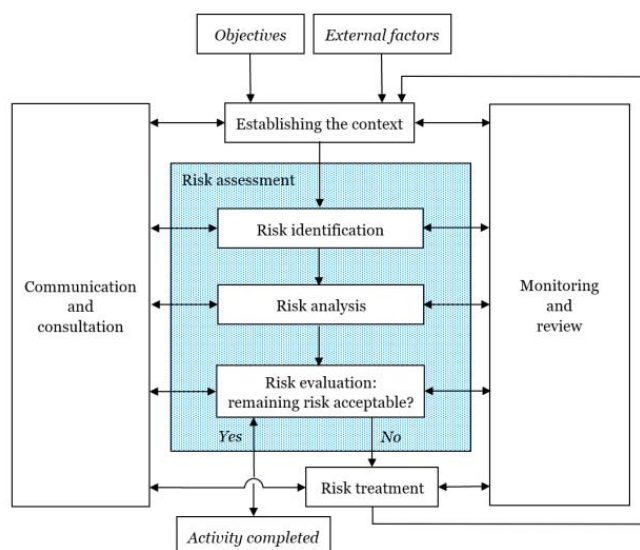
La supervisión geotécnica durante construcción se encarga de encontrar posibles diferencias entre las condiciones del terreno durante construcción y lo indicado en la exploración geotécnica, revisión del estado de las excavaciones y terraplenes, revisión de las condiciones de los materiales de préstamo y cantera así como el cumplimiento de sus prescripciones técnicas, evaluación de límites de comportamiento aceptables, establecimiento de programas de instrumentación para establecer el comportamiento real del suelo, entre otras.

El PMBOK (6 Edición, 2017) define la gestión del riesgo (GR) como el “*proceso sistemático de identificar, analizar y responder al riesgo del proyecto*”. Se incluyen dentro de dicha gestión los siguientes procesos iterativos:

- Establecer el contexto de la gestión de riesgo teniendo en cuenta la organización del proyecto, los objetivos y los factores externos.

- Planificar la gestión del riesgo
- Identificar los riesgos del proyecto
- Análisis de los riesgos:
  - Análisis cualitativo del riesgo
  - Análisis cuantitativo del riesgo
- Planificación de la respuesta al riesgo
- Comunicación del riesgo
- Monitoreo y control de riesgos

Según la norma ISO 31000, la gestión del riesgo crea y protege el valor, y es parte integral de todos los procesos de la organización. Adicionalmente, es parte de la toma de decisiones informadas conociendo la incertidumbre de manera explícita. El siguiente esquema presenta los pasos del proceso cíclico de gestión del riesgo de un proyecto y sobre el cual se profundizará en los siguientes numerales:



**Figura 3 Actividades cíclicas de la Gestión del Riesgo**

*Fuente: (Tidlund, 2021)*

La gestión del riesgo debe estar presente desde la etapa de viabilidad del proyecto, en la cual se definen las políticas de riesgo que el proyecto va a considerar, así como los responsables del manejo de los riesgos en cada etapa. Dentro de esta definición se indican los objetivos, alcance, estrategias de gestión del riesgo y criterios de aceptación del riesgo. Los criterios de aceptación son la base para la Definición del Riesgo Admisible (RA) que puede indicarse con un margen de tolerancia o de manera relativa al costo del proyecto.

El siguiente esquema refleja como la gestión del riesgo estará presente en todas las etapas del proyecto. Dependiendo del tipo de contrato, la gestión del riesgo en la licitación y negociación del contrato podrá ubicarse antes o después de la etapa de diseño.



**Figura 4 Gestión de Riesgo en las Etapas del Proyecto**

*Fuente: Gestión del Riesgo en Infraestructura Metro de Bogotá, Esteban Alarcón (Seminario Sociedad Colombiana de Geotecnia 2023)*

La gestión del riesgo geotécnico (GRG) es un proceso iterativo que requiere revisión y actualización constante en las diferentes etapas de un proyecto; en la primera etapa de diseño, se calcula cada riesgo identificado de manera que sea menor o igual al riesgo admisible. En la etapa de diseño para construcción o diseño detallado se reciben los riesgos transferidos de la primera etapa y se hace una determinación detallada cualitativa y cuantitativa para la definición de las estrategias de respuesta a cada riesgo. Dependiendo del tipo de contrato, se definen riesgos a transferir en el proceso de licitación, traducidos en requerimientos de la licitación en cuanto a experiencia previa, exploración adicional, monitoreo de riesgos entre otros. Adicionalmente, se incluyen cláusulas de gestión del riesgo asociadas al contrato de construcción y su gestión del riesgo con medidas de acompañamiento de geólogos y/o geotecnistas, mitigación de riesgos y detección de nuevos riesgos. Finalmente, durante la operación, la GRG se asocia al monitoreo y control de los riesgos transferidos durante las etapas de diseño y construcción al promotor del proyecto.

Es así como la integración entre la GRG y la GR es fundamental en todas las etapas del proyecto e implica la identificación y estudio conjunto de los riesgos asociados a las condiciones geotécnicas del sitio y demás riesgos inherentes al proyecto. Para lograrlo, es necesario que el equipo de geotecnistas y geólogos tenga una comunicación constante y efectiva con el equipo de gestión del proyecto en todos los procesos de gestión del riesgo (Martin van Staveren, 2013).

## 2.2 Identificación de Riesgos Geotécnicos

Como entrada a esta etapa, es necesario que el equipo del proyecto haya desarrollado previamente un Plan de Gestión del Riesgo general, que incluya una categorización de los riesgos. En las fases iniciales de los proyectos, se hace necesaria la definición del alcance de las actividades geotécnicas que permitan identificar, analizar y planificar una respuesta a los posibles riesgos de tipo geológico o geotécnico.

El Eurocódigo 7 (UNE-EN 1997) sobre proyectos geotécnicos establece los lineamientos para determinar las acciones necesarias y sus respectivas comprobaciones en un proyecto de obra civil. Para esto, establece tres categorías geotécnicas de la siguiente manera:

- Categoría geotécnica 1 (UNE-EN 1997-1, 2.1(14) a (16)): Corresponde a las estructuras pequeñas y simples en las cuales se puede asegurar que, según la experiencia y ensayos cualitativos, satisfacen los requisitos fundamentales y cuentan con un riesgo despreciable en materia de estabilidad local y global. En estas, las condiciones del terreno son conocidas, casi homogéneas y favorables. Se pueden clasificar en esta categoría: obras con excavaciones por encima del nivel freático, con cimentaciones superficiales y con experiencia local favorable en la zona.
- Categoría geotécnica 2 (UNE-EN 1997-1, 2.1(17) a (19)): Comprende estructuras comunes con cimentaciones de zapatas, losas y pilotes, sin condiciones complejas del

terreno o de cargas. Para estos proyectos deben realizarse sondeos directos, ensayos de campo y de laboratorio que proporcionen datos cuantitativos del perfil de suelo. En esta categoría se incluyen:

- Cimentaciones con zapatas, pilas y losas
- Obras de contención de tierras
- Excavaciones a cielo abierto
- Terraplenes
- Pilas y estribos de puentes
- Categoría geotécnica 3 (UNE-EN 1997-1, 2.1(20) a (21)): Se incluyen las obras de infraestructura inusual, con situaciones del terreno especiales como inestabilidad o riesgo sísmico alto.

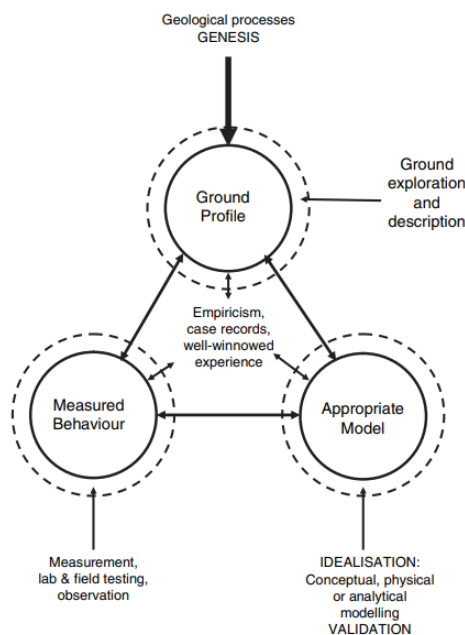
A partir de esta clasificación, también es necesario que se consideren las “situaciones del proyecto” (UNE-EN 1997) a corto y largo plazo, para poder establecer las evaluaciones que se deben hacer e identificar y gestionar los posibles riesgos. Específicamente para la parte geotécnica y geológica del proyecto, se debe establecer de manera preliminar al inicio del diseño si ocurre alguna de las siguientes situaciones:

- Combinaciones de carga por vientos, nieve, sismo, cargas de instalación
- Sensibilidad de la estructura frente a deformaciones
- Efecto de la estructura sobre otras obras existentes
- La aptitud general del terreno sobre el que se ubica la estructura y su estabilidad general, así como alternancia de estratos duros y blandos.
- Identificación y clasificación de zonas de suelo y roca
- Planos de estratificación del suelo o roca. En caso de tener estructuras sobre roca, se debe tener en cuenta su grado de meteorización.
- Estructuras enterradas en la zona del proyecto
- Fallas, diaclasas y fisuras

También las características del medio circundante a las obras como procesos de socavación y erosión, corrosión química, efectos de heladas o sequías y variaciones en niveles freáticos.

Esta investigación se basa en proyectos de Categorías Geotécnicas 2 y 3 que impliquen una exploración geotécnica con datos cuantitativos. De acuerdo con estudios enfocados en la incertidumbre geotécnica y la toma de decisiones (K. K. Phoon et al., 2022) , la principal limitación de los estudios geotécnicos en proyectos se debe a la ausencia de una explícita consideración de la incertidumbre. La consideración de la incertidumbre en el perfil de suelo y en el comportamiento del suelo puede soportar las decisiones que se tomen sobre el tipo de modelo geotécnico a implementar.

A continuación, se presenta el Triángulo de Burland o Triángulo Geotécnico desarrollado por el ingeniero geotécnico John Burland en 1987, en el cual se reconocen tres elementos geotécnicos interrelacionados que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar cualquier proyecto de obra civil.



**Figura 5 Triángulo de Burland**

Fuente: *Triángulo Geotécnico de Burland (1987), modificado por (K. K. Phoon et al., 2022)*

La comprensión de los tres elementos principales que se muestran en la Figura 5 permite una visión completa de la situación geológica y geotécnica de un proyecto, así como la identificación explícita de los elementos que generan incertidumbre, los cuales se pueden traducir en riesgos para el proyecto durante las siguientes etapas. En los siguientes numerales se identificarán los posibles riesgos geológicos y geotécnicos que se pueden identificar a través del Triángulo de Burland.

### 2.2.1 Perfil del Terreno

Corresponde a la distribución de los materiales representativos del subsuelo mediante el conocimiento de la geología regional (procesos de formación del suelo, incluyendo posibles actividades humanas previas) y la exploración geotécnica. Para esto, se realiza una investigación in situ que permita identificar: los espesores de las capas de cada material, las propiedades físicas del suelo, el nivel freático, la diferencia en los niveles de compactación de los materiales, entre otros.

Este elemento se encuentra en el vértice superior del triángulo ya que Burland (1987) enfatiza su importancia argumentando que la mayoría de los fracasos referentes al terreno en el proyecto se deben a la falta de conocimiento del perfil. Por lo tanto, es clave identificar los riesgos asociados al perfil del terreno como:

- Variabilidad espacial no identificada del perfil
- Anomalías en el perfil como bloques de roca o lentes de materiales blandos
- Variabilidad en el nivel de agua subterránea

### 2.2.2 Comportamiento del Terreno

Se pretende comprender el comportamiento mecánico del terreno como respuesta a la construcción del proyecto y las diferentes situaciones que se puedan presentar. Se busca realizar mediciones mediante ensayos de laboratorio e *in situ* siguiendo metodologías y normas establecidas e interpretando las mediciones por expertos.

La observación del comportamiento del terreno mediante análisis inversos es también una herramienta de este vértice. Una rama del conocimiento fundamental ha sido la “geotecnia forense” que estudia el comportamiento del terreno luego de deslizamientos o fallas ocurridos.



Una buena comprensión del comportamiento del suelo es fundamental para poder plantear un modelo geotécnico adecuado que permita predecir su comportamiento durante las etapas de construcción, pruebas y operación.

Los posibles riesgos asociados a este vértice del triángulo son:

- Elección de parámetros de suelo no representativos
- Interpretación errada de los datos de ensayos y mediciones en campo
- Uso de correlaciones no adecuadas para el tipo de suelo

### 2.2.3 *Modelo del Terreno*

Comprende los procesos de identificar lo que se va a modelar, idealizar su geometría y las condiciones de suelo y analizar las condiciones para predecir las respuestas con el proceso de modelado más adecuado.

Dentro de los modelos geotécnicos Burlang (1987) identifica los conceptuales, que caracterizan los estratos y los modelan en dos dimensiones. También los modelos geotécnicos físicos en tres dimensiones con los cuales se realizan pruebas de laboratorio para comprobar su comportamiento y finalmente los modelos analíticos que combinan el análisis probabilístico de datos obtenidos en campo con análisis computacionales como elementos finitos.

Los riesgos por identificar en este vértice pueden ser:

- Uso de un modelo no representativo del terreno: por su geometría, amplitud, metodología de cálculo entre otros.
- Uso de un modelo de menor complejidad: lo que impediría evaluar condiciones importantes para el proyecto
- Uso de un modelo de complejidad superior a la requerida: implicaría invertir mayores recursos a los requeridos para la complejidad del problema geotécnico.

En el centro del triángulo hay una serie de elementos que permiten una mayor comprensión geológica y geotécnica del sitio del proyecto y contribuyen a los diferentes vértices del triángulo. El empirismo y la experiencia son elementos que destacan el conocimiento adquirido a través de la experiencia en la zona o en tipos de suelos con comportamientos similares. El estudio de casos históricos y las causas de riesgos que se han materializado en otros proyectos.

Por lo tanto, la gestión de riesgo geotécnico está estrechamente ligada al equilibrio de los análisis geotécnicos del proyecto, es decir, el conocimiento del entorno geotécnico implica la identificación, análisis, planificación de respuestas y monitoreo de riesgos en las siguientes fases del proyecto.

En este punto se introducirá a la investigación el término Ingeniería Geotécnica Forense que se considera como el *“análisis post mortem de una falla que ocurrió durante una excavación, o durante la construcción de una obra basado en la elaboración de un análisis minucioso de las causas que la produjeron, siempre con la finalidad de no repetir en el futuro los principios que la originaron y de alejarse lo más posible de los riesgos que implica la presencia de este tipo de eventos.”* (Bernardo & González, 2019). A partir de la Ingeniería Geotécnica Forense, es posible identificar y analizar las probabilidades de ocurrencia de diferentes riesgos y sus posibles consecuencias.

Según el PMBOK (6 Edición, 2017) de esta etapa sale un registro de los riesgos identificados y sus posibles detonantes, el cual será revisado, actualizado y transferido durante todas las etapas del proyecto. Para los riesgos geotécnicos en particular, este proceso iterativo de identificación de riesgos es fundamental ya que, al inicio del proyecto, se hace con base en la información de referencia y la exploración geotécnica y, durante la construcción, se harán procesos de: observación de las características y comportamiento de los materiales que se van encontrando, comprobación de sus propiedades mediante ensayos in situ y/o de laboratorio con respecto a la investigación geotécnica inicial, observación y medición de los niveles de agua subterránea, entre otros.

Una de las técnicas fundamentales para la identificación de riesgos y su conocimiento se realiza mediante encuestas a expertos. En el caso de riesgos geotécnicos, constituyen riesgos que pueden ser identificados por todo el personal de diseño y de obra, y deberán ser evaluados por un especialista en geotecnia.

### 2.3 Evaluación del riesgo geotécnico

Los riesgos geotécnicos pertenecen a una categoría de riesgo asociada a riesgos naturales y también a riesgos en el diseño geotécnico. Se debe considerar que los riesgos geotécnicos estarán presentes desde las etapas iniciales con impactos desde la exploración geotécnica inicial y la seguridad del personal que la realiza, hasta la etapa de construcción en la cual el tiempo de exposición a riesgos del personal de obra y la maquinaria es mayor, por lo que deberá darse especial atención a prevenir los procesos detonantes como es el caso de los proyectos de explotación minera. Durante la operación, con la exposición de la obra a diferentes eventos antrópicos y/o climáticos, también pueden materializarse algunos riesgos geotécnicos que representan una mayor incertidumbre en su evaluación (Porter et al., 2019).

De acuerdo con estudios realizados sobre la magnitud y frecuencia en los riesgos geotécnicos (Porter et al., 2019), los procesos como deslizamientos, inundaciones y sismos suelen tener una relación inversa, es decir, cuando la magnitud del evento es mayor su frecuencia de ocurrencia es menor. Sin embargo, eventos de menor magnitud individuales suelen causar pocos daños a la infraestructura y menores riesgos a la seguridad de las personas, pero una frecuencia de ocurrencia mucho mayor.

#### 2.3.1 Análisis cualitativo del riesgo geotécnico

Este estudio se centra en el análisis cualitativo de riesgos geotécnicos. Se refiere a la evaluación independiente de cada uno de los riesgos identificados para hacer una priorización basada en su probabilidad e impacto en los objetivos de un proyecto en concreto. Esta metodología se utiliza para enfocar los procesos de gestión de riesgos definidos para el proyecto en los riesgos de mayor prioridad.

Tanto la probabilidad de ocurrencia del riesgo como su impacto en costos, cronograma, calidad y seguridad se definen en rangos porcentuales. A continuación, se presenta un ejemplo de una matriz de riesgo o matriz de probabilidad-impacto 5 x 5:

Likelihood Descriptions	Notional Frequency	Typical risk evaluation and response:				
		Moderate	High	High	Very High	Very High
Almost certain	> 10 times per year	Moderate	High	High	Very High	Very High
Likely	1 to 10 times per year	Low	Moderate	High	High	Very High
Possible	once every 1 to 10 years	Low	Low	Moderate	High	Very High
Unlikely	once every 10 to 100 years	Very Low	Low	Moderate	High	Very High
Very unlikely	< once every 100 years	Very Low	Low	Moderate	High	High
Consequence Descriptions		Incidental	Minor	Moderate	Major	Catastrophic
Safety		First aid incident	Lost time accident	Permanent injury	Fatality	Multiple fatalities
Financial		<\$100k	\$100k to \$1M	\$1M to \$10M	\$10M to \$100M	>\$100M

Figura 6 Gestión de Riesgo en las Etapas del Proyecto

Fuente: (Porter et al., 2019)

Aunque hay muchas variaciones de matrices probabilidad-impacto, para la construcción de la matriz resultante de esta investigación, se tendrán en cuenta los siguientes puntos:

- En el eje vertical se refleja la probabilidad o rango de probabilidad de ocurrencia del riesgo y en el eje horizontal las consecuencias relativas, definidas para diferentes áreas de impacto.
- La consecuencia de cada riesgo se evaluará en cuanto a las siguientes áreas de impacto: costes, cronograma, calidad y accidentabilidad.
- Cada celda de la matriz representa un nivel de riesgo que es producto de la probabilidad asociada y la consecuencia relativa.
- Los niveles de riesgo definidos estarán asociados a una estrategia de manejo general que deberá ser detallada para cada proyecto particular.
- Cada matriz deberá estar acompañada de una guía de aplicación en la cual se indiquen sus limitaciones y contexto. Se debe tener en cuenta que las matrices están condicionadas a la percepción de riesgo de cada organización y al riesgo admisible de cada proyecto.

La matriz resultante será de utilidad para priorizar, según expertos entrevistados, los riesgos que más ocurren en diferentes etapas del proyecto en España. Sin embargo, el equipo de cada proyecto define su riesgo admisible siguiendo la normativa aplicable y hace una evaluación de riesgos que esté alineada con sus objetivos y con un estudio del impacto específico del sitio en el que se va a implantar el proyecto.

### 2.3.2 *Análisis cuantitativo del riesgo geotécnico*

Es el proceso mediante el cual se obtiene información exacta y cuantitativa sobre el efecto de los riesgos en los objetivos del proyecto. A partir de la evaluación cuantitativa de los riesgos se obtiene un efecto global, que tiene en cuenta las interacciones entre todos los riesgos identificados.

Este análisis cuantitativo requiere la evaluación de variables que sean representativas y permitan desarrollar modelos numéricos utilizando técnicas de probabilidad y estadística, simulaciones de Montecarlo, inteligencia artificial, entre otros.

En el caso particular de los riesgos geotécnicos, se basan en la confiabilidad de los estudios geotécnicos que se realicen en el proyecto y se hace compleja la determinación de la interacción entre riesgos. Dentro de las consideraciones de conocimiento del perfil del terreno y su comportamiento, se ha aplicado un concepto de Diseño Basado en la Confiabilidad o “Reliability-based design RBD” en el cual se incorporan explícitamente los niveles de incertidumbre existentes en el ambiente de diseño (K.-K. Phoon & Ching, n.d.).

Bajo el concepto RBD, se han podido identificar dos corrientes para el manejo de la incertidumbre en la caracterización del suelo: la primera busca hacer mediciones en campo y muestras en más sitios, es decir, aumentar el número de datos de un tipo de ensayo. La segunda, es hacer más tipos de ensayos que sean complementarios, como es el caso de el ensayo de penetración estándar (SPT) que se hace durante las perforaciones en conjunto con el ensayo de cono de arena (CPT) para conocer otras propiedades del suelo como la presión de poros. Mientras el primer método aumenta la cantidad de información, el segundo aumenta su calidad, sin embargo, los dos reducen la incertidumbre y se utilizan para definir las propiedades de diseño dependiendo de las necesidades de cada tipo de proyecto. Siempre es conveniente validar los datos geotécnicos obtenidos mediante diferentes fuentes de información incluyendo el empirismo como herramienta.

El RBD busca reducir los siguientes errores en la toma de datos (Augusto et al., 2011):

- Error estadístico por obtención de pocos datos, ya sea por falta de ensayos de laboratorio, solicitud de tipos de ensayos no significativos para el análisis, falta de toma de datos durante la exploración entre otros.
- Sesgos por mala ejecución de ensayos de laboratorio y/o exploración geotécnica, por ejemplo, alternación de muestras por obtención o almacenamiento inadecuado, diferencias en la velocidad de carga de ensayos de laboratorio.

- Error metodológico de calibración de equipos y de exactitud en las lecturas de las mediciones.
- Ignorar la variabilidad espacial de los parámetros de suelo a lo largo del proyecto

Sobre el último punto, hay una gran importancia en la consideración de la variabilidad de los parámetros geotécnicos como variable independiente y la probabilidad de falla de las obras objeto del proyecto. La Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera desarrollada por el Ministerio de Fomento de España (España. Dirección General de Carreteras., 2009), cuando se usa la teoría de probabilidad es posible medir la confianza de un dato y precisión. En geotecnia, se aplica con frecuencia un intervalo de variación de los datos obtenidos, definiendo un coeficiente de variación por medio de los resultados de ensayos para un parámetro determinado o basados en estudios y experiencia preliminar:

$$v = \frac{1}{m} \cdot \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}{\text{Valor medio}}$$

Donde el coeficiente m depende del número de datos que se hayan obtenido del parámetro:

$$\begin{aligned} \text{Para } n = 10 \dots\dots\dots m &= 3 \\ \text{Para } n = 30 \dots\dots\dots m &= 4 \\ \text{Para } n > 30 \dots\dots\dots m &= 6 \end{aligned}$$

Es decir, el coeficiente de variabilidad aumentará si tengo menos de 30 datos resultantes de ensayos.

Dentro de un intervalo de confianza conocido de valores posibles que dependen del tipo de terreno, es posible definir una distribución de probabilidad de obtener un determinado valor para los diferentes parámetros de suelo. Según la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera 2009, es importante que se defina la variación de los parámetros geotécnicos más representativos para el proyecto y se expresen en términos de:

- El valor representativo
- Medida del coeficiente de variación
- Una forma de su ley de distribución que comúnmente es de tipo log normal.

Posteriormente, estos parámetros serán la base del modelo geotécnico que considere la obtención de diferentes factores de seguridad a la falla teniendo en cuenta la función de probabilidad obtenida. Estos factores de seguridad en geotecnia se obtienen por medio de diferentes metodologías dependiendo del fenómeno a evaluar como el deslizamiento, el volcamiento, la capacidad portante entre otros.

Es posible expresar la confiabilidad como una relación entre las cargas a las que se ve sometido un sistema y su capacidad de soportarlas (Augusto et al., 2011):

$$\alpha = 1 - P(r)$$

Donde  $\alpha$  es la confiabilidad del sistema y  $P(r)$  es su probabilidad de falla.

En proyectos geotécnicos complejos (Categoría Geotécnica 3) es posible calcular un índice de confiabilidad del factor de seguridad obtenido a partir de análisis y modelaciones del terreno con la estructura a partir de la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{(E[FS]-1)}{\sigma[FS]}$$

Donde  $E(FS)$  es el valor del factor de seguridad calculado a partir de los modelos geotécnicos basados en variables independientes del terreno y  $\sigma(FS)$  es la desviación estándar del factor de seguridad.

Estos métodos probabilísticos son herramientas que permiten evaluar los problemas geotécnicos reconociendo la incertidumbre que conllevan. Cuando la información del terreno es escasa, es

posible realizar análisis de sensibilidad y confiabilidad para mitigar posibles riesgos geotécnicos que afecten el proyecto.

Este estudio se basará en el análisis cualitativo de riesgos geotécnicos en España, reconociendo que para cada proyecto será importante desarrollar un análisis de tipo cuantitativo con los datos específicos del terreno donde se va a realizar.

## 2.4 Estrategias del manejo del riesgo geotécnico

De acuerdo con la guía PMBOK (7 edición, 2021), luego de identificar y analizar los posibles riesgos, se pueden considerar las siguientes alternativas de acción frente a los riesgos:

- **Evitar:** El equipo del proyecto elimina la amenaza y su posible impacto en el proyecto. En el caso de los riesgos geotécnicos, el cambio de locación del proyecto por presencia de fallas, suelos con características desfavorables, zonas inundables o zonas inestables, es una de las formas más comunes de evitar.
- **Escalar:** El equipo del proyecto ha identificado el riesgo, pero su manejo se encuentra fuera del alcance del proyecto, por lo que se le comunica al director y al promotor para tomar una decisión informada sobre continuar con su desarrollo. En el caso de los riesgos geotécnicos, cuando una obra se encuentra ubicada necesariamente en zona sísmica alta, se toman las medidas de mitigación durante el diseño para proteger la vida humana en un evento sísmico hasta los rangos tolerables por normativa, sin embargo, está fuera del alcance del proyecto evitar que el sismo ocurra y se debe informar esta exposición ante la amenaza sísmica al promotor.
- **Transferir:** Se delega la responsabilidad de manejo del riesgo a otro interesado. Normalmente, en los contratos Diseño-Licitación-Construcción (DBB), algunos riesgos son transferidos del diseñador del proyecto al constructor. Por ejemplo, durante el diseño se hace un diseño teórico de las excavaciones durante construcción y se diseñan sistemas de soporte lateral en caso de requerirse. Sin embargo, el contratista de construcción debe identificar nuevos riesgos en caso de encontrar materiales diferentes, niveles freáticos altos o estratos blandos en las excavaciones y hacer la correspondiente gestión de este riesgo. En los contratos Diseño-Construcción (DB), hay un solo contratista encargado de las etapas de diseño y construcción por lo que la gestión de riesgos debe ser iterativa en cada fase del proyecto y la transferencia de riesgos se hace entre etapas.
- **Mitigar:** Consiste en tomar acciones que disminuyan la probabilidad de ocurrencia y/o el impacto de un riesgo identificado. En el caso de un riesgo geotécnico existen múltiples medidas de mitigación aplicables a proyectos como obras de contención de taludes, instrumentación de taludes para detectar movimientos, diseño de obras de drenaje y protección contra inundaciones, construcciones sísmo resistentes, geofísica para mejorar el conocimiento del perfil de suelo, entre otras. Las medidas de mitigación tomadas durante las primeras fases del proyecto son fundamentales para el manejo de riesgos geotécnicos y la reducción del impacto durante construcción y/u operación.
- **Aceptar:** Implica asumir que hay un riesgo, pero no se tomarán acciones para mitigarlo ni evitarlo debido a su baja probabilidad de ocurrencia y bajo impacto. En ocasiones se desarrolla un plan de contingencia en caso de materialización del riesgo. En el caso de los riesgos geotécnicos, la normativa de cada país y tipo de obra define los riesgos que se pueden aceptar en un rango admisible, por ejemplo, la definición de factores de seguridad ante diferentes situaciones y la definición de los asientos admisibles. Adicionalmente, al inicio del proyecto se define el riesgo admisible para cada categoría que se puede identificar.

También es posible incluir múltiples estrategias como respuesta al riesgo. En el caso de los riesgos geológicos y geotécnicos, pueden manejarse utilizando varias estrategias, por ejemplo: construir una obra de contención y monitorear mediante instrumentación los movimientos de los taludes como estrategia de mitigación, para luego determinar si el riesgo se puede aceptar o no.

En esta etapa es fundamental un manejo de la comunicación del riesgo, tanto interna con el equipo del proyecto como externa con los interesados. El proceso de comunicación de los riesgos es iterativo a lo largo de la gestión del riesgo, y deberán tomarse decisiones sobre cómo se comunica, cuando se comunica y a quién se comunican para que se haga efectivo. La información que describe cada riesgo, en especial de riesgos geotécnicos, debe ser clara, relevante y comprensible para todos los interesados, así como las acciones previstas para el manejo de los riesgos.

## 2.5 Monitoreo y control del riesgo geotécnico

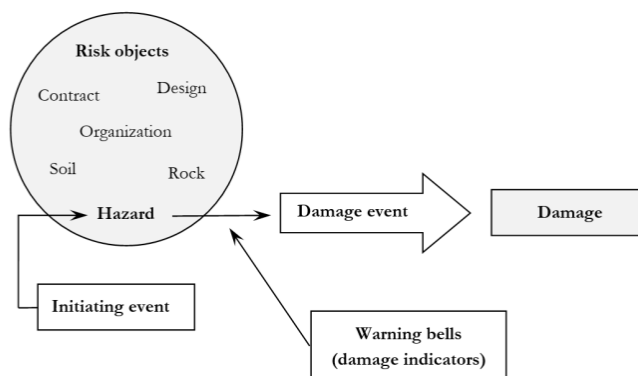
Como se ha evidenciado, la mayor cantidad de riesgos geotécnicos se presentarán durante la etapa de construcción y operación, aunque se deban identificar desde las etapas de iniciales.

En la fase de monitoreo y control de riesgos para la GR, se tienen *inputs* como el plan de gestión de riesgos, los riesgos identificados y el plan de respuesta a riesgos. Como herramientas de los procesos de monitoreo y control para esta fase aplicables a la GRG están:

- La revisión periódica y actualización de los riesgos identificados durante las etapas de exploración geotécnica, construcción y operación.
- El índice del rendimiento técnico de los trabajos durante la etapa de exploración geotécnica y construcción
- La planeación de nuevas respuestas al riesgo según los hallazgos del monitoreo durante las etapas de exploración geotécnica, construcción y operación.

Como salidas del proceso de monitoreo y control de riesgo se espera la puesta en marcha de respuestas a riesgos en caso de haberlos identificado, acciones correctivas y actualización de los registros de riesgos.

En la Figura 7 se presenta el proceso en el cual una amenaza se convierte en un riesgo materializado con consecuencias en el proyecto.



**Figura 7 Proceso de materialización de un riesgo**

Fuente: (Tidlund, 2021)

Se presenta un evento de inicio que puede ser detonante de alguna amenaza para el proyecto, por ejemplo, una excavación, una decisión en obra o un cambio en el clima. Los objetos de riesgo o “fuentes de riesgo” según la norma ISO 31000 son elementos que, solos o en combinación con otros elementos, tienen el potencial de producir daño. En el caso de los riesgos geotécnicos, estos elementos pueden estar presentes en el tipo de contrato, en el diseño, en la supervisión durante obra o en las características del suelo.

Antes de que se produzca el evento de daño y el daño resultante, hay unas alarmas o indicadores de daño, en inglés “*warning bells*”, que corresponden al objeto central de los procesos de monitoreo y control, pues pueden indicar que es posible que se materialice un riesgo cuando aún se puede prevenir o reducir su impacto.

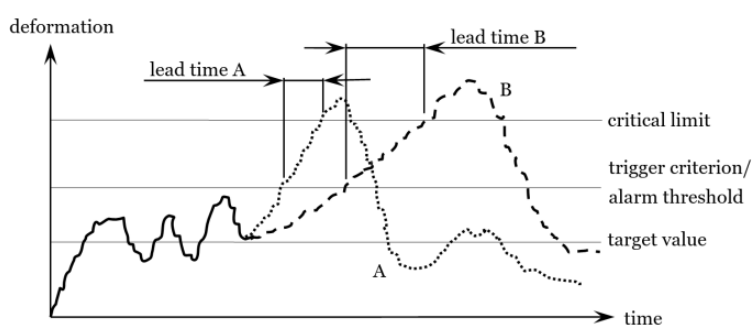
Durante el diseño de un proyecto es importante definir, además del factor de seguridad, el tipo de falla que se puede producir a partir de la construcción. Hay dos comportamientos geotécnicos que se producen según el tipo de suelo y las cargas a las que se ve sometido:

- Comportamiento de falla dúctil: Se caracteriza por la aparición de desplazamientos graduales en el suelo, grietas leves que pueden abrirse con el tiempo y la estructura se mantiene en estado de servicio. Normalmente, se puede usar un tipo de monitoreo de desplazamientos simple, que produce una alerta y da tiempo de implementar medidas de contingencia en caso de ser necesario.
- Comportamiento de falla frágil: Es una falla abrupta y progresiva que afecta el estado de servicio de la estructura. No es posible determinarla mediante sistemas de monitoreo tradicional y tampoco da una ventana de tiempo para la implementación de sistemas de contingencia. Por lo tanto, este tipo de comportamiento puede generar impactos más altos en el proyecto.

Teniendo en cuenta lo anterior, previo al inicio de la construcción se debe tener un plan de monitoreo y control geotécnico que establezca:

- Hitos de alarma o “*tigger criterion*”: Son valores cuantitativos físicos o propiedades químicas, determinados durante las etapas iniciales de diseño, que indican en qué momento es necesario implementar planes de contingencia. Por ejemplo, desplazamientos mayores a 1 cm o asentamientos mayores a 2,5 cm, dependiendo del tipo de estructura.
- Valor objetivo o “*target value*”: Indica el valor de los parámetros sujetos a monitoreo y control en los cuales se considera el trabajo o la operación segura y eficiente.
- Límite crítico o “*critical limit*”: Es el punto en el cual se espera un daño en la estructura.
- Tiempo de aplicación del plan de contingencia o “*lead time*”: Es el tiempo que se espera que transcurra entre el hito de alarma y la llegada al límite crítico. Durante este tiempo es posible implementar planes de contingencia para evitar daños.

La Figura 8 presenta un ejemplo de una gráfica del monitoreo de la deformación para dos tipos de suelo A y B bajo la aplicación de una carga a lo largo del tiempo. El suelo A llega más rápido al hito de alarma y tiene menor tiempo de aplicación de un posible plan de contingencia, mientras que el suelo B se demora más en llegar al hito de alarma y la aplicación de un plan de contingencia es menos inminente.



**Figura 8 Alarmas en el proceso de monitoreo y control de riesgos geotécnicos. Caso de dos suelos con diferente relación esfuerzo-deformación (A y B)**

Fuente: (Tidlund, 2021)

La extensión del monitoreo geotécnico y los parámetros que se deben medir se definirán de acuerdo con la categoría geotécnica del proyecto y a sus riesgos identificados.

Por ejemplo, para los proyectos de minería donde es fundamental el monitoreo constante de la estabilidad de los taludes, se utilizan instrumentos como (Mamani Roque, 2022):

- Indicadores de nivel de agua
- Piezómetros para medición de la presión de poros

- Inclínómetros para medición de los desplazamientos en profundidad
- Marcos superficiales para control de desplazamientos superficiales
- GPS de monitoreo y Drones
- Sismómetros/Acelerómetros para medir las aceleraciones producidas por sismos naturales o vibraciones causadas por el tráfico.
- Estación meteorológica para medición de temperatura, precipitación, presión y vientos.

La instrumentación deberá comunicar sus mediciones constantemente, especialmente durante construcción, para dar cumplimiento al plan de monitoreo y control.

## 2.6 El riesgo geotécnico en España

Para la obtención de información sobre las condiciones geotécnicas predominantes en España se revisaron los mapas desarrollados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), que es un organismo público de investigación adscrito al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España. El IGME se encarga de realizar mapas cartográficos con información geológica, ambiental, hidrológica, de riesgos, entre otros, como base de datos del territorio de España.

### 2.6.1 Categorización de riesgos geotécnicos en España

Para hacer la categorización de riesgos en la que se basa este estudio, se estudiaron diferentes fuentes de información y se decidió dividir los grupos en cuatro grupos principales y algunos subgrupos que se describen en los siguientes numerales.

### 2.6.2 Riesgos Inherentes a la Localización

Corresponden a los riesgos a los que el proyecto está naturalmente expuesto debido a su localización. Las amenazas corresponden a la ocurrencia de eventos fuera del control de proyecto como sismos o inundaciones y a condiciones propias del sitio como la composición del perfil estratigráfico.

La información de estas características se obtuvo a partir del Mapa Geotécnico General a escala 1:200.000 desarrollado por el IGME, que incluye: la composición litológica de los materiales, las características geotécnicas, hidrogeológicas y geomorfológicas de cada zona del país. Además, en los mapas se presentan convenciones que permiten identificar las condiciones constructivas propias de la zona y las clasifica como muy favorables, favorables, aceptables, desfavorables y muy desfavorables.

Para este estudio se hizo una base de datos (ver Anexo 1) por zona y por comunidad autónoma, en la cual se recopilan las condiciones constructivas predominantes. En las zonas donde se identifican condiciones desfavorables o muy desfavorables, se recurrió a la memoria de cada mapa para identificar las causas de esta clasificación. La recopilación de estas causas fue la fuente principal para establecer las categorías de riesgo geotécnico predominantes en España y filtrar otros riesgos que no se presentan o se presentan de manera muy poco representativa.

A partir de la base de datos del Anexo 1 se llegó a las siguientes conclusiones:

- En la comunidad autónoma de Andalucía es donde más se han detectado condiciones clasificadas como desfavorables y muy desfavorables, especialmente en las zonas de Linares, Sevilla, Córdoba, Jaén, Baza, Ayamonte, Huelva, Morón de la Frontera, Granada, Almería y Garrucha, con riesgos de tipo geomorfológico, hidrológico y geotécnico (incluyendo litológicos).
- Siguiendo a Andalucía, la comunidad autónoma de Islas Canarias también presenta zonas con condiciones desfavorables y muy desfavorables, especialmente en Santa Cruz de La Palma, San Sebastián de la Gomera y Las Palmas de Gran Canaria. Los riesgos predominantes son de tipo geomorfológico e hidrológico.



- En tercer lugar, se encuentra la comunidad de Castilla y León, en las zonas de Aranda de Duero, Soria y Salamanca. En la zona los riesgos predominantes son de tipo geomorfológico y geotécnico.
- En una proporción similar a Castilla y León, se encuentra la comunidad de Extremadura, en las zonas de Villareal, Badajoz y Villafranca de la Serena, con riesgos de tipo hidrológico y geotécnico.

Del total de 93 zonas de España descritas en los mapas del IGME, en 56 se identificaron condiciones constructivas predominantemente muy desfavorables, dentro de los cuales los principales riesgos se clasificaron como geomorfológicos, hidrológicos y geotécnicos (incluyendo litológicos).

Teniendo en cuenta el análisis del Anexo 1, se han categorizado los tipos de riesgo más comunes según la descripción de los siguientes numerales.

### 2.6.2.1 *Riesgo Sísmico*

A partir del Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre, se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02), adscrita al Ministerio de Fomento de España. En esta norma se hace una caracterización de las zonas de amenaza sísmica y del riesgo, según el tipo de estructura. Se identifican tres tipos de estructura:

- **De importancia moderada:** son aquellas en las cuales, si ocurre un terremoto y la daña o destruye, hay una muy baja probabilidad de ocasionar víctimas, interrumpir la prestación de un servicio primario o producir daños económicos significativos a terceros.
- **De importancia normal:** son aquellas estructuras que en caso de destrucción por un terremoto podrían ocasionar víctimas, pérdidas económicas importantes o interrupción en la prestación de un servicio no primario.
- **De importancia especial:** Corresponden a estructuras que en caso de terremoto pueden llevar a consecuencias catastróficas. Como ejemplo de este tipo de estructuras, la norma identifica hospitales, instalaciones de comunicaciones, instalaciones industriales, presas, centrales nucleares, monumentos de interés cultural o instalaciones de espectáculos públicos entre otras.

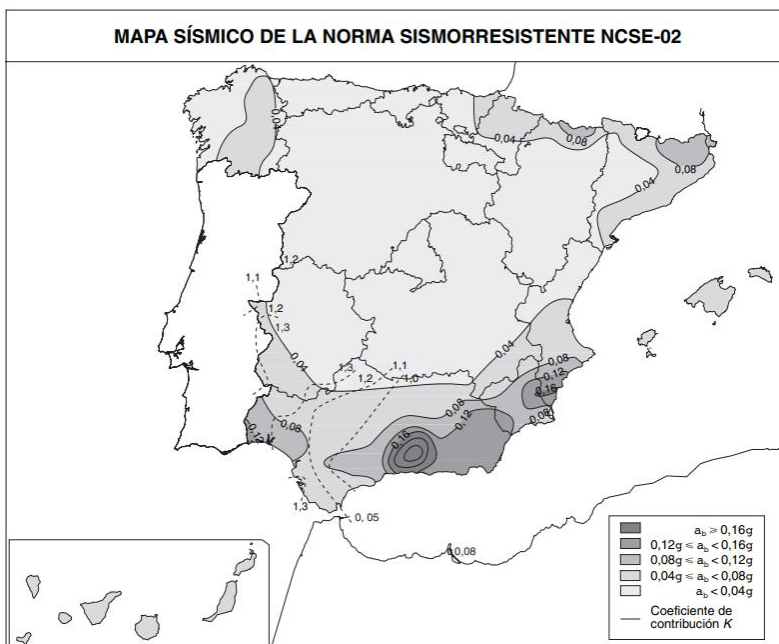
La NCSE-02 no es de obligatoria aplicación en los casos de estructuras de importancia moderada. Tampoco es obligatoria para construcciones de importancia normal cuando la aceleración sísmica básica sea inferior a 0,04 g y no se encuentren en terrenos potencialmente inestables.

En la NCSE-02 se muestra un mapa de peligrosidad sísmica del territorio (ver Figura 9), en el cual se presentan los valores de aceleración sísmica horizontal en la superficie del terreno o básica ( $a_b$ ) en relación con el valor de la gravedad g. Esta aceleración en la base se multiplica por algunos coeficientes para obtener la aceleración sísmica de cálculo ( $a_c$ ):

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Donde  $\rho$  es el coeficiente adimensional de riesgo, que es 1 en construcciones de importancia normal y 1,3 en construcciones de importancia especial.

S es el coeficiente de amplificación del terreno que depende del rango de valores en el que se encuentre la aceleración básica y de un coeficiente del terreno C, que se asigna en la norma según las características geotécnicas del terreno de cimentación.



**Figura 9 Mapa Sísmico Norma Sismorresistente NCSE-02**

Fuente: Norma Sismorresistente NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009)

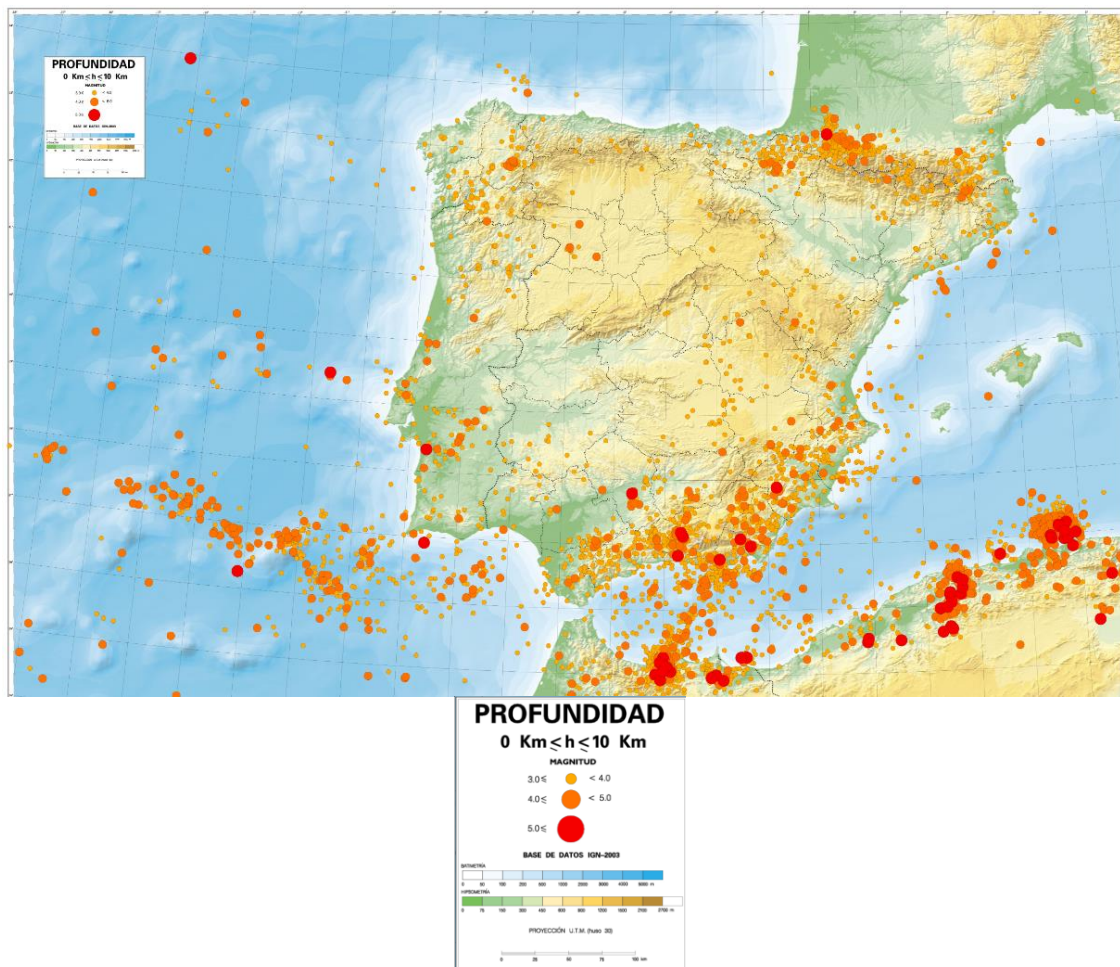
Las zonas de España donde se observan mayores aceleraciones son:

- Zona sur de la Península Ibérica: Incluye las comunidades autónomas de Andalucía, Murcia y sur de la Comunidad Valenciana.
- Zona noreste en los Pirineos: Es la zona montañosa al norte del país, principalmente en la zona del Pirineo Catalán y el Pirineo Aragonés.

En general, los sismos que producen más efectos sobre la superficie son los que se encuentran a menor profundidad, mayor magnitud y en zonas más cercanas al epicentro. Los efectos que producen también están relacionados con el tipo de suelo ya que los suelos más blandos y con porción granular mayor tienden a amplificar las ondas sísmicas, mientras que los suelos rocosos las disipan con mayor facilidad.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, se ha encargado de proporcionar información sísmica correspondiente a los eventos sísmicos y sus características. Tiene disponibles visualizadores en línea de terremotos, estaciones sísmicas en todo el país con sismómetros que detectan y miden las vibraciones del suelo, acelerómetros que miden la magnitud de la aceleración durante eventos sísmicos y sistemas de digitalización y comunicación de datos. Para este estudio se han seleccionado los sismos con profundidad menor a 10 km como indicadores de zonas con riesgo sísmico mayor.

En la Figura 10 se presenta el mapa de sismicidad del IGN para profundidades menores a 10 km. A partir del 2002, el IGN ha registrado las magnitudes de los sismos según la fórmula de magnitud local de Richter, con la denominada magnitud a partir de la amplitud de la fase Lg (mbLg). Esta registra la magnitud de un sismo dependiendo de la amplitud del desplazamiento, el periodo de tiempo y la distancia al epicentro. Las magnitudes de sismo entre 1 y 4 se consideran bajas y normalmente no ocasionan daños, sin embargo, las magnitudes mayores a 4 pueden ocasionar daños a la infraestructura y a la vida humana. De acuerdo con el mapa, históricamente los sismos con magnitud mayor que 5 se han ubicado principalmente al sur de la península en las comunidades autónomas de Andalucía y Murcia.



**Figura 10 Sismicidad de la Península Ibérica (Profundidad <10 km)**

Fuente: Instituto Geográfico Nacional  
<https://www.ign.es/web/mapas-sismicidad>

En la Tabla 1 se presenta la frecuencia histórica desde 1985 hasta el 2020 de los sismos en la Península Ibérica. Se observa que para proyectos que se ubiquen en la zona sur de la península o hacia la zona de los Pirineos, es necesario tener en cuenta este riesgo con magnitudes entre 4,0 y 5,9.

**Tabla 1 Frecuencia por magnitud de sismos en España**

Estimación de la ocurrencia media de terremotos en la Península Ibérica	
Magnitud	
≥ 7,0	1 cada 150-175 años
6,0 – 6,9	1 cada 25-30 años
5,0 – 5,9*	1 cada 10 meses
4,0 – 4,9*	1 cada 20 días
3,0 – 3,9*	1 cada 50 horas
2,0 – 2,9*	1 cada 10 horas

\* A partir de 1985

Fuente: Instituto Geográfico Nacional  
<https://www.ign.es/web/mapas-sismicidad>

### 2.6.2.2 Riesgo Hidrológico

De acuerdo con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, las inundaciones son los eventos que más daños han generado en España, estimados en una media de 800 millones de euros anuales. El Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, se aprobó con el objetivo de plantear una base para el adecuado conocimiento y evaluación de los riesgos por inundación, con el fin de reducir las consecuencias negativas. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España mediante el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), ha empleado un sistema informático público en el que se almacenan datos de estudios de inundabilidad.

Según el Real Decreto 903/2010, se define una zona inundable como “*los terrenos que puedan resultar inundados por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período estadístico de retorno sea de 500 años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas*” (Ministerio de la Presidencia, 2010). Las zonas detectadas como de mayor riesgo de inundación se han llamado Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) y se identifican en el SNCZI.

De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente, los riesgos hidrológicos en España se pueden clasificar como:

- Inundaciones: Corresponde al anegamiento de terrenos que no están cubiertos de agua normalmente. Según su causa se pueden clasificar como:
  - Fluviales: Ocurren por aumento y desbordamiento de ríos
  - Pluviales: Ocurren por exceso de lluvias en un periodo de tiempo reducido
  - Marinas: Ocurren por mareas altas temporales
- Erosión hídrica: Corresponde al proceso de desgaste del terreno por acción de lluvia, escorrentía superficial o remoción de la vegetación. Se pueden producir desde pérdidas de láminas de suelo hasta cárcavas o canales profundos por acción del agua.

En la siguiente figura se presentan las inundaciones históricas ocurridas en España hasta el año 2009. En este se identifican las zonas donde han ocurrido inundaciones con pérdidas de vidas y de haciendas, así como las zonas con riesgo de inundación.



CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO POTENCIAL



**Figura 11 Inundaciones Históricas en España.**

Fuente: Instituto Geográfico Nacional, 2009

[https://www.ign.es/espmmap/mapas\\_riesgos\\_bach/Riesg\\_Mapa\\_05.htm](https://www.ign.es/espmmap/mapas_riesgos_bach/Riesg_Mapa_05.htm)

Como es esperado, la mayor densidad de puntos en la Figura 11 se ubican en las costas del Mediterráneo y el Mar Cantábrico, con episodios de inundación breves debidas a “gotas frías” (lluvias otoñales). También se ha encontrado gran densidad en las cuencas hidrográficas de los ríos Duero, Guadalquivir y Ebro en épocas de invierno o primavera.

El SNCZI ha recopilado información de estudios realizados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y las Confederaciones Hidrográficas, en los cuales se han identificado y caracterizado las ARPSIs. Para identificar estas áreas se han analizado datos históricos y se ha hecho una evaluación del riesgo de inundación considerando factores como: la probabilidad de ocurrencia, el impacto en la población y la magnitud de la inundación.

Las ARPSIs se han agrupado según demarcaciones hidrográficas. Una demarcación hidrográfica corresponde a una o varias cuencas cercanas que se han agrupado por la Ley de Aguas de España y se gestionan por las Confederaciones Hidrográficas. Se han agrupado en 11 demarcaciones hidrográficas en las cuales se ha identificado el nivel de riesgos de inundación por diferentes causas.

En la Figura 12 se presentan las zonas donde hay mayor riesgo de ocurrencia de una inundación incluyendo causas fluviales, marinas, pluviales y por aguas subterráneas.



**Figura 12 ARPSIs en España**

Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

<https://sig.mapama.gob.es/snczi/>

En el Anexo 2 se presenta el inventario completo de ARPSIs medidos en kilómetros, obtenido del SNCZI para toda España. De este se puede concluir lo siguiente:

- Los ARPSIs de mayor longitud en España corresponden a causas fluviales, con un total de 7.537,13 km de longitud inundable.
- Las zonas con mayores longitudes de ARPSIs de origen fluvial corresponden a los cauces del Ebro (1.572,3 km), del Guadalquivir (910,34 km) y el Júcar (263,94 km).
- Después de la fluvial, la marina es la mayor causa de inundaciones con un total de 1.207,57 km de longitud inundable.

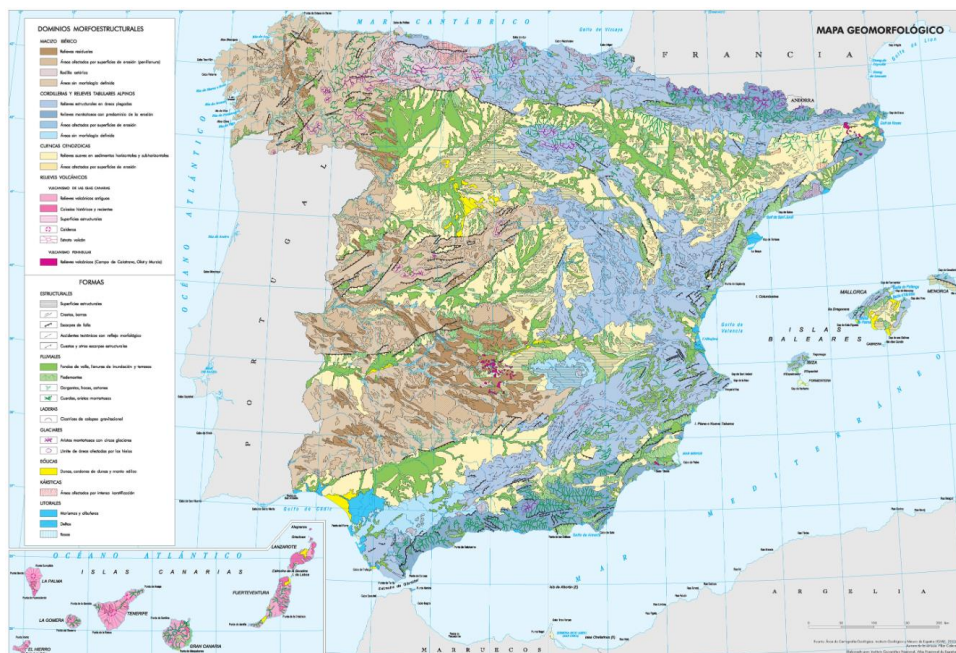
- Las zonas con mayores longitudes de ARPSIs de origen marino corresponden a las costas de Cataluña (186,24 km) seguidas por las costas de Galicia (160,77 km).
- Finalmente, las inundaciones de tipo pluvial son las de menor riesgo en España, y se presentan en su mayoría en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir (98,93 km).

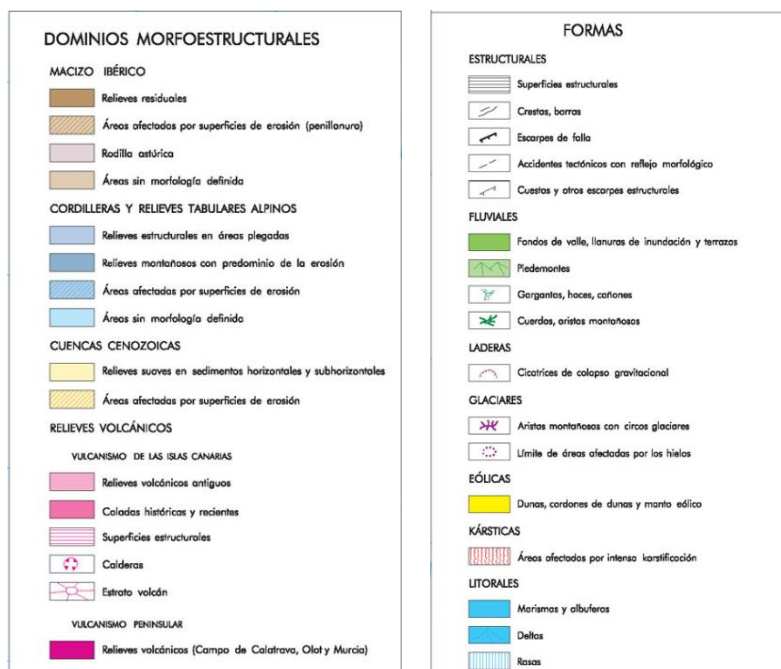
### 2.6.2.3 Riesgo Geomorfológico

Según el IGN, la geomorfología es la “rama de la geografía y de la geología que se ocupa del estudio del relieve terrestre: su origen, evolución, modelado y formas que presenta en la superficie terrestre”. Teniendo en cuenta lo anterior, un riesgo geomorfológico es aquel relacionado con los procesos que actúan sobre las formas de la superficie terrestre como deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas o erosión.

El IGN ha desarrollado un mapa geomorfológico de España que se presenta en la Figura 13, en el cual se pueden identificar las principales zonas geomorfológicas y sus características. Las zonas geomorfológicas predominantes son:

- Cordilleras Relieves estructurales en áreas plegadas (color azul): son zonas con pliegues anticlinales (montañas o cordilleras) o sinclinales (valles o llanuras). Tienen pendientes desde moderadas (10% -20%) hasta muy fuertes (30-50%)
- Relieves residuales (color marrón): Son superficies que han resistido los procesos erosivos por tener capas duras de suelo, en la mayoría de los casos, tienen capas de roca subyacentes. Tienen pendientes desde llanas (<3%) hasta fuertes (20-30%).
- Relieves suaves en sedimentos horizontales y subhorizontales (color amarillo): Se caracterizan por tener pendientes llanas (<3%) hasta fuertes (10-20%), de baja altitud y origen sedimentario con suelos finos como arcillas y limos.
- Fondos de valle, llanuras de inundación y terrazas (color verde): Estas zonas están atravesadas por un río o arroyo, son de relieve predominantemente suave (3-10%) a llano (<3%).
- En la zona de las Islas Canarias se encuentran zonas de relieves volcánicos antiguos con pendientes moderadas a muy fuertes. Hay presencia de actividad volcánica histórica, con erupciones de intensidad moderada a baja, lo que genera condiciones geomorfológicas y geotécnicas especiales.





**Figura 13 Mapa Geomorfológico de España**

Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Atlas Nacional de España. 2003

[https://atlasnacional.ign.es/images/3/34/Espana\\_Mapa-geomorfológico\\_2003\\_mapa\\_13507\\_spa.jpg](https://atlasnacional.ign.es/images/3/34/Espana_Mapa-geomorfológico_2003_mapa_13507_spa.jpg)

Las zonas geomorfológicas están directamente relacionadas con sus riesgos geomorfológicos asociados a los procesos que ocurren en cada una. Los deslizamientos en ladera a nivel regional se detectan en el mapa geomorfológico como escarpes de falla (desniveles del terreno causados por un deslizamiento o movimiento del terreno), principalmente en las zonas de relieves residuales (color café) y en la costa mediterránea de relieves estructurales. En cuanto a la erosión del terreno, se presenta en las tres principales zonas geomorfológicas de España, en proporciones similares.

#### 2.6.2.4 Riesgo por Condiciones Desfavorables del Perfil de Suelo

A partir del análisis del Mapa Geotécnico General a escala 1:200.000 desarrollado por el IGME, se identificaron las causas por las cuales se clasificaron las condiciones constructivas como “desfavorables” o “muy desfavorables” en algunas zonas del país (ver Anexo 1). Las siguientes son las principales causas asociadas a condiciones desfavorables propias del perfil, y que a su vez pueden asociarse a posibles riesgos para un proyecto:

- Capacidad de carga: El IGME ha clasificado los suelos en España según la magnitud de la capacidad de carga obtenida a partir de alguno de los métodos planteados por el Eurocódigo 7 y los parámetros mecánicos del terreno obtenidos mediante exploración geotécnica. La capacidad portante se clasifica de la siguiente manera:
  - Muy baja:  $< 2 \text{ kg/cm}^2$
  - Baja:  $2 - 4 \text{ kg/cm}^2$
  - Media:  $4 - 8 \text{ kg/cm}^2$
  - Alta:  $8 - 16 \text{ kg/cm}^2$
  - Muy alta:  $> 16 \text{ kg/cm}^2$

Las capacidades de carga bajas o muy bajas pueden tener riesgos asociados durante un proyecto de obra civil como daños graves en la estructura.

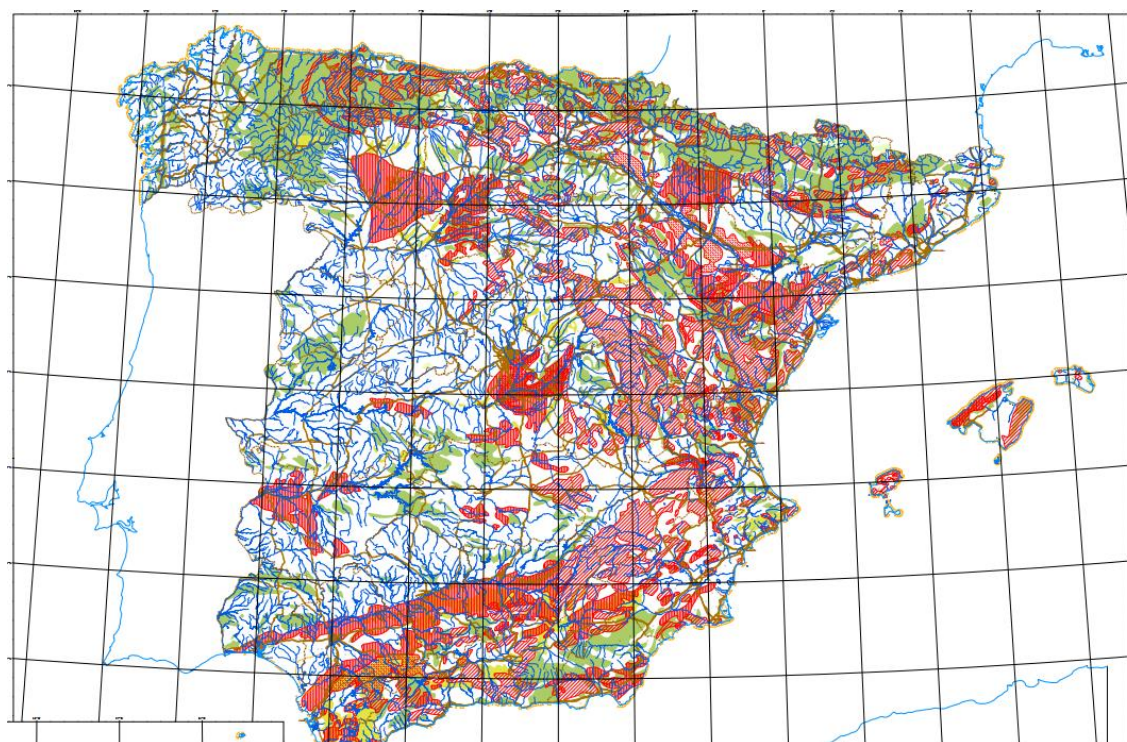
- Desplazamientos del terreno (asentamientos o hinchamientos): El asentamiento admisible de una estructura estará determinado por sus propias características y requerimientos

funcionales. En geotecnia, es necesario contemplar en el diseño que los desplazamientos se dan a largo y/o a corto plazo dependiendo de las características del terreno.

En España, uno de los principales problemas relacionados con desplazamientos del terreno es la presencia de arcillas expansivas, que son materiales que potencialmente cambian de volumen por cambios de humedad, generando daños en las cimentaciones de las estructuras. El IGME ha desarrollado un mapa predictor del riesgo por expansividad de arcillas en España (IGME, 1986) en el cual, a partir de índices de características del perfil de suelo, se evalúa el potencial expansivo y la presión de hinchamiento que pueden producir las arcillas en diferentes zonas. Las zonas de color rojo presentadas en la Figura 14, se identifican como de expansividad por arcillas.

Este riesgo se ha clasificado como alto o muy alto en la zona sur de Sierra Morena, recorriendo las provincias de Huelva, Sevilla, Córdoba y Jaén. También al sur de Madrid y por la zona central de la Comunidad Autónoma de Murcia.

- Estabilidad del terreno: En este numeral el riesgo por estabilidad el terreno se refiere únicamente a deslizamientos que no han sido causados por movimientos de tierra del proyecto (modificaciones geomorfológicas para la implantación del proyecto). Es decir, a deslizamientos que se producen en la geomorfología del terreno por procesos naturales. En España, el IGME ha identificado los siguientes procesos relacionados con el tipo de material:
  - Áreas con movimientos actuales y/o potenciales, principalmente deslizamientos en formaciones blandas
  - Áreas con movimientos actuales y/o potenciales, principalmente desprendimientos en formaciones rocosas
  - Áreas con movimientos actuales y/o potenciales tipo deslizamiento y/o desprendimiento.





MOVIMIENTOS DE COMPONENTE EN ZONAS CONTINENTALES		
TIPO DE MOVIMIENTO	PROCESOS Y MATERIAL RELACIONADO	
Áreas con movimientos actuales y/o potenciales, principalmente deslizamientos en formaciones blandas		
Áreas con movimientos actuales y/o potenciales, principalmente desprendimientos en formaciones rocosas		
Áreas con movimientos actuales y/o potenciales tipo deslizamiento y/o desprendimiento		
	Dunas móviles	
	Depositos morreniicos	

MOVIMIENTOS DE COMPONENTE VERTICAL EN ZONAS CONTINENTALES		
TIPO DE MOVIMIENTO	PROCESOS Y MATERIAL RELACIONADO	
Áreas con hundimientos karsticos actuales y/o potenciales		
carbonatados		
yesíferos		
conglomeraticos		
Áreas con expansividad actual y/o potencial por arcillas		
	Diapiros	
	Procesos halocineticos	

**Figura 14 Mapa de Deslizamientos de España**

Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Atlas Nacional de España. 1987

En la zona norte del país, comunidades autónomas de Galicia, Asturias y Castilla y León, así como en la zona de la frontera con Francia (Pirineo), se han presentado históricamente deslizamientos y desprendimientos. En la zona sur del país también se han presentado deslizamientos, predominantemente en formaciones blandas del terreno.

### 2.6.3 Riesgos Propios del Diseño

Se refieren a los riesgos geotécnicos cuya causa principal recae en las consideraciones de diseño, que pueden no reflejar adecuadamente la realidad del proyecto durante las etapas siguientes. Como se analizó en el numeral 2.2, los elementos del Triángulo de Burland permiten identificar los riesgos asociados al diseño:

#### 2.6.3.1 Perfil del Terreno

Los siguientes son los principales riesgos identificados al no tener suficiente conocimiento del perfil del terreno.

- Exploración geotécnica insuficiente
- Variabilidad espacial no identificada del perfil
- Anomalías en el perfil como bloques de roca o lentes de materiales blandos
- Variabilidad en el nivel de agua subterránea

#### 2.6.3.2 Comportamiento del Terreno

Los siguientes riesgos se consideran comunes a la hora de caracterizar el comportamiento del terreno:

- Elección de parámetros de suelo no representativos
- Interpretación errada de los datos de ensayos y mediciones en campo
- Uso de correlaciones no adecuadas para el tipo de suelo
- Suelos con comportamientos especiales no identificados como arcillas expansivas o cenizas volcánicas.

#### 2.6.3.3 Modelo del Terreno

Con respecto al modelo de análisis utilizado durante el diseño, se pueden presentar los siguientes riesgos:

- Uso de un modelo no representativo del terreno: por su geometría, amplitud, metodología de cálculo entre otros.
- Uso de un modelo de menor complejidad: lo que impediría evaluar condiciones importantes para el proyecto

- Uso de un modelo de complejidad superior a la requerida: implicaría invertir mayores recursos a los requeridos para la complejidad del problema geotécnico.

#### **2.6.4 Riesgos Propios de la Construcción**

Durante el proceso constructivo es importante que un geotecnista y/o geólogo evalúe si las características y el comportamiento del terreno corresponden a los planteamientos del diseño. En especial, para las etapas del proceso constructivo como excavaciones, conformación de taludes temporales y aplicación de cargas de maquinaria de construcción, es necesario evaluar la necesidad de incluir obras de protección y establecer si los mecanismos de falla son dúctiles o frágiles para tener un monitoreo y control adecuados.

La norma UNE-EN 1997-1, 2.1 y 2.7 introduce el método observacional durante la construcción cuando no exista un colapso frágil o súbito, aplicando los siguientes requisitos previos al inicio de la construcción:

- Establecer límites admisibles de comportamiento
- Evaluar un rango de comportamiento del terreno con alta probabilidad de ocurrencia
- Establecer un programa de instrumentación y control geotécnico
- Establecer respuestas a riesgos y sus tiempos oportunos

A continuación, se nombran las actividades geotécnicas presentes en la mayoría de los proyectos civiles y sus riesgos asociados.

##### **2.6.4.1 Excavaciones Temporales**

Los riesgos asociados a excavaciones temporales radican en la posibilidad de que ocurra alguno de los siguientes fenómenos:

- Colapso de las paredes de la excavación
- Falla de fondo de la excavación
- Entrada de agua por nivel freático o precipitaciones
- Daños a propiedades vecinas o a infraestructura enterrada

En España, la norma UNE-EN 13331:2002 presenta recomendaciones sobre sistemas de soporte lateral en excavaciones temporales. La necesidad de estos sistemas depende de la recomendación geotécnica teniendo en cuenta la profundidad de excavación, el tipo de suelo y las estructuras cercanas a la excavación.

##### **2.6.4.2 Taludes Temporales y Permanentes**

El principal riesgo de los taludes en obra es un deslizamiento (en suelos) o desprendimiento (en rocas) causados por factores como la geometría del talud (inclinación y altura), las propiedades del suelo, la saturación del terreno y las sobrecargas o vibraciones alrededor. Los siguientes riesgos son posibles durante la construcción de taludes y están directamente relacionados con las consideraciones de diseño:

- Deslizamiento de taludes temporales por sobrecargas
- Deslizamiento por lluvias o saturación del terreno
- Fallo del sistema de contención

##### **2.6.4.3 Desplazamientos del Terreno por Aplicación de Cargas Durante Construcción**

Durante la etapa de construcción, el terreno estará sometido a sobrecargas por peso de maquinaria y equipos, vibraciones y peso de materiales en zonas de acopio entre otras. Estas cargas de instalación deberán ser consideradas en el diseño geotécnico para evitar la ocurrencia de los siguientes riesgos:

- Asentamientos en zonas de grúas o maquinaria pesada
- Falla del terreno por exceso de cargas durante la instalación

### **2.6.5 Riesgos Durante Operación**

Son eventos que amenazan el funcionamiento del proyecto una vez ha finalizado la etapa de construcción. La responsabilidad de la gestión de riesgos, la reducción de los riesgos transferidos durante las etapas anteriores a niveles aceptables y la puesta en marcha de planes de mitigación dependerá el tipo de contrato establecido.

En España, el Ministerio de Hacienda en su Plataforma de Contratación del Sector Público, publica contratos con tipo de tramitación de “emergencia”, es decir, para situaciones donde las personas o los bienes están en peligro por la materialización de un riesgo. A partir de estos contratos, se ha identificado que, en los referentes a temas geotécnicos, la mayoría se refieren a problemas de estabilidad de taludes. Por lo tanto, se identifican los siguientes riesgos asociados a la etapa de operación:

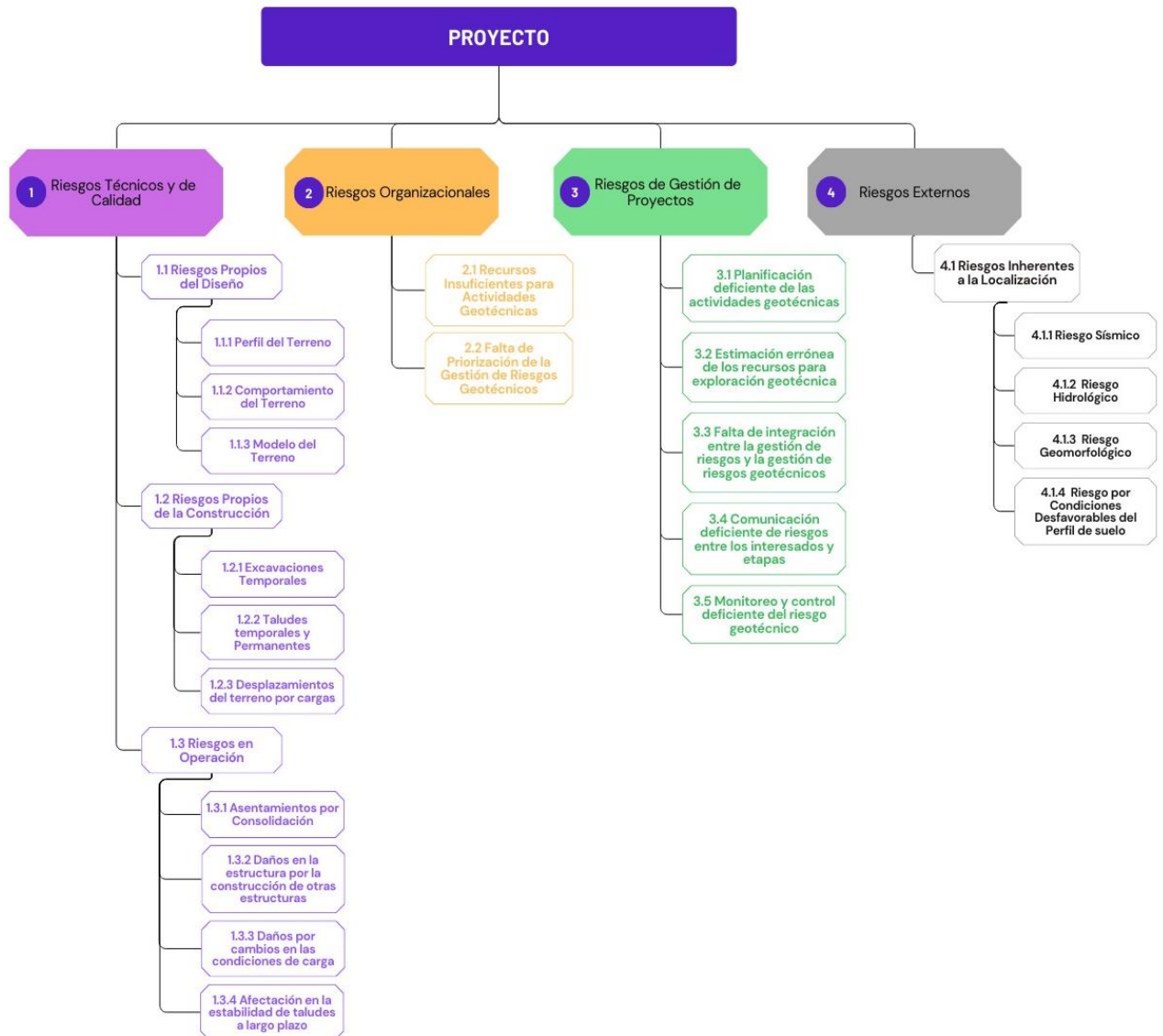
- Asentamientos por consolidación
- Daños en la estructura por eventos sísmicos
- Daños en la estructura por la construcción de otras estructuras
- Afectación en la estabilidad de taludes por cambios en las condiciones de carga
- Afectación en la estabilidad de taludes por eventos sísmicos
- Afectación en la estabilidad de taludes por saturación del terreno (daño o ausencia de obras de drenaje)

## **2.7 Estructura de Desglose del Riesgo Geotécnico en España**

A partir de la revisión de documentación reflejada en los apartados anteriores de este capítulo, se utilizará la Estructura de Desglose del Riesgo (EDR) como herramienta para agrupar los riesgos generales de un proyecto y ubicar al interior de esta estructura los riesgos geotécnicos. La RBS clasifica los riesgos teniendo en cuenta la posición jerárquica de las posibles fuentes de riesgo y cada subnivel es una definición más detallada del riesgo.

El Project Management Institute recomienda categorizar los riesgos desde la etapa de planificación de la gestión del riesgo. En la Figura 15 se presentan algunas categorías recomendadas en el PMBOK (6 Edición, 2017) para la gestión en riesgos, con una modificación para este estudio ubicando dentro de cada categoría los riesgos geotécnicos del proyecto que se han analizado en los apartados anteriores, con el fin de categorizarlos y mostrar la integración de la gestión de riesgos geotécnicos con la GR del proyecto.

Esta EDR geotécnica facilita el proceso de identificación de riesgos para un proyecto particular y puede servir como una lista de chequeo en los procesos de gestión de riesgos. Adicionalmente, esta lista permite asignar un dueño del riesgo dependiendo del tipo de contrato y qué riesgos se pueden transferir entre diferentes etapas del proyecto.



**Figura 15 Estructura de Desglose del Riesgo Geotécnico**

*Fuente: Elaboración Propia- Basada en PMBOK (6 Edición, 2017)*

A partir de esta estructura y del desarrollo de los capítulos anteriores, se incluye un nivel más de desglose de los riesgos geotécnicos en algunos casos. Cabe resaltar que en esta EDR solo se incluyen los posibles riesgos geotécnicos del proyecto al interior de las categorías, por lo tanto, en un proceso de gestión de proyectos es posible encontrar un mayor nivel de desglose que el presentado en la Tabla 2.

Tabla 2 EDR con Desglose de Riesgos Geotécnicos

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		Nivel 4	
1	Riesgos Técnicos y de Calidad	1.1	Riesgos Propios del Diseño	1.1.1	Perfil del Terreno	1.1.1.1	Exploración geotécnica insuficiente
						1.1.1.2	Variabilidad espacial no identificada del perfil
						1.1.1.3	Anomalías en el perfil como bloques de roca o materiales blandos
						1.1.1.4	Variabilidad del nivel de agua subterránea no considerada en el diseño
				1.1.2	Comportamiento del terreno	1.1.2.1	Elección de parámetros del suelo no representativos
						1.1.2.2	Interpretación errada de los datos de ensayos y mediciones en campo
						1.1.2.3	Uso de correlaciones no adecuadas para el tipo de suelo
						1.1.2.4	Suelos con comportamientos especiales no identificados como arcillas expansivas o cenizas volcánicas
		1.1.3	Modelo del terreno	1.1.3.1	Uso de un modelo no representativo del terreno: por su geometría, amplitud, metodología de cálculo entre otros.		
		1.2	Riesgos Propios de la Construcción	1.2.1	Excavaciones temporales	1.2.1.1	Colapso de las paredes de la excavación

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		Nivel 4	
						1.2.1.2	Falla de fondo de la excavación
						1.2.1.3	Entrada de agua por nivel freático o precipitaciones
						1.2.1.4	Daños a propiedades vecinas o a infraestructura enterrada
						1.2.2.1	Deslizamiento de taludes temporales por sobrecargas
				1.2.2.2	Deslizamiento por lluvias o saturación del terreno		
				1.2.2.3	Fallo del sistema de contención		
		1.2.3	Desplazamientos del terreno por cargas durante construcción	1.2.3.1	Asentamientos en zonas de grúas o maquinaria pesada		
		1.3	Riesgos durante operación	1.3.1	Asentamientos por consolidación		
				1.3.2	Daños en la estructura por la construcción de otras estructuras		
				1.3.3	Daños por cambios en las condiciones de carga		
1.3.4	Afectación en la estabilidad de taludes a largo plazo						
2	Riesgos Organizacionales	2.1	Recursos insuficientes para actividades geotécnicas				
		2.2	Falta de priorización de la gestión de riesgos geotécnicos				
3	Riesgos de Gestión de Proyectos	3.1	Planificación deficiente de las actividades geotécnicas				
		3.2	Estimación errónea de los recursos para exploración geotécnica				
		3.3	Falta de integración entre la gestión de riesgos del proyecto y la gestión de riesgos geotécnicos				

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		Nivel 4	
		3.4	Comunicación deficiente de riesgos entre los interesados y etapas				
		3.5	Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico				
4	Riesgos externos	4.1	Riesgos inherentes a la localización del proyecto	4.1.1	Riesgo Sísmico	4.1.1.1	Sismos de magnitud mayor a 4,0 (pueden producir daños moderados a severos en las estructuras)
						4.1.1.2	Sismos de magnitud menor a 4,0 (pueden producir daños leves en las estructuras)
				4.1.2	Riesgo Hidrológico	4.1.2.1	Inundaciones fluviales (causadas por ríos)
						4.1.2.2	Inundaciones pluviales (causadas por lluvias)
						4.1.2.3	Inundaciones marinas (mareas altas temporales)
				4.1.3	Riesgos Geomorfológicos	4.1.3.1	Erosión del terreno

Fuente: Elaboración Propia

### Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología de investigación utilizada para el estudio del impacto de los riesgos geotécnicos detallados en el Capítulo 2 de este estudio en España.

En la Fase 1 del estudio fue posible crear una EDR de los riesgos geotécnicos generales en España a partir de investigación bibliográfica. Además, se logró determinar los niveles de exposición a estos riesgos dependiendo de la localización del proyecto de acuerdo con mapas que caracterizan el territorio. El siguiente diagrama de flujo representa los procesos que se realizaron en la Fase 1.

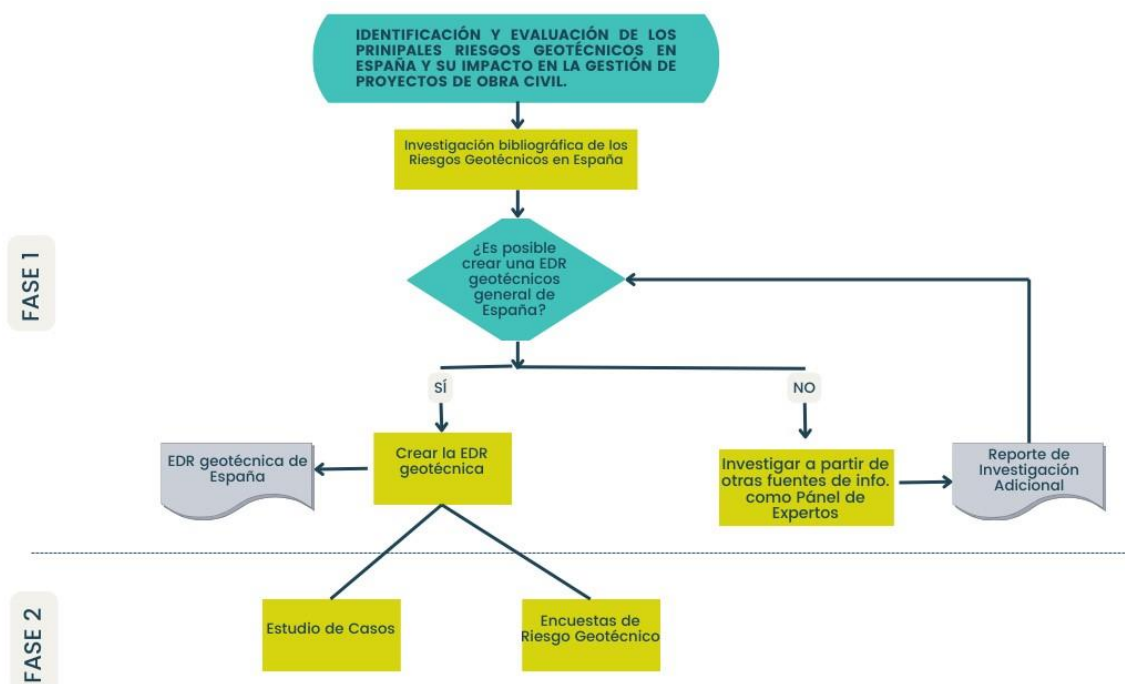


Figura 16 Diagrama de flujo de los procesos de investigación de la Fase 1

Fuente: Elaboración Propia

En la Fase 2, se hizo un estudio de casos en los cuales se han materializado uno o varios riesgos geotécnicos a lo largo de las etapas del proyecto y permite plantear posibles acciones correctivas que se pudieron realizar para mitigar el impacto de los riesgos o prevenir su ocurrencia.

Por otra parte, se describe la metodología para el planteamiento de una encuesta que permitirá clasificar los riesgos y hacer un análisis cualitativo para crear una matriz de probabilidad-impacto de los riesgos geotécnicos en España.

Los procesos de la segunda fase de la investigación se representan en la Figura 17 como continuación al diagrama de flujo anterior.



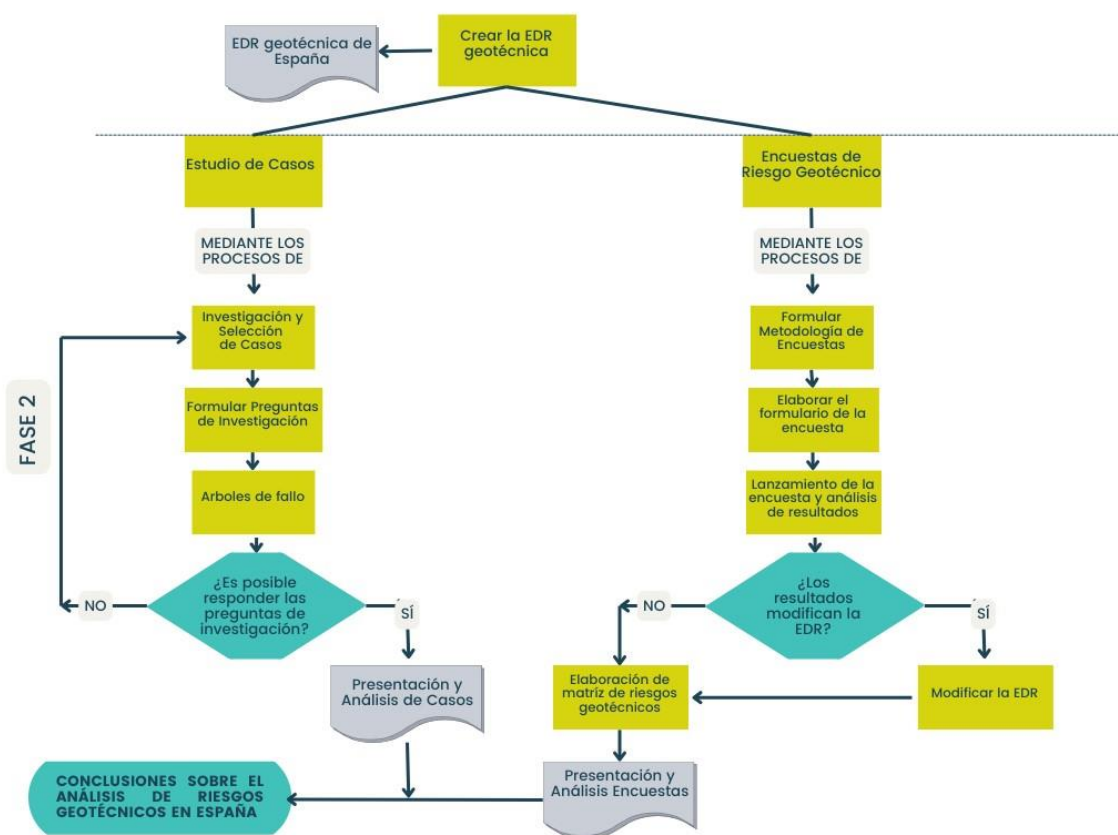


Figura 17 Diagrama de flujo de los procesos de investigación de la Fase 2

Fuente: Elaboración Propia

En los siguientes numerales se describe la metodología que se siguió en cada uno de los procesos de investigación.

### 3.1 Investigación de Casos de Estudio

En este estudio se seguirá la metodología planteada por Robert Stake, Catedrático de Educación y director del *Center for Instructional Research and Curriculum Evaluation* (CIRCE) de la Universidad de Illinois.

Los estudios de casos se pueden clasificar bajo diferentes criterios según el objetivo que se quiere alcanzar (Stake, 1998). Cuando el fin es investigativo, el estudio de casos se puede ser: explicativo, exploratorio o descriptivo. Un estudio de casos investigativo se enfoca en estudiar un suceso y se presenta en forma de narración, se subdivide en las siguientes categorías:

- El caso investigativo explicativo es aquel cuya intención es encontrar las causas de un fenómeno.
- El caso investigativo descriptivo tiene como propósito examinar y caracterizar el fenómeno.
- El caso investigativo exploratorio busca tener una aproximación a un fenómeno no estudiado.

También se puede clasificar según el número de casos como simples o múltiples. Finalmente, será clasificado según su enfoque cuantitativo o cualitativo.

### 3.1.1 Selección de Casos

Para la selección de casos, se tuvo en cuenta que este estudio corresponde a un estudio de casos de tipo cualitativo, investigativo y explicativo. Además, es de tipo instrumental, entendiéndose que algunos casos servirán más para explicar el impacto de los riesgos geotécnicos en proyectos que otros. Se debe tener en cuenta que de acuerdo con Stake, la investigación de casos no corresponde a un estudio de muestras, ni permite la comprensión de otros casos ya que la gestión de riesgos es particular para cada proyecto.

Se elegirán dos casos en los cuales se presente mayor materialización de riesgos geotécnicos con diversas causas y en diferentes etapas del proyecto. El objetivo será reflejar su impacto, resaltar la importancia de la gestión de riesgos geotécnicos y su integración con la gestión de riesgos del proyecto.

Como criterios principales para la selección de casos se tuvieron en cuenta:

- **Ubicación:** Se busca que los casos seleccionados se encuentren en diferentes ambientes de España, con exposición a riesgos geotécnicos de acuerdo con lo identificado en el Capítulo 2.
- **Disponibilidad de Información:** Se eligen casos con disponibilidad de información pública de tipo técnico para identificar las características geotécnicas y los procesos de gestión del riesgo del proyecto.
- **Etapas del Proyecto:** Se seleccionan casos de proyectos que en la actualidad lleven algún tiempo en ejecución, es decir, hayan cumplido todas las etapas del ciclo de vida del proyecto inicial y se hayan materializado riesgos geotécnicos en una o varias de estas.
- **Complejidad del Proyecto:** Al elegirse un número limitado de casos, se busca que la complejidad geotécnica de la obra sea diversa, es decir, una obra de categoría geotécnica 1 y otra 3.

### 3.1.2 Preguntas de Investigación

Según la metodología propuesta por Stake, en el estudio de casos se pueden incluir una serie de preguntas o afirmaciones que se clasifican como informativas y temáticas. Las preguntas informativas son las que proporcionan un contexto y permiten tener datos relevantes del caso. Por otra parte, las preguntas temáticas son aquellas que ayudarán a estructurar la revisión de información y alinearla con los objetivos de la investigación. En ocasiones, estas preguntas evolucionan a medida que avanza el estudio de casos y se hacen más específicas.

En este estudio, las preguntas o afirmaciones informativas de cada caso serán:

- Nombre y fecha de ejecución del proyecto
- Localización del proyecto
- ¿Cuáles son los antecedentes y el objetivo del proyecto?
- Una descripción de la obra que se realizó
- ¿Cuáles son las características geológicas y geotécnicas de la zona del proyecto?
- Presupuesto y cronograma iniciales del proyecto

Las preguntas temáticas estarán dirigidas a cumplir los siguientes objetivos del proyecto:

- *Analizar la importancia de la identificación, evaluación y mitigación de los riesgos geotécnicos en un proyecto de ingeniería civil.*
  - ¿Qué procesos de identificación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?
  - ¿Qué procesos de evaluación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?
  - ¿Qué procesos de mitigación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?
  - ¿Qué relevancia se le dio a la gestión de riesgos en el caso de estudio?

- *Evaluar el impacto de los riesgos geotécnicos en las diferentes fases del proyecto (planificación, diseño, construcción y operación).*
  - ¿Qué riesgos geotécnicos se materializaron en qué etapas del proyecto?
  - ¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la planificación del proyecto?
  - ¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre el diseño del proyecto?
  - ¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la construcción del proyecto?
  - ¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la operación de la obra?
  
- *Proponer estrategias de mitigación y gestión de riesgos geotécnicos mediante la aplicación de medidas preventivas.*
  - ¿Como se pudo haber mejorado el proceso de identificación de riesgos geotécnicos?
  - ¿Cómo pudo mejorar el proceso de evaluación de riesgos geotécnicos?
  - ¿Qué tipo de monitoreo y control se pudo establecer en el proyecto para mitigar los riesgos geotécnicos?
  - Otras lecciones aprendidas del caso

Cabe destacar que las preguntas informativas y técnicas están encaminadas a la comprensión entre las relaciones causa y efecto que pudieron haberse presentado en los proyectos, por lo tanto, es de tipo cualitativo, y no pretende recopilar datos numéricos para dar explicaciones de este tipo.

### **3.1.3 Árboles de Fallo**

Para el análisis de riesgos en los casos de estudio se utilizarán árboles de fallo, una de las técnicas más comunes que se utilizan en la GR y en la Ingeniería Geotécnica Forense. Mediante este análisis se identifican los factores que han contribuido a la ocurrencia de un evento de forma deductiva, organizados de manera lógica en una gráfica de árbol (Hruškovič, 2011). Esta herramienta se utiliza para representar las fuentes de riesgos y los riesgos que se han materializado en los casos de estudio y servirá como base para la GR de proyectos con enfoques similares.

Se aplica un sistema “de arriba hacia abajo”, en el cual el evento en la parte superior es aquel riesgo que se ha materializado en el caso de estudio. Este debe ser específico, relevante y medible. En el nivel posterior se plasman las posibles causas del evento mediante investigación de las hipótesis realizadas en el caso de estudio. Estas causas pueden estar unidas por un conector de disyunción lógica “or” en el cual el suceso superior ocurre cuando se produce alguna de las causas, es decir, es excluyente, o el conector “and” que indica que el suceso superior ocurre cuando todas las causas han sucedido.

Cada causa del primer nivel será descompuesta hasta niveles inferiores para encontrar una posible causa raíz. En la Figura 18 se presenta un ejemplo de árbol de fallo realizado para la esclusa de un dique de protección. El fallo de la esclusa pudo ser causado por uno de los eventos del siguiente nivel (color verde), en este caso, por que la puerta se encontraba abierta. De esta manera se va descomponiendo el evento hasta llegar a su causa o causas raíz.

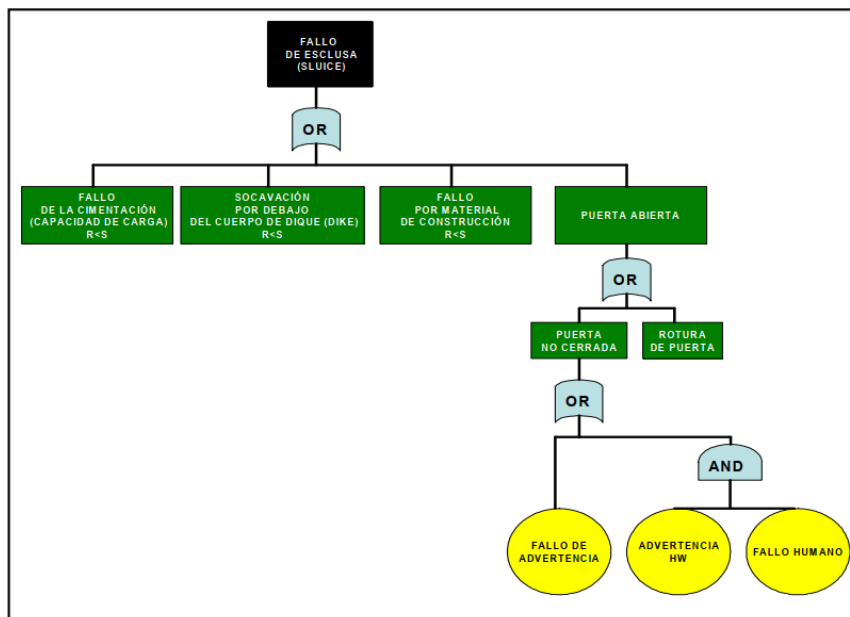


Figura 18 Ejemplo de Árbol de Fallo de una Esclusa

Fuente: (Hruškovič, 2011)

### 3.2 Criterios para la Elaboración de Encuestas de Riesgo Geotécnico

Con el fin de analizar a profundidad los riesgos geotécnicos y complementar la EDR con la identificación de otros posibles riesgos, se elaboran encuestas encaminadas a determinar la probabilidad y el impacto que tienen los riesgos geotécnicos en un proyecto de obra civil en España.

En la encuesta se plantearán los riesgos geotécnicos determinados en le EDR del capítulo anterior y se pedirá al encuestado clasificar, de acuerdo con su experiencia en las diferentes fases de los proyectos de obra civil, la probabilidad y el impacto que tiene la materialización de diferentes riesgos geotécnicos mediante escalas de Likert.

#### 3.2.1 Escalas de Likert en Encuestas

Las escalas de valor de Likert son aquellas utilizadas para la evaluación estadística de la percepción de un grupo muestral sobre una variable cualitativa (Ángela Guadalupe Canto de Gante et al., 2020). Fueron desarrolladas en 1932 por Rensis Likert y todavía es un método ampliamente usado para medir la percepción humanada.

La escala de Likert que se utilizó como herramienta de análisis cualitativo del riesgo geotécnico con escalas de 1 a 5 para definir su probabilidad de ocurrencia y el impacto sobre el proyecto. En la Tabla 3 se presenta la escala utilizada para medir la probabilidad de ocurrencia.

Tabla 3 Escala de Probabilidad de Ocurrencia

	Muy Baja < 10%	Baja 11-30%	Media 31-50%	Alta 51-70%	Muy Alta 71-90%
Probabilidad de Ocurrencia	No ha ocurrido en los proyectos que ha conocido	Ha ocurrido algunas veces	Se espera que ocurra durante el proyecto	Ocurre algunas veces en el proyecto	Ocurre varias veces en el proyecto

En la Tabla 4 se presenta la escala de impacto con respecto a diferentes áreas del proyecto. Se tomarán como más representativas para el caso de los riesgos: el coste y el cronograma.

Tabla 4 Escala de Impacto

Área de Impacto	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Costos (% del coste del proyecto)	1%-5%	5%-10%	10%-30%	30%-50%	>50 %
Cronograma	Menos de 1 semana	Entre 1 y 2 semanas	De 2 semanas a 1 mes	Entre 1 y 2 meses	Más de 2 meses

Estas escalas dependerán en gran medida de la organización y su actitud frente al riesgo. Sin embargo, se hace un esfuerzo por hacerlas aplicables a varios tipos de proyecto con el fin de crear una matriz de probabilidad-impacto de riesgos geotécnicos que sea general.

### 3.2.2 Muestreo y Nivel de Confianza

Quienes participen en la encuesta deberán estimar, según su experiencia profesional, cuál o cuales riesgos geotécnicos de los que se han identificado son los que tienen mayor probabilidad de ocurrencia y mayor impacto en los proyectos. Adicionalmente, se busca que los encuestados identifiquen otros riesgos geotécnicos que hayan ocurrido durante su experiencia profesional y sus correspondientes escalas de probabilidad e impacto.

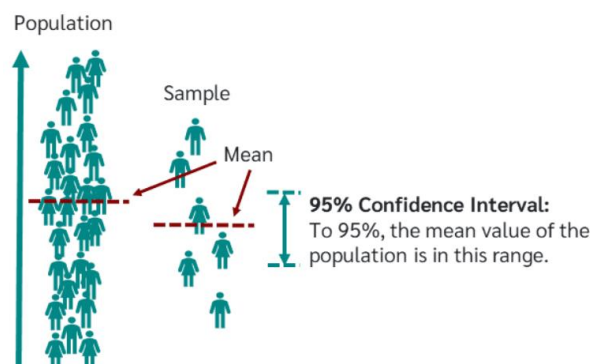
**Población:** Se busca obtener una muestra representativa de la población de personas que trabajan o han trabajado en proyectos de ingeniería civil, con implicación directa en las etapas de diseño, construcción y/u operación en España

**Técnica de Muestreo:** Los muestreos pueden ser probabilísticos o no probabilísticos. En este caso, se va a realizar un muestreo no probabilístico ya que no todos los sujetos tienen la misma probabilidad de ser elegidos. Se busca seleccionar individuos con amplio conocimiento de proyectos de obra civil, con el fin de tomar su opinión como fundamental para el desarrollo de la matriz.

Teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo y recursos de esta investigación cualitativa, se llevará a cabo un muestreo por conveniencia, es decir, se seleccionan las fuentes de información disponibles para el investigador como compañeros de trabajo, de estudio y personas a quien ellos puedan compartir la encuesta. Con el fin de evitar un sesgo de muestreo, se busca diversificar los roles que desempeñaron los encuestados en los proyectos de obra civil.

**Error Muestral:** Corresponde al margen de error que la investigación acepta en cuanto a representatividad de la muestra seleccionada. Para esto, se define un intervalo de confianza en el cual es muy probable que se encuentre el valor medio del resultado de la encuesta para cada riesgo geotécnico, que habitualmente es del 95% en una distribución normal con un valor del nivel de confianza Z de 1,96. En la Figura 19 se presenta una explicación del intervalo de confianza en el cual se espera que se encuentre el valor medio para la población seleccionada.

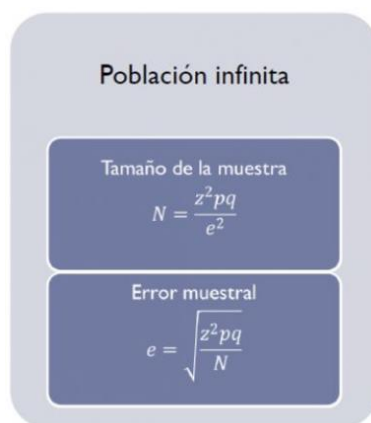
Según informes del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas, en el 2022 España contaba con 750.000 profesionales de la ingeniería, es decir, 15,7 ingenieros/as por cada 1000 habitantes. Esto permite concluir que la muestra de ingenieros que han participado en procesos de diseño, construcción y/u operación de obras civiles es mayor a 30.000 por lo que se debe tratar como una población infinita.



**Figura 19 Explicación del Intervalo de Confianza**

*Fuente: DATAtab Team, 2023*

Teniendo en cuenta las formulaciones para una muestra de población infinita que se muestran en la Figura 20, para el nivel de confianza del 95% y la mayor varianza posible  $p=q=50\%$ , se obtiene un tamaño de muestra de 96 respuestas.



**Figura 20 Error Muestral**

*Fuente: (Víctor Yepes Piqueras, 2021)*

Para reducir el error muestral del 10% obtenido, el objetivo fue realizar 100 encuestas teniendo en cuenta (Víctor Yepes Piqueras, 2021) que la muestra sea representativa de la población a estudiar.

Sin embargo, al lanzar las encuestas a todos los profesionales posibles, se obtuvieron en total 68 cuestionarios respondidos. Por lo tanto, el error muestral es del 11,9%.

### 3.2.3 *Diseño del Cuestionario*

Para evitar el error por sesgo de observación de datos y lograr conclusiones confiables, se diseña un cuestionario que tenga las siguientes características:

- Permita identificar la percepción del encuestado en cuanto a las variables involucradas. En este caso, las variables son la probabilidad y el impacto de cada riesgo según la experiencia del encuestado.
- Permita caracterizar a las personas que hagan la encuesta con datos específicos como edad, tiempo de experiencia profesional, tipo de experiencia (en diseño, construcción, mantenimiento u operación), entre otros.
- Permita relacionar la percepción del riesgo del encuestado con su experiencia en diferentes Comunidades Autónomas y su experiencia profesional.

Para la construcción del cuestionario se formula una instrucción suficientemente clara que indique cómo se utilizarán las escalas y a continuación una serie de proposiciones que se relacionan directamente con el último nivel de riesgos determinado en la EDR de la Tabla 2. Se simplificaron los riesgos de la EDT al máximo teniendo en cuenta que, a pesar de su ocurrencia en diferentes fases del proyecto, las consecuencias son similares. Esta simplificación se hizo para evitar que el encuestado pierda interés y la encuesta pierda fiabilidad.

La escala propuesta cubre un amplio rango de actitudes frente al riesgo del encuestado, desde muy optimistas hasta catastróficas.

A continuación, se presenta el cuestionario planteado para la encuesta:

### Encuesta Riesgos Geotécnicos en España

**Propósito:** El propósito de esta encuesta es conocer, de acuerdo con su experiencia profesional, la probabilidad de ocurrencia y el impacto de los riesgos geotécnicos en los proyectos de obra civil en España.

#### a) Datos del Encuestado:

1. Nombre:
2. Años de experiencia profesional:

<input type="checkbox"/>	1 a 5 años
<input type="checkbox"/>	5 a 10 años
<input type="checkbox"/>	10 a 20 años
<input type="checkbox"/>	Más de 20 años

3. ¿Cuál o cuáles de las siguientes opciones describe mejor su ocupación?

<input type="checkbox"/>	Ingeniero técnico
<input type="checkbox"/>	Arquitecto técnico
<input type="checkbox"/>	Gerente de proyectos
<input type="checkbox"/>	Jefe de obra
<input type="checkbox"/>	Personal en obra
<input type="checkbox"/>	Otro:

4. ¿En cuál o cuáles de las siguientes etapas de un proyecto ha participado?

<input type="checkbox"/>	Viabilidad de proyectos
<input type="checkbox"/>	Planificación de proyectos
<input type="checkbox"/>	Diseño
<input type="checkbox"/>	Construcción
<input type="checkbox"/>	Operación
<input type="checkbox"/>	Mantenimiento
<input type="checkbox"/>	Otro

5. ¿En cuál o cuáles de las siguientes Comunidades Autónomas de España ha desarrollado proyectos civiles?

	Andalucía		Extremadura
	Aragón		Galicia
	Principado de Asturias		Madrid
	Balears, Illes		Murcia
	Canarias		Navarra
	Cantabria		País Vasco
	Castilla y León		Rioja, La
	Castilla - La Mancha		Ceuta
	Cataluña		Melilla
	Comunitat Valenciana		

### b) Factores de Riesgo Geotécnico en España

Según su percepción del riesgo, por favor clasifique en una escala de 1 a 5 la probabilidad de ocurrencia de los siguientes factores de riesgo geotécnico teniendo en cuenta:

Para la probabilidad:

<b>1</b> Muy Baja < 10%	<b>2</b> Baja 11-30%	<b>3</b> Media 31-50%	<b>4</b> Alta 51-70%	<b>5</b> Muy Alta 71-90%
No ha ocurrido en los proyectos que ha conocido	Ha ocurrido algunas veces	Se espera que ocurra durante el proyecto	Ocurre algunas veces en el proyecto	Ocurre varias veces en el proyecto

Según su percepción del riesgo, por favor clasifique en una escala de 1 a 5 el impacto que tendría la ocurrencia del riesgo geotécnico sobre los costes y cronograma del proyecto:

Para el impacto:

Área de Impacto	<b>1</b> Muy Bajo	<b>2</b> Bajo	<b>3</b> Medio	<b>4</b> Alto	<b>5</b> Muy Alto
Costes (% del coste del proyecto)	1%-5%	5%-10%	20%-30%	30%-50%	>50 %
Cronograma	Menos de 1 semana	Entre 1 y 2 semanas	De 2 semanas a 1 mes	Entre 1 y 2 meses	Más de 2 meses

**Si la respuesta a la probabilidad es 1 Muy Baja, por favor no responda las columnas de impacto.**



		Probabilidad					Impacto en Costos					Impacto en Cronograma				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Riesgos Propios del Diseño	Exploración geotécnica insuficiente ( no cumple con normativa o no proporciona información suficiente del terreno)															
	Variabilidad espacial no identificada del perfil de suelo															
	Anomalías en el perfil como bloques de roca o materiales blandos															
	Variabilidad del nivel de agua subterránea no considerada en el diseño															
	Elección de parámetros del suelo no representativos para el diseño de las cimentaciones o taludes															
	Interpretación errada de los datos de ensayos y mediciones en campo															
	Uso de correlaciones no adecuadas para el tipo de suelo. Necesidad de revisión y/o repetición del estudio geotécnico															
	Suelos con comportamientos especiales no identificados como arcillas expansivas o cenizas volcánicas															
	Uso de un modelo geotécnico no representativo del terreno: por su geometría o metodología de cálculo entre otros.															
	Uso de un modelo geotécnico de menor complejidad: lo que impediría evaluar condiciones importantes para el proyecto															
Uso de un modelo de complejidad superior a la requerida																
Riesgos Durante Construcción	Colapso de las paredes de la excavación temporal durante obra															
	Falla de fondo de la excavación en obra															
	Entrada de agua a las excavaciones por nivel freático o precipitaciones															
	Daños a propiedades vecinas o a infraestructura enterrada															
	Deslizamiento de taludes temporales por sobrecargas de maquinaria o materiales															
	Deslizamiento de taludes por lluvias o saturación del terreno															
	Fallo del sistema de contención de taludes															
Riesgos Durante Operación	Asentamientos en zonas de grúas o maquinaria pesada															
	Asentamientos por consolidación ( a largo plazo)															
Riesgos Operación	Daños en la estructura por la construcción de otras estructuras															
	Daños por cambios en las condiciones de carga															
	Afectación en la estabilidad de taludes a largo plazo															
Riesgos Organizacionales	Recursos insuficientes para actividades geotécnicas															
	Falta de priorización de la gestión de riesgos geotécnicos															
Riesgos de Gestión de Proyectos	Planificación deficiente de las actividades geotécnicas															
	Estimación errónea de los recursos para exploración geotécnica															
	Falta de integración entre la gestión de riesgos del proyecto y la gestión de riesgos geotécnicos															
	Comunicación deficiente de riesgos entre los interesados y etapas															
	Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico															
Riesgos Inherentes a la Localización del Proyecto	Sismos de magnitud mayor a 4,0 ( pueden producir daños moderados a severos en las estructuras)															
	Sismos de magnitud menor a 4,0 ( pueden producir daños leves en las estructuras)															
	Inundaciones fluviales ( causadas por ríos)															
	Inundaciones pluviales (causadas por lluvias)															
	Inundaciones marinas (mareas altas temporales)															
Erosión del terreno																
OTROS																

Muchas gracias por su participación en la encuesta.

## Capítulo 4. Presentación y Análisis de Casos de Estudio

En este capítulo se desarrollarán los casos de estudio seleccionados según la metodología descrita en el Capítulo 3.

### 4.1 Ladera del Estribo Derecho de la Presa de Yesa

**Nombre del Proyecto Inicial:** Construcción del Embalse de Yesa

**Fecha de Ejecución:** El proyecto inicial se ejecutó en 1928 y se inauguró en 1960, desde entonces se han venido realizando obras adicionales.

**Localización:** El embalse y la presa de Yesa se localizan en la zona del Prepirineo, ubicada en la población de Navarra de Yesa, España. Se encuentra en la zona noroeste de la provincia de Zaragoza y se forma por el represamiento del río Aragón.

#### 4.1.1 Antecedentes

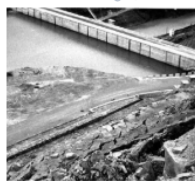
La presa de Yesa (río Aragón) ha presentado, desde su construcción finalizada en 1933, problemas geotécnicos y geológicos reflejados en la inestabilidad de las laderas sobre las que se apoyan los estribos derecho e izquierdo de la presa.

En el 2001 se inician obras de recrecimiento de la presa a pesar de los problemas geológicos y geotécnicos que se han presentado. Las obras de recrecimiento y las múltiples reparaciones que se han tenido que realizar en las laderas se han extendido hasta la actualidad.

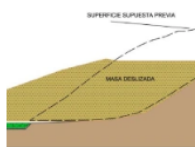
En la Figura 21 se presentan los sucesos históricos de mayor relevancia para el proyecto y un valor estimado de las obras que se han tenido que realizar tras la ocurrencia de varios riesgos geotécnicos.



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013

#### 1933

En 1912 se redacta el proyecto para la construcción del embalse de Yesa. Se inician las obras en 1928, pero en 1933 se rescinde el contrato por la caída de la ladera derecha a la altura del estribo donde se estaba excavando.

#### 1935

Se realizan labores de saneamiento y descalce de la ladera sin mejora de los problemas geológicos. Por ello, se redacta un segundo proyecto de menor envergadura que el original y se continúa con la obra.

#### 1958

La zona donde se ubican los aliviaderos presentan inestabilidad en el terreno, obligando así a realizar mejoras en la cimentación. El contrato ascendió a 1,485.000 pesetas, lo que supone alrededor de 3,5 millones de euros en 2024.

#### 1960

Se realiza el llenado y desembalse, lo que provoca una reactivación del deslizamiento de 1930, obligando a reconstruir una carretera en la ladera. Se colocan desmontes y abancalamientos para corregir los deslizamientos.

#### 1964

Unas fuertes lluvias vuelven a generar el mismo deslizamiento de 1930 y 1960, produciendo un derrumbe de la ladera y los abancalamientos no son capaces de soportar el movimiento.



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013

## 1999

En 1983 se baraja la idea de ampliar la presa, y en 1993 se genera un informe advirtiendo del peligro que conlleva, sobre todo en la ladera izquierda. En 1999 se saca a concurso la nueva obra de ampliación sin realizar ningún estudio geológico ni sísmico pese a las advertencias de técnicos de entidades educativas públicas.

## 2001

Se inicia la obra de recrecimiento con una duración de 5 años y un presupuesto de 113 millones de euros.

## 2003/2004

En 2003, la excavación del estribo de la ladera izquierda produce grandes grietas así como deslizamientos en capas, y, en 2004, la excavación del talud de la ladera derecha reactiva el deslizamiento de 1930 y 1964. El presupuesto asciende a 177 millones de euros.

## 2006/2007

Un vertedero de materiales provoca un nuevo deslizamiento de cerca de 3,5 millones de metros cúbicos hacia el vaso del embalse así como generación de nuevas grietas. El presupuesto supera los 315 millones de euros.

## 2007

Se decide someter el recrecimiento de Yesa a una evaluación de impacto ambiental. Ese mismo año, se reactivan las grietas y deslizamientos de 2006. Es por ello que se paran las obras y se encargan estudios geológicos.

## 2008

Las lluvias causan el desprendimiento del talud de un camino de la margen izquierda de la ladera de Yesa. Debido a esto, se adjudican los trabajos para la elaboración de los Planes de Emergencia de Yesa.

## 2012

Se para la excavación por detectar movimientos de baja velocidad pero de grandes dimensiones en la margen derecha. Además, en 17 años de obras, los clavos de nivelación de la presa han ascendido 15 mm.

En el mes de noviembre sale adelante el Escenario O del Plan de Emergencia.

Entre los meses de diciembre y febrero del siguiente año, se rompen más de 6 inclinómetros debido al deslizamiento de la ladera.

El 21 de diciembre de 2012 se declara el estado 1 del Plan de Emergencias de la presa de Yesa.



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013



Fuente: Río Aragón, 2013

## 2013

Fuertes lluvias generan deslizamientos de grandes dimensiones en la ladera donde se ubica el estribo derecho de la presa, provocando la evacuación de 60 viviendas por peligro de desprendimiento.

Se anuncia un incremento de 24 millones de euros, además de inyectarse 55 millones para corregir los deslizamientos, 25 millones para el plan de Emergencia, y 24 millones en concepto de expropiación y desalojo de viviendas, y 6,4 millones para derribo y acondicionamiento de viviendas en las urbanizaciones de Lasaitasuna y El Mirador de Yesa.

El presupuesto alcanza los 359 millones de euros.

## 2018

Se adjudican 6,5 millones de euros para el acondicionamiento de la ladera derecha de Yesa. El presupuesto llega a los 376 millones de euros hasta la fecha.

## 2021

Se termina la fase II del plan, y comienza la fase III y última Yesa, con 25 millones de euros en 2018, 30 en 2019 y 38 millones de euros en 2020 ampliados del presupuesto.

## 2023

Con una suma total de 458 millones de euros totales, se prevé la conclusión de las obras para 2027.

**Figura 21 Línea de Tiempo Embalse de Yesa**

*Fuente: Elaboración Propia*

### 4.1.2 Descripción de la obra

En la actualidad, el embalse de Yesa tiene un área superficial de 20,89 kilómetros cuadrados y un volumen de 466,09 hectómetros cúbicos. La presa de Yesa funciona como presa de gravedad de hormigón, con una altura de 76,5 m sobre los cimientos y una longitud de coronación de 398 metros.

Se creó para satisfacer la demanda de agua en diferentes pueblos y para regadío. Según la Confederación Hidrográfica del Ebro del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto

Demográfico de España, el embalse de Yesa se usa en la actualidad para: abastecer a la zona regable de Bardenas (en el Valle del Ebro) con un aproximado de 7 millones de metros cúbicos al año, abastecer a la ciudad de Zaragoza y ayuntamientos cercanos con 4,6 millones de metros cúbicos anuales y abastecer a la Mancomunidad de Servicios de Mairaga con casi 785.000 metros cúbicos de agua.

Antes del año 2001, la cota de la presa de Yesa era de 490 m. Posteriormente, en un proyecto que generó polémica en la población, el Ministerio de Medio Ambiente adjudicó a un grupo de constructoras las labores de recrecimiento de Yesa con un presupuesto inicial de 113 millones de euros y plazo de 5 años. El objetivo de este recrecimiento fue aumentar la cota de coronación de la presa hasta 520 m, multiplicando la capacidad de la presa. En la Figura 22 se presenta un esquema en planta y en perfil de las zonas de la presa y el embalse de Yesa. La zona de color rojo corresponde a la obra de recrecimiento iniciada en el 2001 y no concluida en su totalidad hasta la actualidad.

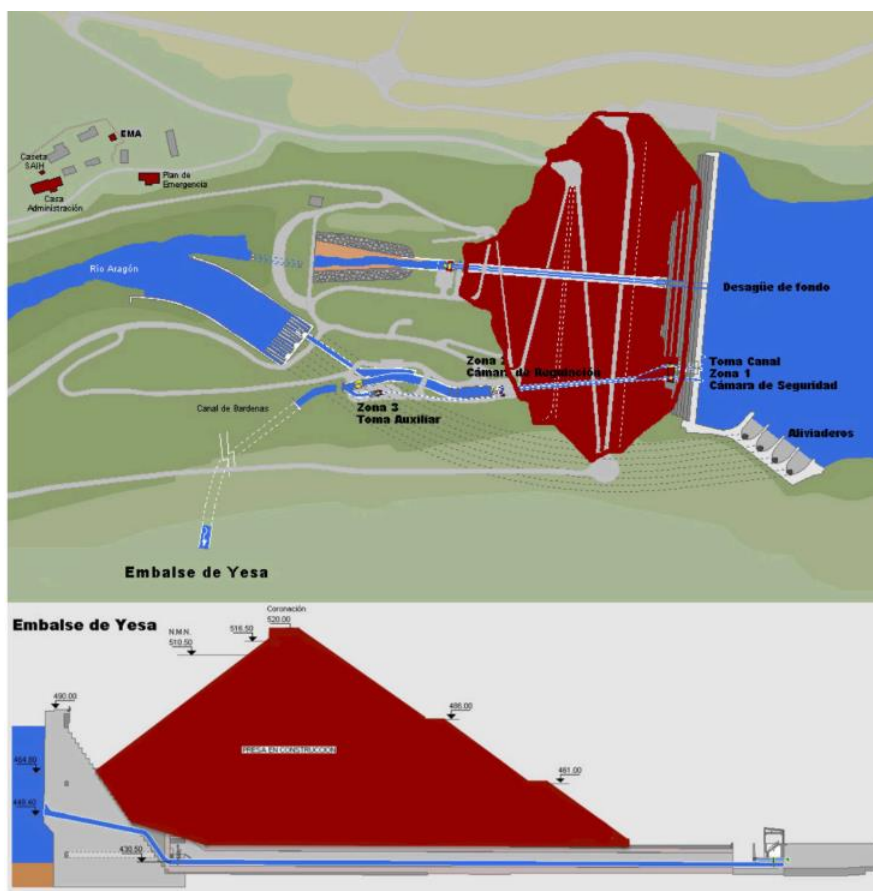


Figura 22 Vista planta y perfil de la presa de Yesa

Fuente: (Fnca, 2014)

De acuerdo con la normativa en materia de seguridad de presas, se ha clasificado a la presa y embalse de Yesa según el Real Decreto 264/2021 como Categoría A, es decir “Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto pueden afectar gravemente a núcleos urbanos o a servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes” (La Presidencia & Con Las Cortes Memoria Democrática, 2021). Pertener a la Categoría A hace obligatorio el desarrollo de un plan de emergencias que incluya:

- Estrategias de monitoreo y control de situaciones que puedan llevar a la rotura de la presa o averías graves.
- Estudio de inundabilidad de las áreas cercanas en caso de rotura o avería
- Normas que indiquen las actuaciones necesarias en casos de emergencia y la organización de recursos requerida para estas actuaciones.

### 4.1.3 Características Geológicas y Geotécnicas

Las laderas derecha e izquierda del embalse de Yesa se encuentran sobre la Formación de Arguis-Pamplona y sobre el flysch de Yesa. Estas formaciones están compuestas por un macizo rocoso y algunas capas de arenisca intercaladas. Se ha detectado que la ladera derecha presenta buzamientos a favor de la pendiente de la ladera, que traen como consecuencia muchos problemas de estabilidad, especialmente en los depósitos de flysch de gran espesor.

En la Figura 23 se presenta un perfil longitudinal característico de la ladera derecha, con la distribución de los materiales y la ubicación de los inclinómetros. Se observan principalmente dos unidades litológicas; en la base (color azul) se encuentran Margas de Pamplona y sobre esta se encuentran capas de la formación Flysch de Yesa (F1, F2 y F3). En la parte inferior de la ladera (color marrón oscuro) se observa el relleno construido para el recrecimiento de la presa seguido la denominada Superficie Principal de Rotura del deslizamiento de la ladera. En color violeta entre las dos formaciones geológicas principales, se encuentra una Superficie Inferior de Rotura, de mayor longitud y profundidad, que fue detectada por una grieta de tracción que se formó en la parte alta de la ladera.

Desde el 2012 se ha hecho evidente el deslizamiento acelerado de la ladera a partir de la lectura de 14 inclinómetros, grietas e importantes deformaciones en la parte superior de la cota de coronación de la presa. La Superficie Principal de Rotura delimita un volumen deslizado de aproximadamente 4 megametros cúbicos mientras que la Superficie Inferior de Rotura movilizaría un total de 12,6 Mm<sup>3</sup>, pero la superficie se conoce con menor certeza debido a su profundidad (Martínez-Bofill, 2013.).

Adicionalmente, aguas arriba de la presa se encuentra un deslizamiento roto-traslacional reactivado en el año 2013 llamado “El Inglés” en el sector del Mirador de Yesa. Este deslizamiento tiene un espesor aproximado de 30 m y generó el desalojo de 60 viviendas de las urbanizaciones Lasaitasuna y El Inglés.

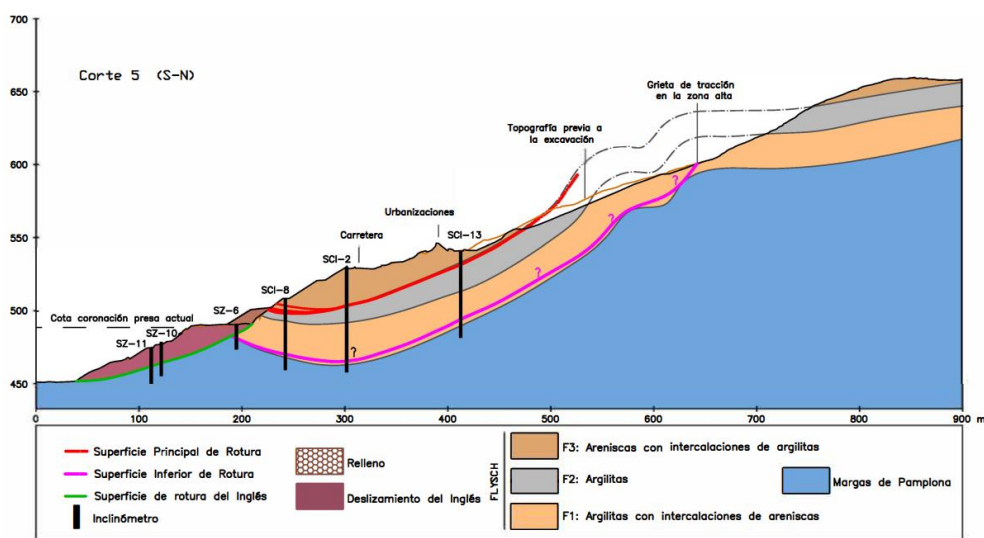


Figura 23 Perfil geológico de la ladera derecha, aguas arriba de la presa

Fuente: (Martínez-Bofill, 2013)

Durante 2013 fue necesaria la ejecución de proyectos de estabilización y demolición de las zonas de vivienda en el área delimitada en color verde (ver Figura 24).

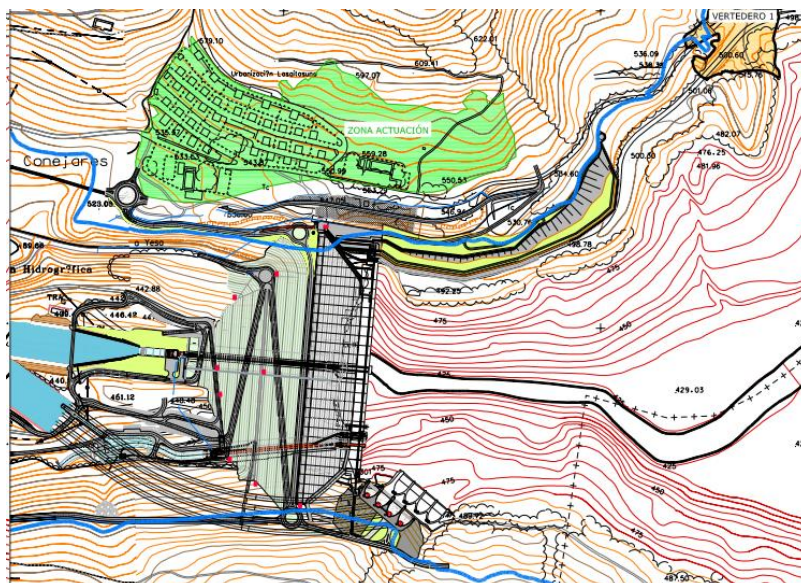


Figura 24 Zona de afectación deslizamientos ladera derecha

Fuente: (Acciona Ingeniería, 2013)

En el aspecto hidrogeológico, la ladera está conformada por materiales de permeabilidad alta y baja alternados, por lo que en ciertos sectores se generan presiones de agua elevadas que desestabilizan algunos estratos (Ayuntamiento de Sangüesa/Zangoza, 2023).

#### 4.1.4 Procesos de Gestión de Riesgos Geotécnicos

Para caracterizar los procesos de gestión de riesgos que se hicieron en el caso, a continuación, se responderán las preguntas de investigación planteadas:

- *¿Qué procesos de identificación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?*

Para este estudio no se ha encontrado información de procesos de gestión de riesgos realizados previo a la ejecución del proyecto inicial de construcción de la presa en 1930. Sin embargo, se tiene conocimiento que en 1933 ocurre un primer deslizamiento de la ladera derecha durante la excavación de la obra, lo cual obliga a suspender las obras. A raíz de esto, se debe replantear el diseño original y mejorar la cimentación y procesos de excavación.

La continua reactivación de deslizamientos en ambas laderas ha llevado a la implementación de un proceso iterativo e inverso de gestión de riesgos. Es iterativo ya que a medida que se detectan nuevos problemas se han tenido que realizar estudios adicionales que identifiquen nuevamente los riesgos y propongan mejoras, haciendo que el proyecto perdure en el tiempo. Es inverso ya que, en la mayoría de los escenarios, las soluciones se han planteado una vez ocurren los movimientos del terreno, intentando hacer retro análisis o procesos de ingeniería geotécnica forense, para evitar que ocurran a futuro.

Para el año 2001 inicia la obra de recrecimiento de la presa con la cual se aumenta su capacidad, pero continúa la materialización de riesgos geotécnicos sin resolver en las dos laderas. En esta etapa, se utilizaron técnicas de identificación de riesgos basadas en:

- Revisión de documentación existente del proyecto: En la ladera se han realizado múltiples estudios de tipo geológico, geotécnico e hidrogeológico a raíz de los movimientos del terreno. Estos estudios se han tomado como referencia para identificar riesgos mediante la caracterización detallada del terreno que se ha realizado. Sin embargo, no se ha evidenciado la existencia de un plan global de gestión de riesgos ni una EDR específica.

- Técnicas de recolección de información: Según el PMBOK (6 Edición, 2017), para la identificación de riesgos las técnicas de tormenta de ideas, Delphi y entrevistas a expertos permiten un conocimiento más amplio de los riesgos. En este caso de estudio, no se ha encontrado información pública que reporte el uso de alguna de estas técnicas, sin embargo, han salido a contratación varios estudios encaminados a identificar y evaluar los riesgos en la ladera y reparar los ya ocurridos por empresas expertas.

- **¿Qué procesos de evaluación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?**

Dentro del proyecto no se ha encontrado un análisis cualitativo general de riesgos, es decir, que defina la probabilidad y el impacto de un listado de riesgos categorizados.

En cuanto a análisis cuantitativo, se han realizado caracterizaciones geotécnicas a partir de exploración directa e indirecta del terreno. A partir de estas exploraciones se han obtenido perfiles representativos para desarrollar modelos geotécnicos de estabilidad. En estos modelos se han tenido en cuenta aspectos sísmicos de la zona con los periodos de retorno recomendados para una presa de categoría A.

Se han realizado análisis de elementos finitos para determinar el factor de seguridad de la estabilidad de la ladera. Sin embargo, los estudios de seguridad realizados en el 2019 fueron criticados ya que el factor de seguridad pierde aplicabilidad en movimientos reactivados. Solo sería aplicable para evaluación de estabilidad de las obras que se propongan para estabilización.

Teniendo en cuenta lo anterior y que la ladera continúa en movimiento, se ha optado por realizar procesos de monitoreo y control definiendo umbrales de actuación. En la ladera derecha, si el desplazamiento máximo acumulado en 30 días es menor a 1,5 mm y menor a 3 mm en un año, se considera estable. En caso contrario, se requerirá exploración de la ladera y la puesta en marcha de un plan de actuaciones de mejora.

Las simulaciones de riesgos han permitido determinar las consecuencias de la materialización de deslizamientos e incluso de rotura de la presa. Según el estudio resumido por la Confederación Hidrográfica del Ebro, en caso de una rotura de la presa, 7 metros de agua cubrirían los barrios Actur y La Almozara de la ciudad de Zaragoza. En la Figura 25 se presenta el resultado de esta simulación.



**Figura 25 Zona Inundable en Caso de Rotura**

Fuente: <https://www.publico.es/politica/rotura-presa-yesa-sumergiria-media.html>



A pesar de la variedad de información encontrada sobre evaluación de probabilidad e impacto de los riesgos de la obra, no se encontró un informe dedicado a la evaluación general de riesgos que integre de manera evolutiva los riesgos que se han venido materializado en la historia de la Presa de Yesa.

- *¿Qué procesos de mitigación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?*

Se han tenido que realizar varias obras de reparación en la ladera derecha de la presa causadas por los deslizamientos que se han reactivado desde la construcción inicial. Con especial atención en las obras de recrecimiento iniciadas en el 2001, se han reportado incidencias en la ladera a partir de las excavaciones propias de la construcción. En la Tabla 5 se resumen las actuaciones constructivas que han generado indicios de movimientos de la ladera como grietas y planos de deslizamiento. En la última columna se resumen los trabajos correctivos o preventivos que se han puesto en marcha para reducir el impacto de dichos riesgos, incluyendo el desalojo de las urbanizaciones en la parte baja de la ladera.

**Tabla 5 Actuaciones constructivas y sus incidencias en la ladera derecha**

AÑO	ACTUACIONES CONSTRUCTIVAS	INCIDENCIAS LADERA DERECHA	ACTUACIONES CORRECTORAS/PREVENTIVAS
2011	2ª fase de excavaciones del estribo derecho.	Aumenta el ascenso en bloques de la presa. Indicios de movimientos en ladera deslizamiento Mar Mayor. SET. Fallo de inclinómetros.	Trabajos de estabilización de margen derecha y mejora de impermeabilización y drenaje del apoyo de estribo derecho.
2012	2ª fase de excavaciones del estribo derecho (hasta AGO). AGO. Retaluzado para regularizar.	JUN. Grietas en el terreno. JUL. Se detectan planos de deslizamiento a 50 m de profundidad. 20% de sobrecarga en bulones. Deslizamiento Mar Mayor (SET, $v=10$ mm/mes) Altas precipitaciones 17-27 OCT (301 l/m <sup>2</sup> ) OCT. Grietas en cuneta N-240.	AGO-NOV. Ejecución de más bulones entre los ya instalados. SET. Instalación de 25 hitos de control. OCT. Tornillos de control en fisuras. Células de carga (4) en bulones de berma 520. 26 NOV. Activación Escenario 0. 21 DIC. Activación Escenario 1.
2013	Excavación en zona baja para el apoyo de la nueva presa.	13 ENE-10 FEB. 321 l/m <sup>2</sup> acumulados. FEB. Movimiento en bloque 0. FEB. Velocidad= 100 mm/mes MAR. Se localizan nuevas grietas de tracción en cabecera. 22 ABR. Velocidad=0,2 mm/día OCT. Presión en piezómetro SCI-6. NOV. Velocidad= 1 mm/mes	Desalojo de urbanizaciones y suavizado de pendientes. MAY-DIC. Excavaciones de emergencia en parte superior de ladera (1,6 millones m <sup>3</sup> ). Bloques de hormigón 460-510 (20.000 m <sup>3</sup> ). Ejecución de 7 bermas con drenajes superficiales. 10 anclajes de 120 Tn.
2014	Excavaciones de construcción.	Movimientos en deslizamiento Mar Mayor en zonas alta y media. 28 OCT. Rotura en el entorno del apoyo de estribo derecho (30.000 m <sup>3</sup> )	7 JUL. Paso a Escenario 0.
2015		ENE. Se reabren grietas en parte alta de ladera.	Desalojo de urbanizaciones.

Fuente: Ayuntamiento de Sanguesa/ Zangoza, Ingeotíc S.L 2020

Para detectar estos primeros desplazamientos y mitigar las consecuencias de ocurrencia de un deslizamiento, se han instalado inclinómetros y piezómetros distribuidos por la ladera. Cuando se sobrepase el límite de tolerancia, se pone en marcha un plan de emergencia.

En la Figura 26 se presenta la distribución de la instrumentación en la ladera derecha. Está compuesta principalmente por inclinómetros y piezómetros que detectan los movimientos en la superficie principal de rotura, en la superficie de rotura inferior y en el deslizamiento El Inglés.

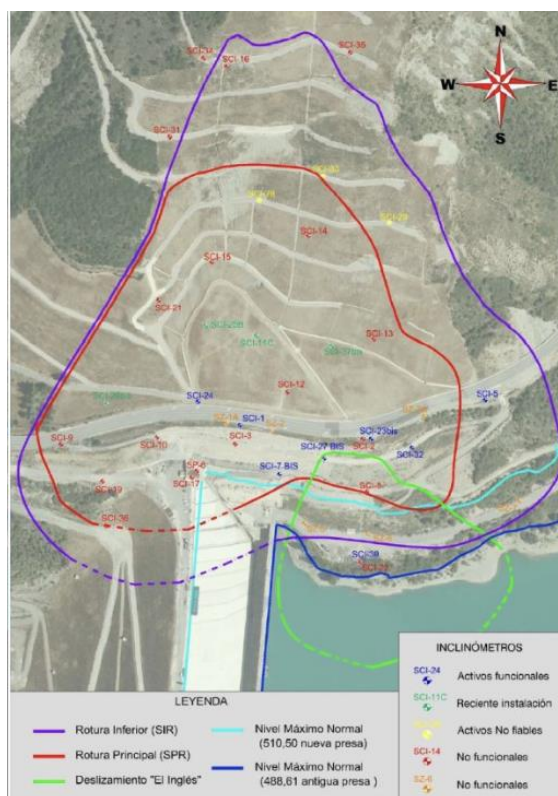


Figura 26 Ubicación de instrumentación en la ladera derecha

Fuente: (Ayuntamiento de Sangüesa/Zangoza, 2023)

- **¿Qué relevancia se le dio a la gestión de riesgos en el caso de estudio?**

La gestión de riesgos en el caso de estudio ha sido principalmente correctiva con respecto a los deslizamientos de la ladera derecha. Posterior al inicio de los movimientos en masa causados por lluvias, sismos y procesos constructivos del recrecimiento de Yesa, se han realizado varios proyectos encaminados a asegurar la estabilidad de la ladera y prevenir pérdidas de vidas humanas. Sin embargo, estos proyectos corresponden a una gestión de riesgos durante operación por lo que han implicado gastos elevados de recursos y por tiempo prolongado.

Se ha podido determinar el fuerte impacto que la rotura de la presa podría tener sobre las poblaciones cercanas y, al ser de Categoría A, se han tenido que tomar acciones correctivas de emergencia para detener tres grandes movimientos en masa que se encuentran activos.

Teniendo en cuenta lo anterior, no hay evidencia de procesos de gestión de riesgos previos al inicio de las obras de la presa, aun así, durante la etapa de operación la gestión de riesgos ha cobrado una importancia vital para el funcionamiento de la obra y protección de las poblaciones cercanas.

#### 4.1.5 Riesgos Geotécnicos Materializados en el Proyecto y su Impacto

- **¿Qué riesgos geotécnicos se materializaron en qué etapas del proyecto?**

Al no contar con acceso al diseño inicial de la presa ni al recrecimiento, no es posible determinar qué riesgos tuvieron origen en el diseño de la obra.

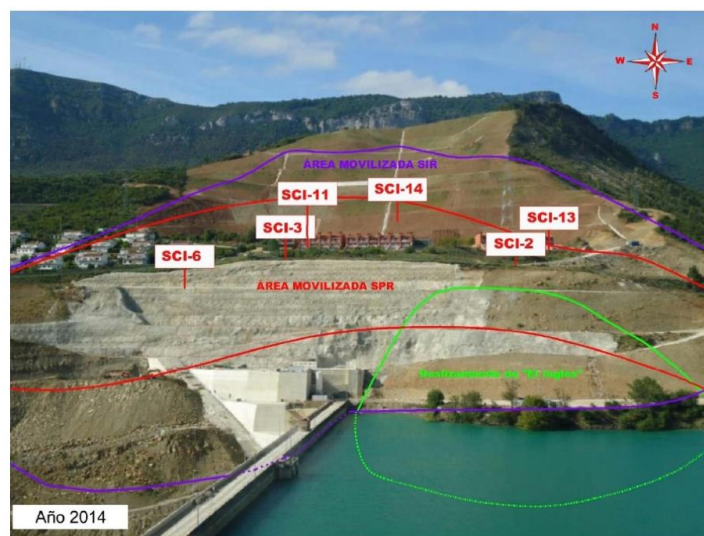
Durante la construcción de la presa inicial, se tiene reportes de la materialización de los siguientes riesgos geotécnicos (el código corresponde al número de la EDR de este estudio):

- 1.2.2.1 Deslizamiento de taludes temporales o permanentes por sobrecargas: en 1933 se producen deslizamientos por la excavación del estribo derecho y se rescinde el contrato.

Adicionalmente, en 1958 vuelven a presentarse deslizamientos en la zona de los aliviaderos, requiriéndose el rediseño de la cimentación.

- 1.2.2.2 Deslizamiento por lluvias o saturación del terreno: en 1960 se hace el llenado y desembalse. La saturación del terreno y la diferencia de permeabilidades reactiva los movimientos en la ladera. Este mismo riesgo se materializa en 1964 por fuertes lluvias.

Durante la construcción de recrecimiento de la presa iniciada en el 2001, se construyó el talud de recrecimiento a partir del cual se evidenciaron tres deslizamientos importantes que se delimitan en la Figura 27.



**Figura 27 Áreas Movilizadas en Recrecimiento**

*Fuente: (Ayuntamiento de Sangüesa/Zangoza, 2023)*

Además de los deslizamientos durante construcción, se han materializado otros riesgos geotécnicos durante operación como:

- 4.1.2.1 Inundaciones fluviales, especialmente evidenciadas en las excavaciones para la ampliación de la presa
- 4.1.3.1 Deslizamientos en laderas: Los deslizamientos no se han materializado solo por actividades constructivas, sino también por efectos de saturación del terreno.
- 4.1.4.2 Desplazamientos del terreno (asentamientos o hinchamientos): Se han evidenciado hundimientos en la parte superior de las laderas, daños en las vías de acceso y grietas.

Adicional a lo anterior, se asume que pudieron materializarse riesgos relacionados con temas geotécnicos desde el inicio de la construcción del proyecto como:

- 2.2 Falta de priorización de la gestión de riesgos geotécnicos: Ya que a pesar de las múltiples señales de alerta de deslizamientos que han ocurrido desde 1930, no se priorizó en ese momento su estabilización definitiva
- 3.3 Falta de integración entre la gestión de riesgos del proyecto y la gestión de riesgos geotécnicos: Ya que no se encontró evidencia de planes de gestión de riesgos integrados de los proyectos de construcción inicial ni del recrecimiento de la presa. Tampoco se encontraron estructuras de desglose del riesgo ni formas integradas de encontrar la causa raíz de los riesgos del proyecto y su interrelación.
- 3.4 Comunicación deficiente de riesgos entre los interesados y etapas: Teniendo en cuenta el tiempo en el que se ha prolongado el proyecto, los cambios tecnológicos que han ocurrido y especialmente la cantidad de interesados en el proyecto, la identificación y evaluación de riesgos se ha llevado a cabo en diferentes etapas del

proyecto y por diferentes actores. Sin embargo, la comunicación de estos riesgos puede haberse dificultado desde el inicio del proyecto y generar reprocesos.

- ***¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la planificación del proyecto?***

No se conocen impactos sobre la etapa de planificación del proyecto previo al inicio de los diseños. Sin embargo, para el proyecto de recrecimiento de la presa de Yesa, el Ministerio de Medio Ambiente adjudicó en el 2001 un total de 113 millones de euros para ejecutar el proyecto en 5 años y 1 mes. Esta planificación inicial fue ampliamente afectada por los riesgos geotécnicos al punto de aumentar el presupuesto en 64 millones de euros durante los 2 primeros años de construcción y superar los 315 millones de euros en total durante el 2007.

En cuanto al cronograma, el proyecto no está oficialmente concluido porque siguen generándose movimientos en la ladera que deben ser monitoreados constantemente. Se prevé la conclusión de las obras en el 2027 con un presupuesto casi cuatuplicado.

- ***¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre el diseño del proyecto?***

El diseño del recrecimiento principal de la presa tuvo que ser ajustado por las incidencias en la ladera derecha evidenciadas durante la construcción. Se han tenido de hacer diseños complementarios de obras de estabilización de taludes, obras de drenaje adicionales, diseño de anclajes y bulones adicionales, entre otros.

- ***¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la construcción y operación del proyecto?***

Los principales impactos de este proyecto se han tenido durante las etapas de construcción y operación de la obra. Se debe aclarar que la presa original continua su operación mientras se realizan las actividades de recrecimiento de la presa.

Mediante inclinómetros, se detectaron los movimientos importantes que estaban ocurriendo en la ladera derecha durante las excavaciones propias de la construcción del recrecimiento. En ese momento se incrementaron los puntos de control topográfico y la frecuencia de toma de datos, con lo cual se detectó el deslizamiento de tipo traslacional que estaba ocurriendo (Esteban et al., 2022). A partir de este proceso se tuvieron que plantear obras para estabilizar toda la ladera, siendo este el mayor impacto sobre la construcción del recrecimiento y operación de la presa actual.

Las medidas correctivas se plantearon en tres fases:

- Fase 1: Corresponde a la excavación que se realizó en la corona del deslizamiento primario para reducir su velocidad en un 90%. También se tuvo que instalar un relleno al pie de la ladera en una zona ubicada aguas arriba de la presa de hormigón.
- Fase 2: Una segunda excavación se realizó en la cuña activa del deslizamiento para reducir las velocidades de movimiento a 2 mm/año. Estas dos primeras fases lograron estabilizar la ladera en gran medida reduciendo la velocidad de sus movimientos.

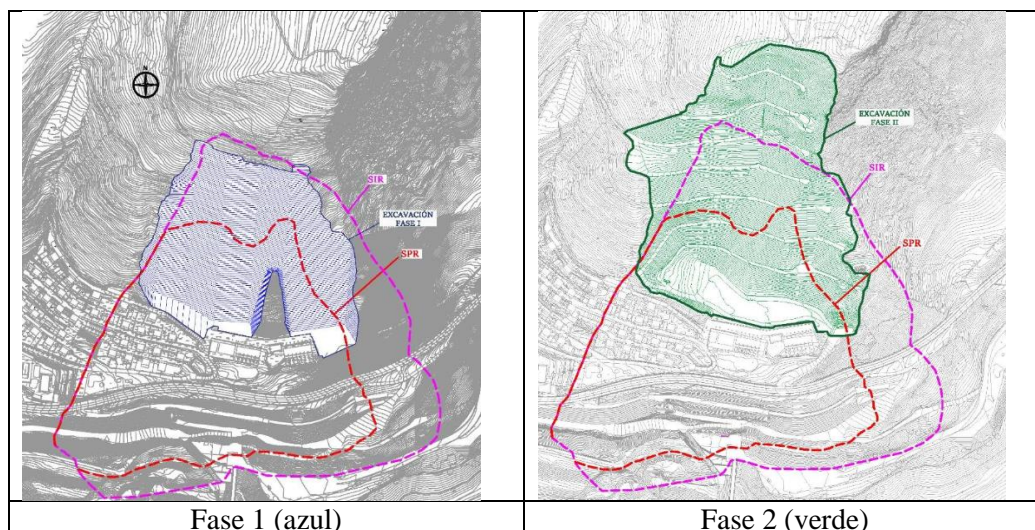


Figura 28 Fases de Estabilización de la Ladera Derecha

Fuente: (Esteban et al., 2022)

- La tercera fase se encontraba en fase de diseño hasta el 2022 y consiste en posibles acciones de mejora de la estabilidad global en condiciones de llenado del embalse recrecido. Se tiene previsto un drenaje subterráneo mediante la construcción de una galería.

#### 4.1.6 Propuestas de Estrategias de Mitigación y Gestión de Riesgos

- *¿Como se pudo haber mejorado el proceso de identificación de riesgos geotécnicos?*

El proceso de identificación de riesgos puede mejorar si se realiza, reporta y comunica desde el inicio del proyecto. En este caso, el inicio del proyecto fue en 1930 y no se tiene evidencia de la identificación de riesgos en ese momento. Sin embargo, para el recrecimiento de la presa un proceso fundamental era identificar los riesgos que se han transferido desde el inicio de la construcción, reportando públicamente los riesgos, sus posibles causas y los impactos que podría tener a futuro.

Para la identificación de riesgos pudieron utilizarse y reportarse técnicas como método Delphi o entrevistas con expertos, que compiladas, pudieran llevar a conclusiones unificadas sobre los nuevos riesgos a los que estará expuesta la presa con su recrecimiento.

Teniendo en cuenta que a la fecha de ejecución del recrecimiento ya se habían materializado varios riesgos geotécnicos, se pudo haber utilizado la técnica de árboles de fallo o similar, que permitan llevar a la causa o las causas posibles del problema y evitarlas en el futuro. Para este estudio se hizo como ejercicio un árbol de fallo particular para el deslizamiento principal de la ladera derecha. (ver Figura 30 )

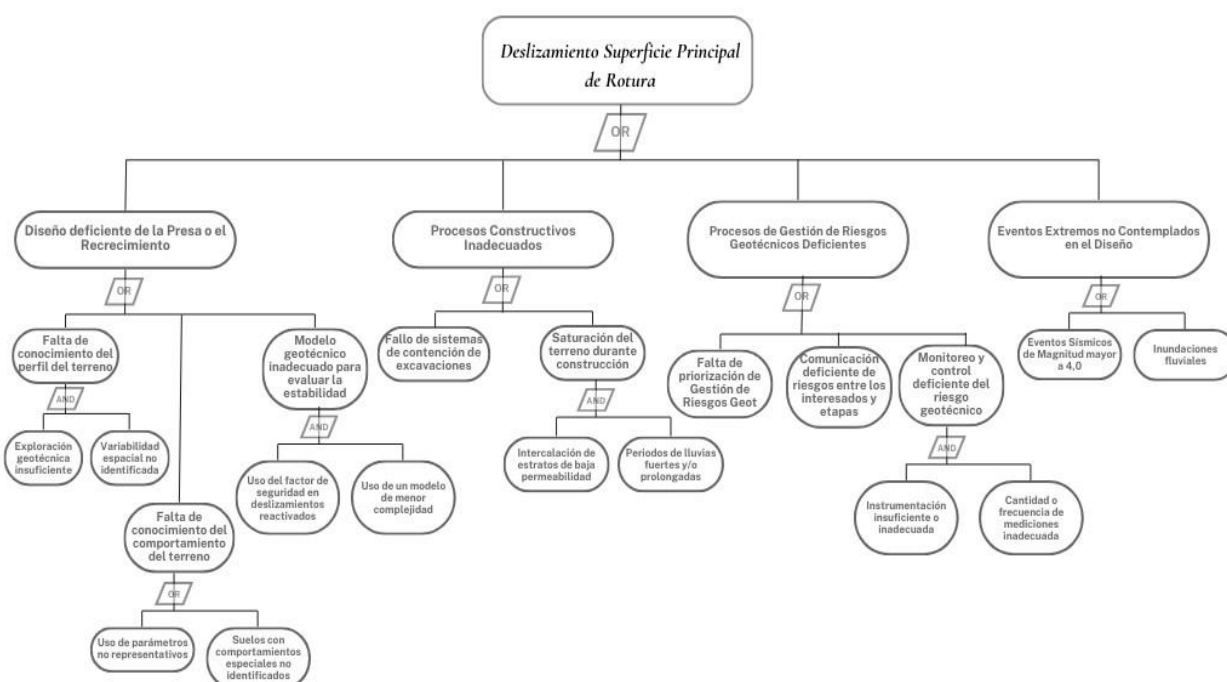


Figura 29 Árbol de Fallo Deslizamiento Superficie Principal

Fuente: Elaboración Propia

- *¿Cómo pudo mejorar el proceso de evaluación de riesgos geotécnicos?*

Dentro de la búsqueda de información para este caso, no se encontró en ninguno de los documentos un análisis cualitativo de los riesgos mediante una matriz de probabilidad impacto o similar. Este proceso pudo ser útil para clasificar las respuestas a los diferentes riesgos del proyecto y enfocar los planes de emergencia hacia los riesgos de mayor probabilidad e impacto.

Se han hecho múltiples análisis cuantitativos de sensibilidad con los datos de exploración geotécnica y geológica de la ladera. Con estos análisis se ha podido dar solución temporal a la mayoría de los deslizamientos antes de que generen consecuencias catastróficas sobre la presa.

- *¿Qué tipo de monitoreo y control se pudo establecer en el proyecto para mitigar los riesgos geotécnicos?*

Como monitoreo y control se han utilizado en este caso la mayoría de los instrumentos y tipos de medición disponibles en lo que respecta a presión de agua y desplazamientos del terreno. Como se mencionó en numerales anteriores, la ladera se encuentra en la actualidad monitoreada y sus mediciones se revisan continuamente para determinar la idoneidad de las obras de estabilización.

Se recomendaría implementar los instrumentos de monitoreo y control en etapas tempranas de la construcción, así como definir cuidadosamente desde el diseño los rangos admisibles para emisión de alertas tempranas, especialmente durante la ejecución de excavaciones como es el caso de la presa de Yesa, así como planes de acción para reducir la exposición a riesgos.

## 4.2 Ladera en Cerro Gordo Almuñécar, Granada- Urbanización Cármenes del Mar

**Nombre del Proyecto Inicial:** Urbanización Cármenes del Mar

**Fecha de Ejecución:** El proyecto inicial se ejecutó en el 2002

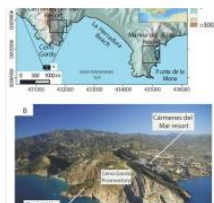
**Localización:** Ladera de Cerro Gordo, ciudad de Almuñécar, en Granada

### 4.2.1 Antecedentes

En el año 2000 se proyecta una urbanización con el nombre de “Cármenes del Mar” de 100 viviendas inicialmente, posteriormente se aumentó el número de viviendas a 425. A partir del año 2005 se comienzan a reportar daños como grietas y asentamientos en la zona del Resort Cármenes del Mar y su vial de acceso debido a deslizamientos en el terreno de la ladera. Varias casas fueron desalojadas de emergencia, algunas derruidas, otras declaradas en ruina física. Tras ello, los propietarios iniciaron un proceso judicial contra la promotora y responsable del estudio geotécnico del proyecto.

En particular, con los años se ha afectado el Vial de la Calle Romero, ubicado en la corona del deslizamiento más activo de la ladera, observándose grietas y grandes ondulaciones.

En el 2022, el Ayuntamiento de Almuñécar contrata el proyecto “Obras de nuevo acceso a la urbanización “Cármenes del Mar” en La Herradura (Almuñécar)” por valor de 538.129,25 €. En la Figura 30 se resumen los sucesos más importantes de este caso de estudio.



Fuente: Mateos, 2017



Fuente: De Haro, 2019



Fuente: El Faro Motril, 2013

### 2000

Proyecto de ejecución de una promoción de 100 viviendas unifamiliares a lo largo de la ladera del Cerro Gordo, en Almuñécar (Granada). El presupuesto de ejecución estaba en torno a los 7 millones de €, lo que, a 2024, supone casi 11,5 millones.

### 2002

Se inicia la ejecución material del proyecto. Según el informe geotécnico, la estabilidad del terreno en la ladera no era óptima y era necesaria una mejora de la misma. Al mismo tiempo, se aumenta la promoción de viviendas de 100 a 425, aumentando de 7 a 30 millones de € de PEM, unos 48,5 millones en la actualidad.

### 2005

Debido a la inexistencia o mala ejecución del mejoramiento del terreno, comienzan a producirse graves deslizamientos de tierra en la ladera, causando importantes daños estructurales en las viviendas y los viales, provocando el desalojo de 42 viviendas y un centenar más en situación de riesgo.



**Figura 30** Línea de Tiempo Urbanización Cármenes del Mar

*Fuente: Elaboración Propia*

#### 4.2.2 Descripción de la obra

Se proyectó una urbanización para alojar 425 viviendas distribuidas en edificios de menos de 4 plantas, y en vivienda unifamiliar a lo largo de la ladera del Cerro Gordo. Ante los procesos de inestabilidad de la ladera, las viviendas se han deteriorado hasta el punto de tener que desalojarse.

Se hizo inminente el riesgo de dejar incomunicada la urbanización por los graves deslizamientos de tierras de la ladera y posible colapso del vial, se proyectó un nuevo acceso para el mismo en reemplazo del tramo de la Calle Romero con graves daños. En la FIGURA se presenta la localización de las zonas en riesgo.



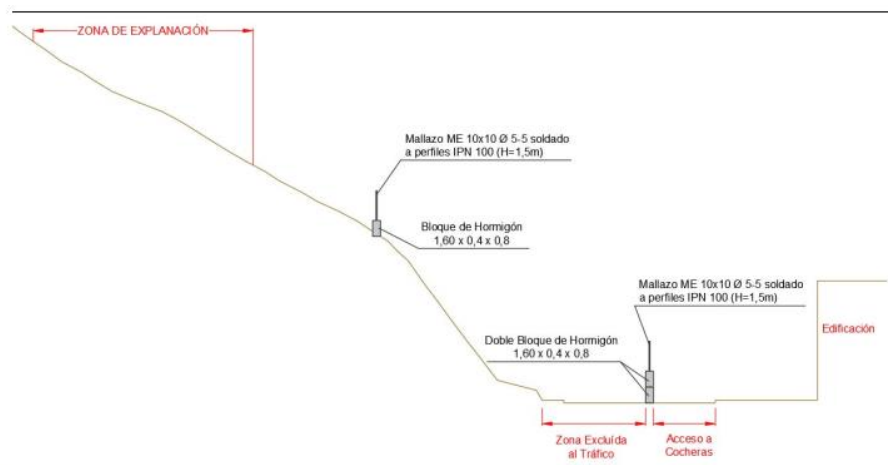


**Figura 31** Ubicación de zona de reemplazo del vial

*Fuente:* (Ayuntamiento De Almuñécar, 2020)

El acceso se planea utilizando el antiguo trazado de una carretera nacional, la cual se encuentra recogida en el vigente Plan de Ordenación Urbana de Almuñécar, pero que no fue contemplada en el proyecto de la urbanización. Se reubica el vial en la parte superior de la Antigua N-340.

El nuevo vial se ubica en una zona con mayor pendiente, pero con un terreno más firme y estable, de 192 metros de longitud, con una pendiente del 11%. Se conformará con una calzada de 6 metros de anchura y un acerado de 2 metros en la margen derecha con bordillo de hormigón. La FIGURA presenta un esquema



**Figura 32** Medidas de protección para el nuevo vial

*Fuente:* (Ayuntamiento De Almuñécar, 2020)

Se realiza un desmante en las zonas afectadas con doble talud de inclinación 1V:1H en los primeros 2,5 metros y 2V:1H en el resto, y para las zonas de terraplén se utilizó suelo adecuado con pendientes 3H:1V. A lo largo del trazado se disponen una serie de muros de contención de espesor variable en función de su altura, hasta un máximo de 9 metros. Dichos muros serán de mampostería y tendrán una cara vista. En una zona del trazado se dispondrá un muro de escollera de 2,5 metros que servirá para prevenir el posible deslizamiento de la ladera que contiene material suelto cuyas condiciones de equilibrio son muy estrictas (Ayuntamiento De Almuñécar, 2020).

### 4.2.3 Características Geológicas y Geotécnicas

La zona del Cerro Gordo se ubica en la Zona Interna de Las Cordilleras Béticas, sobre el llamado manto de La Herradura. Se identificaron suelos coluviales con espesores de hasta 4 m, caracterizados por tener cementación, permitiendo la conformación de taludes casi verticales.

En el Estudio Geotécnico para el Proyecto de Nuevo Acceso a la Urbanización “Cármenes del Mar” en Almuñecar (Granada), se han identificado en la zona rellenos artificiales, suelo vegetal, suelo coluvial y el macizo rocoso; los rellenos artificiales se encuentran bajo el antiguo vial N-340 y están conformados por gravas, bolos y bloques sobre la pendiente del terreno. El suelo vegetal es de tipo areno-arcilloso con espesor menor a 0,5 m. El suelo coluvial está conformado por materiales heterogéneos lo que hace más difícil su caracterización, su espesor puede superar los 4 m. Finalmente, el macizo rocoso está conformado por mármoles calizos y dolomíticos triásicos. Este macizo presenta una densa red de fracturas de diferentes tamaños que facilitan en algunas laderas el desprendimiento de rocas.

En este estudio geotécnico se realizaron comprobaciones de estabilidad de la ladera obteniendo lo siguientes factores de seguridad con y sin sismo, considerando dos parámetros de cohesión diferentes:

**Tabla 6 Factores de Seguridad de Cuñas**

Intersección	FACTOR DE SEGURIDAD			
	Sin efecto sísmico		Con efecto sísmico	
	c = 0 Tn/m <sup>3</sup>	c = 0,6 Tn/m <sup>3</sup>	c = 0 Tn/m <sup>3</sup>	c = 0,6 Tn/m <sup>3</sup>
J1 – J3	1,90	2,55	1,34	1,84
J2 – J5	0,79	1,39	0,57	1,09
J5 – E	1,11	1,61	0,80	1,21

Fuente: (Ayuntamiento De Almuñecar, Ingeniería Geológica Ronsa 71 S.L, 2020)

Teniendo en cuenta que los factores de seguridad en algunos casos no cumplen con los requeridos por las normas de diseño, se recomiendan inclinaciones 1V:1H en los 2,5 metros superiores y con inclinación 2V:1H en profundidades superiores.

### 4.2.4 Procesos de Gestión de Riesgos Geotécnicos

- *¿Qué procesos de identificación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?*

Durante el proyecto inicial de construcción de viviendas, se realizó un estudio geotécnico que indicó que las condiciones de la ladera no eran óptimas y se requería la construcción de un mejoramiento del terreno. El mejoramiento fue construido bajo condiciones que han sido cuestionadas por estudios geotécnicos posteriores.

Adicional a lo anterior no se tiene evidencia de un proceso de identificación de riesgos geotécnicos teniendo en cuenta los múltiples factores que pueden detonar un deslizamiento. A partir del 2005 empiezan a presentarse daños importantes en el mejoramiento del terreno y en las viviendas construidas. A partir de este año se empiezan a desarrollar estudios geológicos y geotécnicos que puedan definir la probabilidad de falla de la zona, realizando un proceso de identificación de posibles riesgos futuros mediante monitoreo y control.

En uno de los estudios geológicos realizados por la Sociedad Geológica de España durante el 2016 se encontró un análisis global de casos históricos de movimientos en la zona de la costa de Granada. El inventario de los principales deslizamientos se presenta en la Figura 33, donde se puede ver que en la zona de Cerro Gordo bajo la N-340 se han presentado deslizamientos importantes.

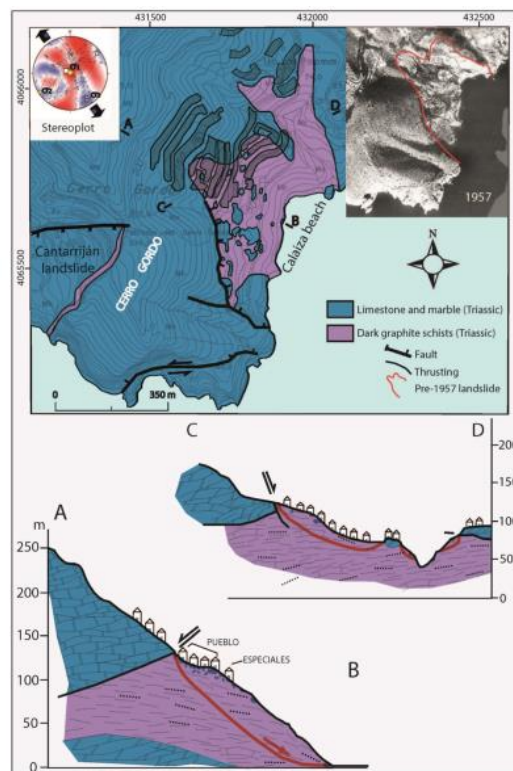


**Figura 33 Inventario de Movimientos Franja Oriental de la Provincia de Granada**

*Fuente:* (Sociedad Geológica de España, 2016)

Además del análisis histórico se han utilizado técnicas de fotogrametría e instrumentación para determinar la dirección y velocidad de los movimientos de la ladera. Las fotografías históricas permitieron identificar la existencia de un deslizamiento que existía antes de la construcción inicial de la urbanización.

Se han desarrollado mapas geológicos que permiten identificar el riesgo en el que se encuentran el pueblo y las viviendas especiales como se muestra en la Figura 34. Se observan dos materiales predominantes, de los cuales el grafito del triásico (color violeta) ha presentado movimientos desde 1957. Las imágenes A B C y D presentan las superficies de falla posibles, que muestran la clara afectación de las urbanizaciones.



**Figura 34 Mapa Geológico del Cerro Gordo.**

*Fuente:* (Mateos et al., 2017)

- *¿Qué procesos de evaluación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?*

Dentro del proyecto no se ha encontrado un análisis cualitativo general de riesgos, es decir, que defina la probabilidad y el impacto de un listado de riesgos categorizados.

En cuanto a análisis cuantitativo, se han realizado caracterizaciones geotécnicas a partir de exploración directa e indirecta del terreno. A partir de estas exploraciones se han obtenido perfiles representativos para desarrollar modelos geotécnicos de estabilidad.

La evaluación de los movimientos de la ladera ha sido exhaustiva y ha permitido determinar la premura en la ejecución de nuevos proyectos como la construcción del nuevo acceso a las urbanizaciones.

- *¿Qué procesos de mitigación de riesgos geotécnicos se llevaron a cabo en el caso de estudio?*

Luego de detectarse los primeros daños en las viviendas y en las vías de acceso, se han tomado las siguientes acciones para reducir los impactos del deslizamiento de la ladera:

- Diseño y construcción de sistemas de contención como muros y bloques de hormigón.
- Diseño y construcción de sistemas de drenaje para evitar la saturación del terreno
- Se han realizado estabilizaciones locales de taludes mediante instalación de sistemas como encofrados o revegetalización
- Procesos de reparación en viviendas menos afectadas y desalojo de las viviendas con mayores daños

- *¿Qué relevancia se le dio a la gestión de riesgos en el caso de estudio?*

Al igual que en el primer caso estudiado, la gestión de riesgos en este caso ha sido principalmente correctiva. Durante las etapas de diseño y construcción de las viviendas no se dio importancia al riesgo geotécnico detectado en los estudios geotécnicos y adicionalmente, no se detectó previo a la construcción de las viviendas la existencia de un deslizamiento histórico que pudo haberse determinado mediante procesos de gestión de riesgo geotécnico tempranos.

La gestión de riesgos ha cobrado gran importancia en la medida que el proyecto ha tenido significativas pérdidas económicas y fuertes repercusiones legales.

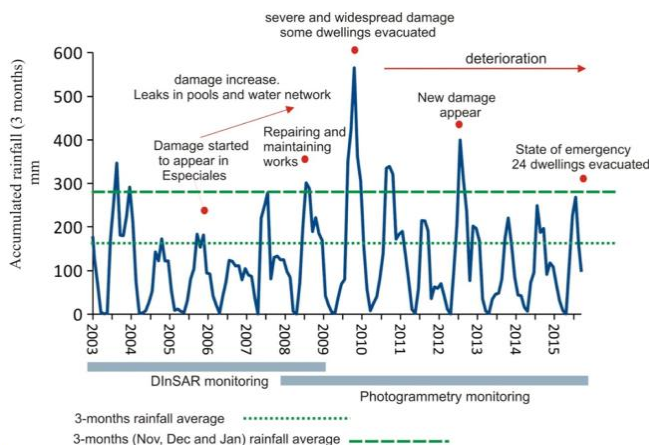
#### **4.2.5 Riesgos Geotécnicos Materializados en el Proyecto y su Impacto**

- *¿Qué riesgos geotécnicos se materializaron en qué etapas del proyecto?*

En este proyecto se manifestaron las primeras evidencias de materialización de riesgos geotécnicos durante la etapa de construcción con la aparición de las primeras grietas en el mejoramiento construido y se hicieron aún más evidentes durante la etapa de operación con los daños evidentes en las viviendas.

El deslizamiento es el principal riesgo geotécnico materializado y se relaciona con los siguientes elementos de la EDR:

- 1.2.2.2 Deslizamiento por lluvias o saturación del terreno: Dentro de los estudios realizados, se ha detectado que los principales daños en la ladera han ocurrido durante las épocas con mayores lluvias registradas como se muestra en la Figura 35.



**Figura 35 Relación entre los daños y la lluvia acumulada**

*Fuente: (Mateos et al., 2017)*

- 4.1.3.1 Deslizamientos en laderas: A partir de la instrumentación instalada se han detectado desplazamientos propios de un deslizamiento activo, también se han evidenciado deslizamientos locales que han requerido la construcción de obras de contención de emergencia.
- 4.1.4.2 Desplazamientos del terreno (asentamientos o hinchamientos): Es el riesgo que más se ha evidenciado durante el ciclo de vida del proyecto, se han presentado grietas, levantamientos y hundimientos en las vías, viviendas y alrededores de las urbanizaciones.
- ***¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la planificación del proyecto?***

La planificación inicial del proyecto contemplaba un presupuesto de 30 millones de euros, lo que representa 48,5 millones de euros del 2024. Se tenía contemplado un plazo de entrega de las viviendas de dos años. Sin embargo, hasta el 2024 se han gastado el presupuesto cerca de 50 millones de euros adicionales en estabilización de la zona de la ladera, sin darse aún una solución definitiva para los propietarios de las viviendas.

A pesar de haberse entregado la mayoría de las viviendas, estas tuvieron que ser desalojadas por lo daños presentados. Adicionalmente, el Ayuntamiento ha tenido que adjudicar varios estudios y proyectos de mejora de los accesos y construcción de estructuras de contención.

- ***¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre el diseño del proyecto?***

Los riesgos que se materializaron en el proyecto no fueron considerados en el diseño inicial por lo que fue necesario realizar nuevos diseños para estabilización y contención de la ladera. El diseño del proyecto de la urbanización no fue adecuado y por lo tanto las estructuras no fueron funcionales durante la operación del proyecto.

- ***¿Qué impacto tuvieron los riesgos geotécnicos que se materializaron sobre la construcción y operación del proyecto?***

No se reportan problemas de estabilidad locales durante la construcción del mejoramiento ni durante la construcción de las viviendas. Sin embargo, poco tiempo después de la entrega de las primeras viviendas, se empiezan a detectar deslizamientos de tierra en la ladera y los primeros agrietamientos al interior de las viviendas y los viales.

Se puede decir que la etapa de operación del proyecto no fue funcional ni se cumplieron sus objetivos ya que varios propietarios no han podido habitar las viviendas ni recuperar su el dinero invertido.

En la se resume el impacto en una escala de daños realizada mediante entrevistas y registros fotográficos en la urbanización (Mateos et al., 2017). Así mismo, se definió la ubicación de las grietas de tensión, el área activa del deslizamiento y la ubicación de algunas obras de contención.

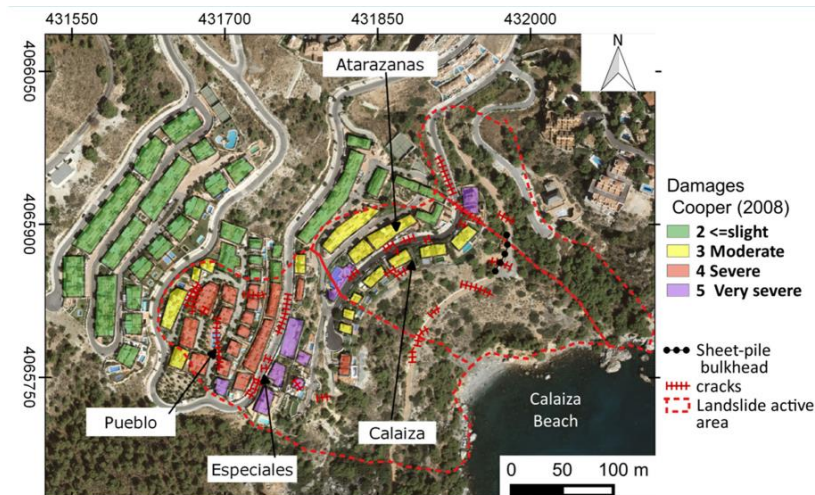


Figura 36 Resumen de impactos sobre las viviendas Cármenes del Mar

Fuente: (Mateos et al., 2017)

#### 4.2.6 Propuestas de Estrategias de Mitigación y Gestión de Riesgos

- *¿Como se pudo haber mejorado el proceso de identificación de riesgos geotécnicos?*

En este caso de estudio la identificación temprana de riesgos era un aspecto fundamental para evitar todos los daños generados, incluso desde el momento de evaluar la viabilidad del proyecto posiblemente hubiera permitido replantear su ubicación.

Al ser una zona donde históricamente se han presentado deslizamientos de gran magnitud, se pudo utilizar en el proyecto la técnica de revisión de documentación histórica en la cual se han delimitado las zonas más inestables y las principales superficies de falla.

Se elaboró un árbol de fallo para este caso que, a pesar de tener un deslizamiento como el caso anterior, la causa raíz de este riesgo puede ser diferente de acuerdo con las condiciones particulares de Cerro Gordo.

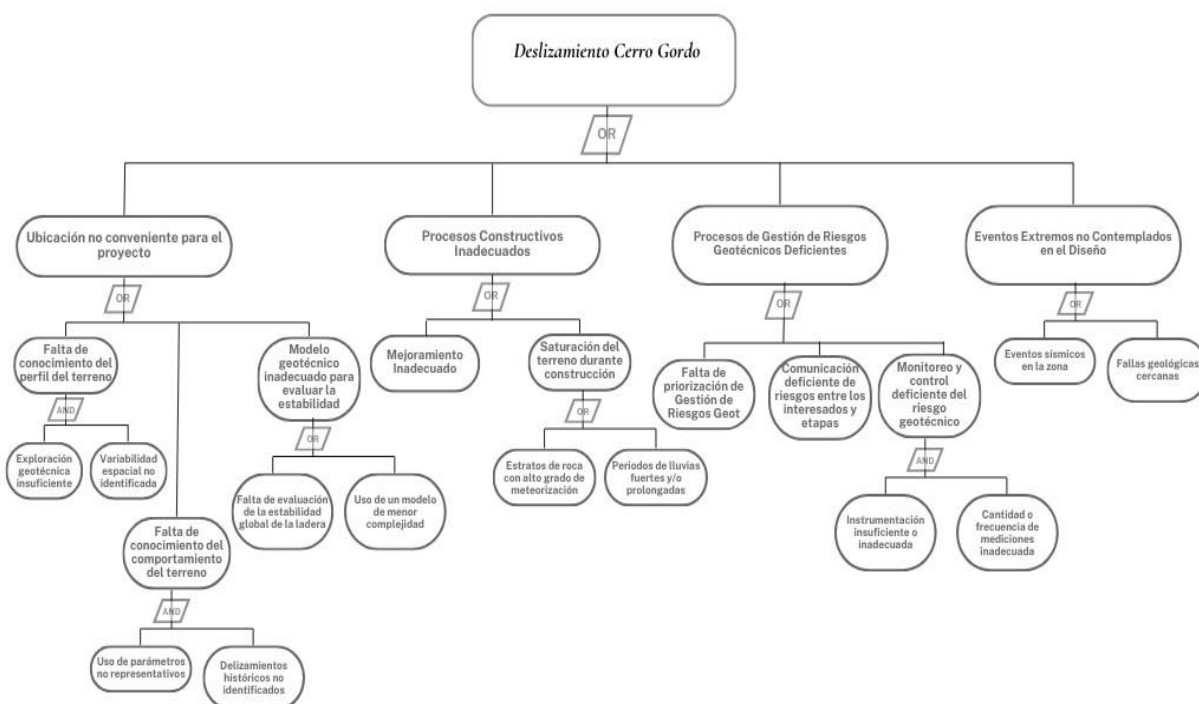


Figura 37 Árbol de Fallo- Deslizamiento Cerro Gordo

Fuente: Elaboración Propia

• **¿Cómo pudo mejorar el proceso de evaluación de riesgos geotécnicos?**

Dentro de la búsqueda de información para este caso, no se encontró en ninguno de los documentos un análisis cualitativo de los riesgos mediante una matriz de probabilidad impacto o similar. Este proceso pudo ser útil para clasificar las respuestas a los diferentes riesgos del proyecto y enfocar los planes de emergencia hacia los riesgos de mayor probabilidad e impacto.

En cuanto a la evaluación cuantitativa de riesgos, luego de la evidencia de los primeros daños en las viviendas y viales, se han evaluado las probabilidades de falla y las zonas inestables por medio de modelos de elementos finitos, estudios fotogramétricos, análisis de eventos de lluvia entre otros. Al igual que los procesos descritos anteriormente, hacer esta evaluación en las etapas tempranas del proyecto hubiera podido reducir significativamente el impacto o incluso eliminar los riesgos que se materializaron.

• **¿Qué tipo de monitoreo y control se pudo establecer en el proyecto para mitigar los riesgos geotécnicos?**

El monitoreo y control de los daños dentro del proyecto ha sido exhaustivo desde que se manifestaron los daños en las viviendas. El Ayuntamiento de Almuñécar ha contratado a varios expertos para el monitoreo y análisis de las condiciones de la ladera. Los principales métodos de monitoreo de describen a continuación:

- **DInSAR o Interferometría Radar de Apertura Sintética Diferencial:** Utiliza imágenes de radar para medir de manera detallada movimientos en la tierra. Utiliza ondas de radar que permiten mayor precisión a pesar de las condiciones climáticas y puede detectar con una precisión de milímetros los movimientos de la corteza.



- Fotogrametría: Se utilizaron registros del 2008,2015 y 2016 con fotografías aéreas para detectar principalmente la influencia de los periodos de lluvias sobre el movimiento generalizado de la ladera.
- Además, se han instalado inclinómetros y piezómetros para detección de movimientos

En los documentos investigados no se ha encontrado un plan completo de monitoreo y control de la ladera por lo que cada estudio hace un análisis que parece independiente de los demás. Para mejorar el proceso de monitoreo y control podría emplearse un plan de monitoreo generalizado de la ladera con el fin de definir técnicas, frecuencias de medición y rangos de actuación para implementación de planes de emergencia a tiempo.



## Capítulo 5. Resultados de Encuestas de Riesgo Geotécnico en Proyectos de Ingeniería Civil

El objetivo de realizar las encuestas de riesgo geotécnico fue evaluar la percepción del riesgo de un grupo de profesionales involucrados en proyectos de ingeniería civil.

Para esto, la primera parte de la encuesta permitió conocer la experiencia de los encuestados en cuanto a tiempo, fases de proyecto en las que ha participado y comunidades autónomas de España en las cuales ha realizado proyectos.

En la segunda parte de la encuesta se pudo evidenciar la percepción de cada riesgo de la EDR en cuanto a las variables de probabilidad, impacto en costos e impacto en cronograma.

Para el análisis de resultados, se decidió hacer un conteo general de los resultados para cada respuesta y contrastarlo con el resultado particular de un grupo de expertos que se describirá en los siguientes numerales.

Como resultado final, a partir del cuestionario diseñado, se obtiene el insumo para armar la matriz de probabilidad-impacto objeto de este estudio con tres zonas diferenciadas por colores:

- Zona de color verde: corresponde a la zona de riesgo bajo, en la cual no es necesario tomar acción, pero sí tener en cuenta los riesgos en las diferentes etapas del proyecto y evaluar su probabilidad en cada proyecto particular.
- Zona de color amarillo y naranja: corresponde a la zona de riesgo moderado. En esta zona se considera importante tomar acciones preventivas sobre los posibles riesgos al proyecto.
- Zona de color rojo: corresponde a la zona de riesgo alto en la cual es necesario definir el tratamiento que se va a dar al riesgo durante el proyecto en sus etapas iniciales y destinar recursos a su prevención o tratamiento.

En el ANEXO 3 se presenta la totalidad de los cuestionarios recibidos como respuesta.

### 5.1 Resultados Grupo General

#### 5.1.1 Caracterización del grupo y respuestas

El grupo general está compuesto por profesionales que hayan trabajado en proyectos de ingeniería como parte del equipo del trabajo, en cualquiera de las fases del proyecto y en cualquier comunidad autónoma de España.

La Figura 38 presenta la distribución de respuestas obtenidas por años de experiencia. La mayoría de los encuestados se encuentran en los grupos de 5 a 10 años y de 10 a 20 años. Sin embargo, un 10% del grupo tiene más de 20 años de experiencia en el sector.

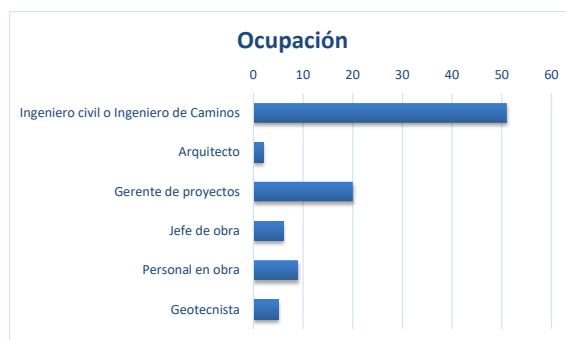


Figura 38 Años de Experiencia Profesional de los Encuestados

Fuente: Elaboración Propia

Se preguntó sobre la o las ocupaciones principales en las cuales los profesionales habían participado a lo largo de su vida profesional. En la Figura 39 se presentan los resultados obtenidos.

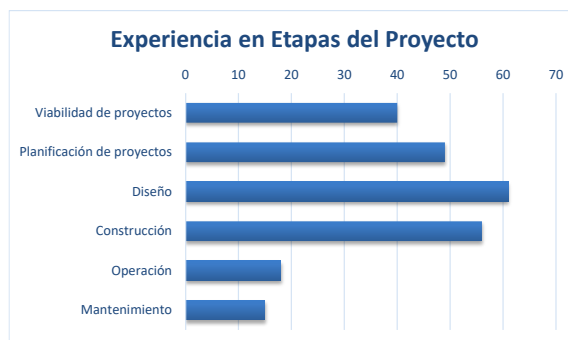
Esta es una pregunta con múltiple respuesta por lo que varias ocupaciones pueden aplicar a un solo profesional. La mayoría de los encuestados trabajaron o trabajan con cargos de ingeniero civil y varios han trabajado como gerentes de proyectos. También se cuenta con respuestas de profesionales dedicados a la geotecnia con amplia experiencia en proyectos con mayor exposición a riesgos geotécnicos y análisis de geotecnia forense.



**Figura 39 Experiencia Laboral de los Encuestados**

*Fuente: Elaboración Propia*

Se encuestaron profesionales con una amplia perspectiva sobre la totalidad del ciclo de vida de proyectos civiles desde su viabilidad hasta la etapa de mantenimiento de obras. Con respecto a las etapas del proyecto en las cuales los encuestados han tenido experiencia, predominan las etapas de diseño y construcción como se observa en la Figura 40.

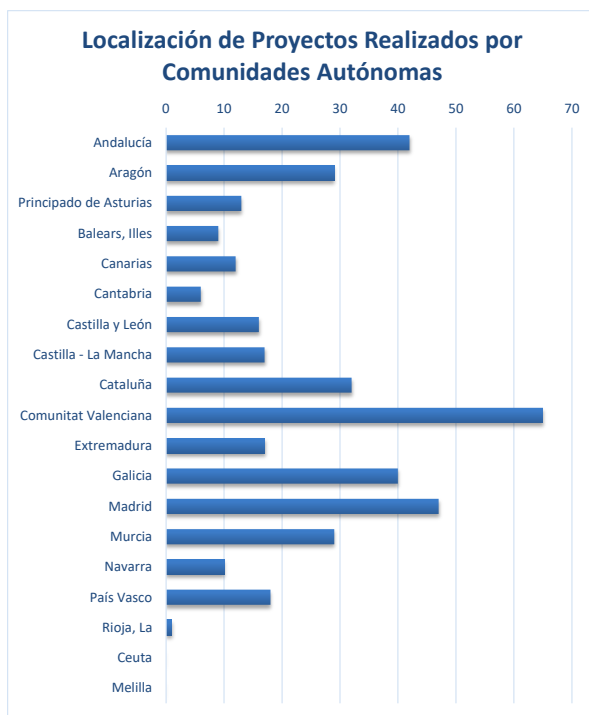


**Figura 40 Experiencia en Etapas del Proyecto**

*Fuente: Elaboración Propia*

En la Figura 41 se muestran las comunidades autónomas en las cuales los encuestados han participado en proyectos. La totalidad de los encuestados han realizado proyectos en la Comunidad Valenciana teniendo en cuenta que es el lugar en el cual se lanzó la encuesta, sin embargo, también realizaron proyectos en otras comunidades como Andalucía, Madrid y Galicia. Esta información es relevante teniendo en cuenta el marco teórico de este estudio, en el cual se detectó que en zonas como Andalucía y Galicia hay mayor exposición a riesgos geotécnicos.

Se considera que la distribución de experiencia en diferentes comunidades autónomas asegura una amplia visión sobre los riesgos geotécnicos en España.



**Figura 41 Localización de Proyectos**

*Fuente: Elaboración Propia*

En la segunda parte de la encuesta se enumeran los riesgos geotécnicos y se pregunta a los encuestados sobre la probabilidad, el impacto en costes y el impacto en cronograma del proyecto según su percepción del riesgo.

Los resultados en esta parte del cuestionario se analizaron en dos partes:

- Los resultados generales o totales, que son la suma de las respuestas de todos los encuestados.
- Los resultados de expertos en los cuales se filtraron las personas con más de 10 años de experiencia profesional, con experiencia específica en geotecnia, gerencia de proyectos y/o como jefe de obra. Se considera que estos profesionales, por su experiencia, han tenido mayor exposición a la materialización de riesgos geotécnicos.

La Figura 42 presenta los resultados de cada riesgo, con su código de la EDR. En cada columna se presenta el número de veces que se marcó cada casilla por los encuestados. En color azul está resaltada la casilla con mayor número de respuestas. Estas respuestas se presentan para la encuesta general y para los expertos.

Algunos de los encuestados, cuando no había ocurrido el riesgo geotécnico dentro de sus proyectos, es decir, cuando la casilla de probabilidad era 1, no marcaron las casillas de impacto en costes e impacto en cronograma. Sin embargo, otros encuestados tuvieron en cuenta su percepción del riesgo para estimar los posibles impactos si el riesgo ocurriera. Los dos tipos de resultados se tuvieron en cuenta.

Código EDR	Riesgo	TOTALES															EXPERTOS														
		Probabilidad					Impacto en Costes					Impacto en Cronograma					Probabilidad					Impacto en Costes					Impacto en Cronograma				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1.1.1.1	Exploración geotécnica insuficiente ( no cumple con normativa o no proporciona información suficiente del terreno)	3	39	20	5	1	0	24	31	11	2	0	13	41	13	1	1	15	6	0	1	0	8	12	2	1	0	2	16	4	1
1.1.1.2	Variabilidad espacial no identificada del perfil de suelo	7	47	13	1	0	0	38	23	7	0	2	20	40	5	1	0	20	2	1	0	0	14	9	0	0	1	8	12	2	0
1.1.1.3	Anomalías en el perfil como bloques de roca o materiales blandos	5	48	12	3	0	5	24	28	9	2	5	19	33	8	1	2	13	6	2	0	1	9	11	2	0	2	8	9	2	0
1.1.1.4	Variabilidad del nivel de agua subterránea no considerada en el diseño	6	27	28	7	0	10	29	25	3	1	11	25	28	3	1	1	10	11	1	0	6	12	2	3	0	6	10	5	2	0
1.1.2.1	Elección de parámetros del suelo no representativos para el diseño de las cimentaciones o taludes	40	22	6	0	0	5	26	24	12	1	3	24	33	7	1	14	9	0	0	0	0	10	8	5	0	1	4	14	4	0
1.1.2.2	Interpretación errada de los datos de ensayos y mediciones en campo	49	16	2	1	0	6	32	23	4	2	8	26	21	9	3	18	5	0	0	0	0	16	7	0	0	3	9	7	4	0
1.1.2.3	Uso de correlaciones no adecuadas para el tipo de suelo. Necesidad de revisión y/o repetición del estudio geotécnico	41	22	5	0	0	10	30	18	6	3	3	29	18	14	4	14	9	0	0	0	1	12	6	4	0	0	7	9	7	0
1.1.2.4	Suelos con comportamientos especiales no identificados como arcillas expansivas o cenizas volcánicas	14	42	11	1	0	1	5	33	24	4	0	12	29	23	3	3	18	2	0	0	1	1	5	13	3	0	3	14	5	1
1.1.3.1	Uso de un modelo geotécnico no representativo del terreno: por su geometría, amplitud, metodología de cálculo entre otros.	49	13	3	3	0	6	32	17	11	0	4	26	28	7	1	19	3	1	0	0	3	15	4	1	0	2	11	8	2	0
1.2.1.1	Colapso de las paredes de la excavación temporal durante obra	29	28	10	1	0	3	13	37	15	0	2	26	36	2	2	12	10	1	0	0	1	4	12	6	0	0	8	14	0	1
1.2.1.2	Falla de fondo de la excavación en obra	49	15	4	0	0	0	17	25	19	4	0	11	29	24	1	21	2	0	0	0	0	1	11	10	1	0	1	13	9	0
1.2.1.3	Entrada de agua a las excavaciones por nivel freático o precipitaciones	4	32	25	7	0	15	29	12	11	1	11	32	10	13	2	1	11	9	2	0	7	8	7	1	0	1	14	8	0	0
1.2.1.4	Daños a propiedades vecinas o a infraestructura enterrada	29	27	10	2	0	0	14	19	25	8	2	11	18	20	15	14	8	0	1	0	0	1	8	9	5	0	2	3	7	11
1.2.2.1	Deslizamiento de taludes temporales por sobrecargas de maquinaria o materiales	42	24	2	0	0	4	13	29	17	2	6	14	34	9	2	19	4	0	0	0	2	5	8	7	1	3	2	14	4	0
1.2.2.2	Deslizamiento de taludes por lluvias o saturación del terreno	12	43	12	1	0	3	10	30	20	5	0	11	29	21	7	5	17	0	1	0	1	5	9	4	4	0	6	8	6	3
1.2.2.3	Fallo del sistema de contención de taludes	35	29	4	0	0	0	7	19	30	9	0	5	28	18	13	13	10	0	0	0	0	1	3	18	1	0	1	7	11	4
1.2.3.1	Asentamientos en zonas de grúas o maquinaria pesada	44	16	1	7	0	9	22	16	12	2	11	14	21	11	3	17	5	0	1	0	6	9	6	1	1	8	2	11	1	1
1.3.1	Asentamientos por consolidación ( a largo plazo)	15	34	19	1	0	5	8	27	23	3	7	7	32	17	3	6	12	5	0	0	3	3	11	5	1	4	0	10	8	1
1.3.2	Daños en la estructura por la construcción de otras estructuras	43	19	5	1	0	0	14	24	14	13	0	11	22	24	8	15	7	1	0	0	0	4	8	6	5	0	0	9	11	3
1.3.3	Daños por cambios en las condiciones de carga	54	10	3	1	0	0	15	35	9	2	0	14	37	3	7	16	6	1	0	0	0	7	13	2	1	0	6	13	2	2
1.3.4	Afectación en la estabilidad de taludes a largo plazo	23	32	12	1	0	2	6	23	25	10	0	14	15	33	4	10	9	4	0	0	0	0	11	9	3	0	2	8	11	2
2.1	Recursos insuficientes para actividades geotécnicas	25	22	10	10	1	0	16	30	15	5	5	16	24	16	4	5	9	3	6	0	0	9	9	2	3	3	5	10	5	0
2.2	Falta de priorización de la gestión de riesgos	6	20	26	13	3	0	8	38	19	1	0	6	32	25	3	0	9	11	3	0	0	2	12	9	0	0	1	14	8	0
3.1	Planificación deficiente de las actividades geotécnicas	1	26	35	6	0	0	18	41	6	4	3	19	22	20	4	0	15	6	2	0	0	9	14	1	0	2	10	7	4	0
3.2	Estimación errónea de los recursos para exploración geotécnica	5	36	19	8	0	0	23	33	8	4	6	20	24	10	8	2	17	4	0	0	0	12	9	2	0	1	10	12	0	0
3.3	Falta de integración entre la gestión de riesgos del proyecto y la gestión de riesgos geotécnicos	25	22	17	1	3	4	21	24	10	5	7	16	25	15	1	9	7	7	0	0	2	10	9	2	0	2	6	13	2	0
3.4	Comunicación deficiente de riesgos entre los interesados y etapas	16	19	24	9	0	6	12	25	23	0	9	11	21	22	3	6	9	8	0	0	4	6	10	3	0	4	6	6	7	0
3.5	Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico	24	26	14	4	0	4	17	38	3	6	5	14	27	19	3	8	14	1	0	0	2	10	9	2	0	2	6	7	8	0
4.1.1.1	Sismos de magnitud mayor a 4,0 ( pueden producir daños moderados a severos en las estructuras)	68	0	0	0	0	0	2	11	30	22	0	3	6	19	37	23	0	0	0	0	0	1	3	8	10	0	1	0	5	16
4.1.1.2	Sismos de magnitud menor a 4,0 ( pueden producir daños leves en las estructuras)	59	9	0	0	0	9	12	16	21	7	10	12	14	20	9	21	2	0	0	0	6	1	3	10	2	6	1	1	12	2
4.1.2.1	Inundaciones fluviales ( causadas por ríos)	55	13	0	0	0	3	5	15	27	10	0	9	13	15	23	19	4	0	0	0	0	0	2	16	4	0	0	3	8	11
4.1.2.2	Inundaciones pluviales (causadas por lluvias)	32	31	4	1	0	8	12	31	12	2	7	8	34	8	8	9	13	1	0	0	3	4	12	4	0	4	2	10	5	2
4.1.2.3	Inundaciones marinas (mareas altas temporales)	66	2	0	0	0	6	8	14	19	12	6	4	12	27	10	22	1	0	0	0	4	0	7	6	5	4	0	1	11	6
4.1.3.1	Erosión del terreno	14	41	10	3	0	3	25	27	10	3	3	20	27	9	9	8	12	3	0	0	2	7	12	2	0	2	8	9	3	1
	OTRO:	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

Figura 42 Resultados de Encuestas

Fuente: Elaboración Propia

### 5.1.2 Matriz de Impacto en Costes

A partir de estos resultados se construyeron las matrices de probabilidad del riesgo geotécnico e impacto en costes. En cada casilla se ubica el código del riesgo geotécnico según las respuestas obtenidas.

		IMPACTO EN COSTES- GENERAL						
		1	2	3	4	5		
		Muy Bajo 1%-5%	Bajo 5%-10%	Medio 10%-30%	Alto 30%-50%	Muy Alto >50 %		
<b>PROBABILIDAD</b>	5	<b>Muy Alta 71-90%</b>						
	4	<b>Alta 51-70%</b>						
	3	<b>Media 31-50%</b>		1.1.1.4	2.2 3.1 3.4			
	2	<b>Baja 11-30%</b>		1.1.1.2 1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.3 1.1.2.4 1.2.2.2 1.3.1 3.2 3.5 4.1.3.1	1.3.4		
	1	<b>Muy Baja &lt; 10%</b>		1.1.2.1 1.1.2.2 1.1.2.3 1.1.3.1 1.2.3.1	1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.3.2 1.3.3 2.1 3.3 4.1.2.2	1.2.1.4 1.2.2.3 4.1.1.1 4.1.1.2 4.1.2.1 4.1.2.3		

Figura 43 Matriz Impacto en Costes-General

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la anterior figura, la mayoría de los riesgos se ubican en la casilla de riesgo Muy Baja y de impacto Medio. Algunos de los riesgos de esta casilla son: Colapso de las paredes de la excavación temporal durante obra, falla de fondo de la excavación en obra, daños en la estructura por la construcción de otras estructuras y falta de integración entre la gestión de riesgos del proyecto y la gestión de riesgos geotécnicos.

La casilla de probabilidad Baja e impacto Medio también contiene a la mayoría de los riesgos de esta matriz, con riesgos como: Exploración geotécnica insuficiente, anomalías en el perfil como bloques de roca o materiales blandos, suelos con comportamientos especiales no identificado,

deslizamiento de taludes por lluvias o saturación del terreno y estimación errónea de los recursos para exploración geotécnica entre otros.

A partir de esta matriz se puede concluir que ninguno de los riesgos geotécnicos está en la zona roja de mayor probabilidad e impacto. Varios de los riesgos se encuentran en la zona amarilla de riesgo medio, lo que implica que es necesario implementar alguna estrategia de manejo como escalar, evitar, transferir, mitigar o aceptar, dependiendo de la naturaleza del proyecto.

### **5.1.3 Matriz Impacto en Cronograma**

En la Figura 44 se presenta la matriz resultante del análisis de todas las respuestas para el impacto en cronograma. Nuevamente la mayoría de los riesgos se encuentra en la casilla de probabilidad muy baja e impacto medio. Otro número importante de riesgos se encuentra en la zona amarilla de riesgo medio y el riesgo más crítico es la comunicación deficiente de riesgos entre los interesados y etapas, que se identifica con un impacto Alto para el cronograma.

		IMPACTO EN CRONOGRAMA-GENERAL						
		1	2	3	4	5		
		Muy Bajo 1%-5%	Bajo 5%-10%	Medio 10%-30%	Alto 30%-50%	Muy Alto >50 %		
<b>PROBABILIDAD</b>	5	<b>Muy Alta 71-90%</b>						
	4	<b>Alta 51-70%</b>						
	3	<b>Media 31-50%</b>			1.1.1.4 2.2 3.1	3.4		
	2	<b>Baja 11-30%</b>		1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.2 1.1.1.3 1.1.2.4 1.2.2.2 1.3.1 3.2 3.5 4.1.3.1	1.3.4		
	1	<b>Muy Baja &lt; 10%</b>		1.1.2.2 1.1.2.3	1.1.2.1 1.1.3.1 1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.2.2.3 1.2.3.1 1.3.3 2.1 3.3 4.1.2.2	1.2.1.4 1.3.2 4.1.1.2 4.1.2.3	4.1.1.1 4.1.2.1	

Figura 44 Matriz Impacto en Cronograma-General

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2 Resultados Grupo Experto

### 5.2.1 Caracterización del grupo y respuestas

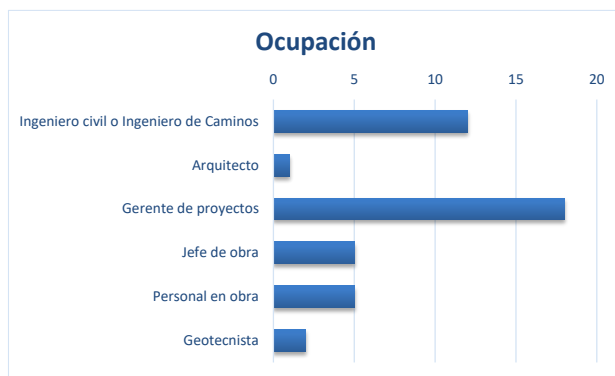
Se filtraron los resultados obtenidos para el grupo de expertos (personas con más de 10 años de experiencia profesional, con experiencia específica en geotecnia, gerencia de proyectos y/o como jefe de obra). El grupo resultante está compuesto por 23 expertos con los años de experiencia que se observan en la Figura 45.



**Figura 45 Años de Experiencia Profesional-Grupo Experto**

*Fuente: Elaboración Propia*

La experiencia de este grupo se presenta en la siguiente gráfica. La mayoría de los profesionales tienen experiencia específica en gerencia de proyectos.



**Figura 46 Experiencia Profesional-Grupo Experto**

*Fuente: Elaboración Propia*

En los siguientes numerales se presentan las matrices resultantes del análisis de resultados de expertos.

### 5.2.2 Matriz de Impacto en Costes

En la siguiente figura se presenta la matriz del grupo de expertos con respecto al impacto de los riesgos geotécnicos en el coste del proyecto.

Se resaltan en negrilla los riesgos que se ubican en una casilla diferente con respecto al grupo general.



		IMPACTO EN COSTES-EXPERTOS						
		1	2	3	4	5		
		Muy Bajo 1%-5%	Bajo 5%-10%	Medio 10%-30%	Alto 30%-50%	Muy Alto >50 %		
<b>PROBABILIDAD</b>	5	<b>Muy Alta 71-90%</b>						
	4	<b>Alta 51-70%</b>						
	3	<b>Media 31-50%</b>		1.1.1.4	2.2			
	2	<b>Baja 11-30%</b>		1.1.1.2 1.2.1.3 3.2 3.5	1.1.1.1 1.1.1.3 2.1 1.2.2.2 1.3.1 3.1 3.4 4.1.3.1	1.1.2.4 4.1.1.2		
	1	<b>Muy Baja &lt; 10%</b>		1.1.2.1 1.1.2.2 1.1.2.3 1.1.3.1 1.2.3.1 3.3	1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.3.2 1.3.3 1.3.4 4.1.2.3 4.1.2.2	1.2.1.4 1.2.2.3	4.1.1.1 4.1.2.1	

**Figura 47 Matriz de Impacto en Costes- Grupo Experto**

*Fuente: Elaboración Propia*

En el numeral 5.3 se compararán los resultados del grupo general y el grupo experto.

### 5.2.3 Matriz Impacto en Cronograma

En la Figura 48 se presenta la matriz del grupo de expertos con respecto al impacto de los riesgos geotécnicos en el cronograma del proyecto.

La mayoría de riesgos han ocurrido con probabilidad baja en los proyectos en los que han participado los expertos pero con impacto medio sobre el cronograma, es decir, de 2 semanas a 1 mes.

		IMPACTO EN CRONOGRAMA-EXPERTOS							
		1	2	3	4	5			
		Muy Bajo 1%-5%	Bajo 5%-10%	Medio 10%-30%	Alto 30%-50%	Muy Alto >50 %			
<b>PROBABILIDAD</b>	5	<b>Muy Alta 71-90%</b>							
	4	<b>Alta 51-70%</b>							
	3	<b>Media 31-50%</b>		1.1.1.4	2.2 3.1				
	2	<b>Baja 11-30%</b>		1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.2 1.1.1.3 1.1.2.4 1.2.2.2 1.3.1 2.1 3.2 4.1.2.2 4.1.3.1	3.4 3.5			
	1	<b>Muy Baja &lt; 10%</b>		1.1.2.2 1.1.3.1	1.1.2.1 1.1.2.3 1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.2.2.3 1.2.3.1 1.3.3 3.3	1.2.1.4 1.3.2 1.3.4 4.1.1.2 4.1.2.3	4.1.1.1 4.1.2.1		

Figura 48 Matriz de Impacto en Cronograma- Grupo Experto

Fuente: Elaboración Propia

### 5.3 Comparación de Resultados Grupo General y Grupo Experto

En este capítulo se comparan las matrices resultantes de costes y cronograma para todos los encuestados y en particular para el grupo de expertos con el fin de determinar los riesgos que los expertos clasificaron diferente a todo el grupo general.

#### 5.3.1 Comparación resultados de costes

En la Figura 49 se presentan las dos matrices con algunos de los cambios resaltados.

		IMPACTO EN COSTES-GENERAL					IMPACTO EN COSTES-EXPERTOS					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
		Muy Bajo 1%-5%	Bajo 5%-10%	Medio 10%-30%	Alto 30%-50%	Muy Alto >50 %	Muy Bajo 1%-5%	Bajo 5%-10%	Medio 10%-30%	Alto 30%-50%	Muy Alto >50 %	
PROBABILIDAD	5	Muy Alta 71-90%										
	4	Alta 51-70%										
	3	Media 31-50%		1.1.1.4	2.2 3.1 3.4			1.1.1.4	2.2			
	2	Baja 11-30%		1.1.1.2 1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.3 1.1.2.4 1.2.2.2 1.3.1 3.2 3.5 4.1.3.1	1.3.4		1.1.1.2 1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.3 2.1 1.2.2.2 1.3.1 3.1 3.4 4.1.3.1	1.1.2.4 4.1.1.2		
				1.1.2.1 1.1.2.2 1.1.2.3 1.1.3.1 1.2.3.1	1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.3.2 4.1.2.1 2.1 4.1.2.3 3.3 4.1.2.2	1.2.1.4 1.2.2.3 4.1.1.1 4.1.1.2 4.1.2.1 4.1.2.3		1.1.2.1 1.1.2.2 1.1.2.3	1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.1.3.1 1.2.3.1 1.3.2 1.3.3 1.3.4 4.1.2.3 4.1.2.2	1.2.1.4 1.2.2.3 1.2.2.3 4.1.1.1 4.1.2.1	4.1.1.1 4.1.2.1	
	1	Muy Baja <10%										

Figura 49 Matriz de Impacto en Costes- Comparación.

Fuente: Elaboración Propia

**Riesgo 1.1.2.4 Suelos con comportamientos especiales no identificados como arcillas expansivas o cenizas volcánicas:** En el grupo general se encontraba en un nivel de probabilidad baja e impacto medio mientras que, filtrando la opinión de los expertos, se encuentra en un nivel de probabilidad baja, pero impacto alto. En los dos casos, es importante controlar este riesgo, ya sea mediante exploración geotécnica indirecta (por medio de tomografías o similar) que permita identificar las características del suelo en un rango más amplio o haciendo exploración geotécnica adicional en zonas donde sea probable la presencia de estos suelos.

**Riesgo 2.1 Recursos insuficientes para actividades geotécnicas:** En el grupo general se tenía este riesgo en la probabilidad muy baja e impacto medio, mientras que en el grupo experto pasa a probabilidad baja e impacto medio. Este resultado es coherente ya que es más probable que la situación se presente entre más años de experiencia se tengan. De acuerdo con los expertos, este riesgo pasa a la zona amarilla y por lo tanto debe ser controlado en el proyecto. Se debe asegurar que en el presupuesto del proyecto se asigne desde la planeación el recurso necesario para realizar las actividades geotécnicas requeridas.

**Riesgo 3.1 Planificación deficiente de las actividades geotécnicas:** En la encuesta general se obtuvo una probabilidad e impacto medios. Los expertos lo clasificaron con una probabilidad baja e impacto medio. La diferencia en el resultado puede deberse a la percepción que tiene el equipo del proyecto sobre la gerencia del proyecto en cuanto a la planificación de las actividades geotécnicas. Los ingenieros con menos experiencia consideran que el riesgo ocurre en varios proyectos, a diferencia de los gerentes de proyecto que lo ven con menor probabilidad. En los dos casos, el riesgo se encuentra en la zona de riesgo moderado y debe considerarse una acción para prevenirlo desde la etapa de viabilidad y planificación.

**Riesgo 3.2 Estimación errónea de los recursos para exploración geotécnica:** El grupo general considera el riesgo de probabilidad baja e impacto medio. El filtro de expertos refleja una probabilidad e impacto bajos, por lo que el riesgo pasaría a la zona de riesgo bajo. Sin embargo, es importante tener en cuenta la posible percepción del equipo del proyecto en cuanto a los recursos disponibles para la exploración y el impacto que genera en el coste final del proyecto.

**Riesgo 3.4 Comunicación deficiente de riesgos entre interesados y etapas:** El grupo general considera la probabilidad y el impacto medios para este riesgo. El grupo experto en cambio refleja una probabilidad baja e impacto medio. En cualquiera de los dos casos se encuentra en la zona de riesgo medio y debe tomarse acción mediante la comunicación más eficiente y continua en el proyecto, no solo de los riesgos geotécnicos sino de los riesgos generales.

**Riesgo 3.5 Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico:** El grupo general considera la probabilidad baja y el impacto medio para este riesgo. El grupo refleja una probabilidad e impacto bajos. La diferencia en el impacto refleja que el equipo del proyecto tiene una percepción más preventiva en cuanto al monitoreo de los riesgos geotécnicos mientras que los expertos tienen una percepción del impacto menos importante sobre el proyecto.

**Riesgo 4.1.1.1 Sismos de magnitud mayor a 4,0:** El grupo general consideró una probabilidad muy baja y un impacto alto, en cambio, el grupo experto consideró la misma probabilidad, pero un impacto muy alto. Sin embargo, en ninguno de los proyectos se ha materializado este riesgo por lo que en general, el grupo experto puede tener una percepción mayor del impacto en riesgos naturales.

**Riesgo 4.1.2.1 Inundaciones Fluviales:** El grupo general consideró una probabilidad muy baja y un impacto alto, en cambio, el grupo experto consideró la misma probabilidad, pero un impacto muy alto. Igual que en el riesgo anterior, es evidente que el grupo experto puede tener una percepción mayor del impacto en riesgos naturales.

**Riesgo 4.1.2.3 Inundaciones Marinas:** El grupo general consideró una probabilidad muy baja y un riesgo alto, en cambio, el grupo experto consideró la misma probabilidad, pero un impacto medio. En este caso los expertos consideran un impacto menor en los costes.

A partir de la comparación de las matrices de impacto en costes, se puede concluir que el grupo general tiene una percepción más baja de la probabilidad y el impacto de los riesgos geotécnicos propios del diseño que el grupo experto, este es el caso del riesgo 1.1.2.4.

Por otra parte, los riesgos organizacionales y de gestión de proyectos son percibidos como menos probables y de impacto en costes más bajo para las respuestas del grupo experto que para el grupo general.

Finalmente, los riesgos externos como sismos e inundaciones fueron en su mayoría percibidos como de mayor impacto por el grupo experto, pero con la misma probabilidad que el grupo en general.

### 5.3.2 Comparación resultados de cronograma

En la Figura 50 se presentan las dos matrices con algunos de los cambios resaltados.

		IMPACTO EN CRONOGRAMA-GENERAL							IMPACTO EN CRONOGRAMA-EXPERTOS							
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			
		Muy Bajo 1%5%	Bajo 5%10%	Medio 10%30%	Alto 30%50%	Muy Alto >50 %			Muy Bajo 1%5%	Bajo 5%10%	Medio 10%30%	Alto 30%50%	Muy Alto >50 %			
5	Muy Alta 71-90%						PROBABILIDAD	5	Muy Alta 71-90%							
4	Alta 51-70%							4	Alta 51-70%							
3	Media 31-50%			1.1.1.4 2.2 3.1	3.4			3	Media 31-50%	1.1.1.4	2.2 3.1					
2	Baja 11-30%		1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.2 1.1.1.3	1.3.4			2	Baja 11-30%		1.2.1.3	1.1.1.1 1.1.1.2 1.1.1.3	3.4 3.5			
				1.1.2.4 1.2.2.2 1.3.1 3.2 3.5 4.1.3.1												
			1.1.2.2 1.1.2.3	1.1.2.1 1.1.3.1	1.2.1.4 1.3.2	4.1.1.1 4.1.2.1							1.1.2.2 1.1.3.1	1.1.2.1 1.1.2.3	1.2.1.4 1.3.2	4.1.1.1 4.1.2.1
			1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.2.2.3 1.2.3.1 1.3.3 2.1 3.3 4.1.2.2		4.1.1.2 4.1.2.3								1.2.1.1 1.2.1.2 1.2.2.1 1.2.2.3 1.2.3.1 1.3.3 3.3	4.1.1.2 4.1.2.3		
1	Muy Baja < 10%							1	Muy Baja < 10%							

Figura 50 Matriz de Impacto en Cronograma- Comparación.

Fuente: Elaboración Propia

**Riesgo 1.1.1.4 Variabilidad del nivel de agua subterránea no considerada en el diseño:** En el grupo general la probabilidad y el impacto son medios. En el grupo experto la probabilidad es igual pero el impacto es bajo. Es un evento que ha ocurrido en varios proyectos, sin embargo, el grupo experto considera que se puede solucionar en un tiempo menor a 2 semanas.

**Riesgo 1.1.2.3 Uso de correlaciones no adecuadas para el tipo de suelo:** En el grupo general la probabilidad es muy baja y el impacto es bajo. En el grupo experto la probabilidad es igual pero el impacto es medio. Se observa que los cambios en el diseño son considerados de mayor impacto en el cronograma por parte de los gerentes del proyecto que por el grupo general.

**Riesgo 1.1.3.1 Uso de un modelo geotécnico no representativo del terreno:** En el grupo general la probabilidad es muy baja y el impacto es medio. En el grupo experto la probabilidad es igual pero el impacto es bajo. Nuevamente se observa que los cambios en el diseño son considerados de mayor impacto en el cronograma por parte de los gerentes del proyecto que por el grupo general.

**Riesgo 1.3.4 Afectación en la estabilidad de taludes a largo plazo:** En el grupo general la probabilidad es baja y el impacto es alto. En el grupo experto la probabilidad es muy baja y el impacto es alto. Se observa que el grupo de expertos en su mayoría no ha presenciado afectaciones de estabilidad de taludes a largo plazo, sin embargo, el personal de obra y los ingenieros civiles de menor experiencia si han encontrado estos eventos.

**Riesgo 2.1 Recursos insuficientes para actividades geotécnicas:** En el grupo general la probabilidad es muy baja y el impacto medio. En el grupo experto la probabilidad es baja y el impacto medio. Se observa que el grupo de expertos ha participado en proyectos donde los recursos son insuficientes para las actividades geotécnicas mientras que la mayoría de las personas en el grupo general no han tenido este evento. Aun así, el impacto estimado en cronograma es igual.

**Riesgo 3.4 Comunicación deficiente de riesgos entre los interesados y etapas:** En el grupo general la probabilidad es media y el impacto alto. En el grupo experto la probabilidad es baja y el impacto alto. Se observa que probablemente el equipo del proyecto ha evidenciado con mayor frecuencia la materialización de este riesgo al interior del proyecto que los que han ejercido como gerentes del proyecto.

**Riesgo 3.5 Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico:** En el grupo general la probabilidad es baja y el impacto medio. En el grupo experto la probabilidad es baja y el impacto alto. En este caso, el grupo experto considera que el impacto en cronograma puede ser hasta dos meses de un monitoreo y control geotécnico deficientes.

**Riesgo 4.1.2.2 Inundaciones pluviales (causadas por lluvias):** En el grupo general la probabilidad es muy baja y el impacto medio. En el grupo experto la probabilidad es baja y el impacto medio. El grupo experto ha presenciado más inundaciones pluviales, sin embargo, el impacto estimado sobre el cronograma es igual.

Teniendo en cuenta la anterior comparación, en algunos riesgos la probabilidad pasa de muy baja a baja teniendo en cuenta que los expertos han tenido mayor tiempo de exposición a la materialización de algunos riesgos.

En el caso particular del impacto en cronograma, hay variaciones muy pequeñas entre la respuesta de los dos grupos. En algunos riesgos como el 3.5, el grupo experto consideró mayor tiempo en el cronograma que el grupo general.

## 5.4 Análisis de Resultados por Etapas del Proyecto

Para la construcción de la EDR, los riesgos geotécnicos identificados se clasificaron por etapas del proyecto en los cuales se podían materializar. El grupo de riesgos 1. Riesgos Técnicos y de Calidad se divide en los subgrupos: 1.1 Riesgos Propios del Diseño, 1.2 Riesgos Propios de la

Construcción y 1.3 Riesgos Durante Operación. En los grupos 2 y 3 se encuentran los Riesgos Organizacionales y de Gestión del Proyecto que pueden ocurrir en todas las etapas de un proyecto. En este numeral se hace un análisis de la percepción de probabilidad e impacto de algunos de estos riesgos según el grupo encuestado.

### 5.4.1 Riesgos Propios del Diseño

Para los riesgos propios del diseño se obtuvo la siguiente distribución de respuestas:

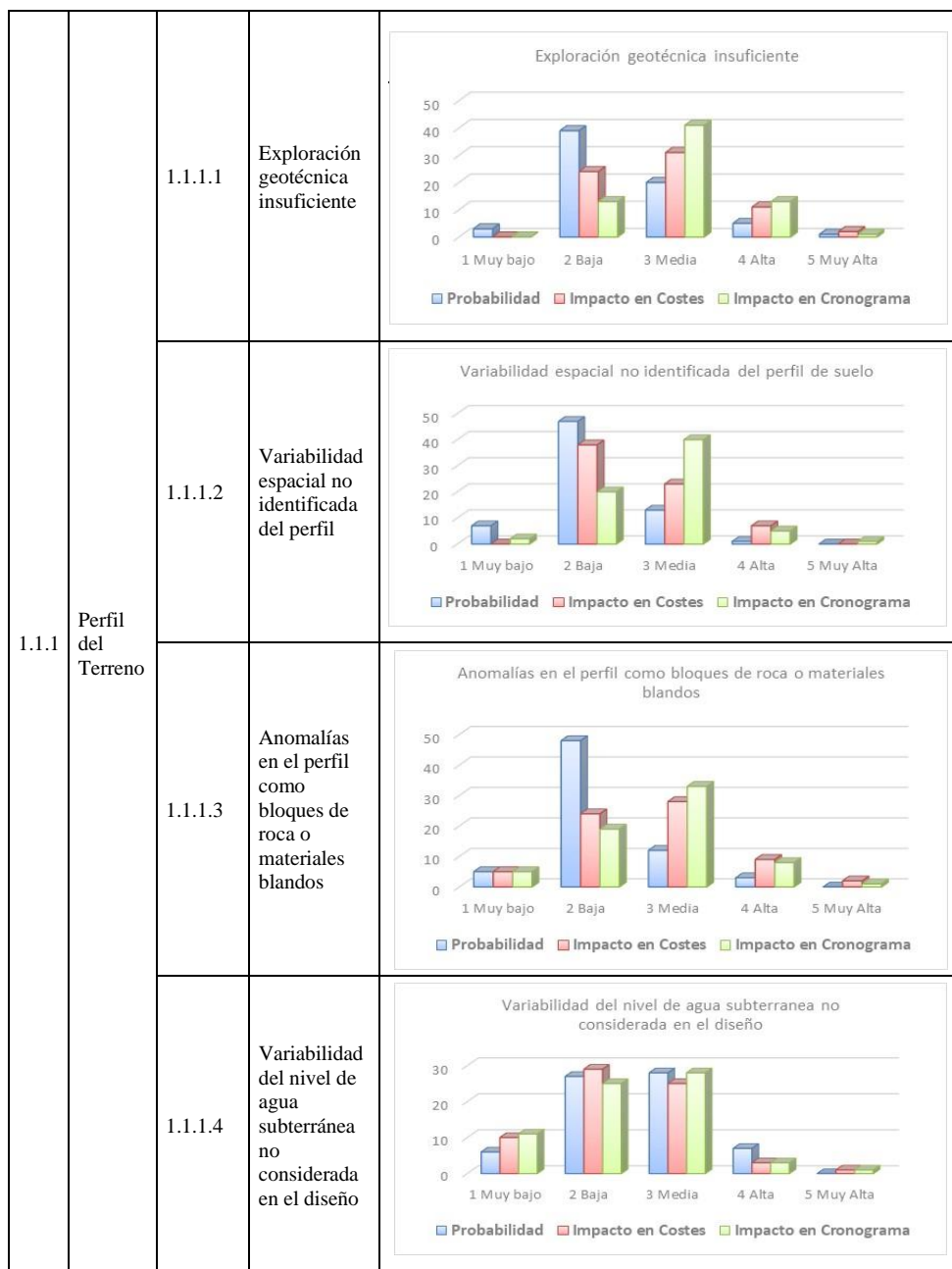
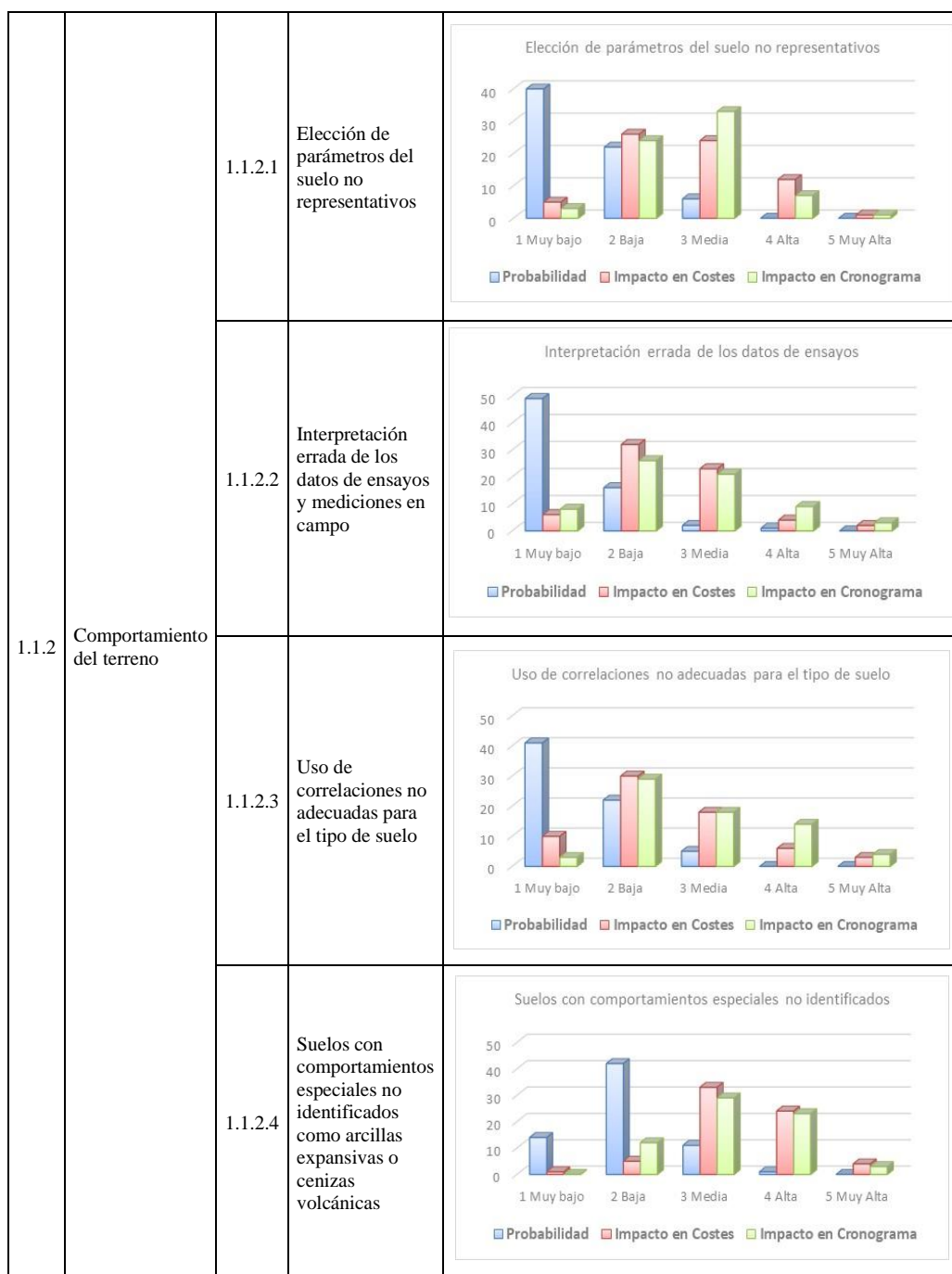


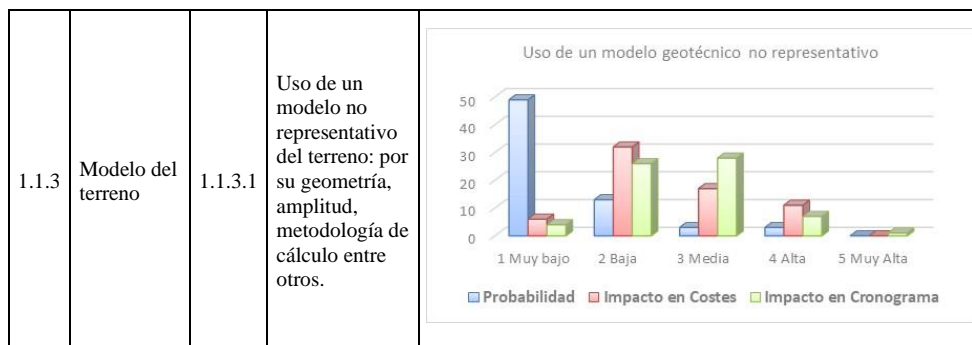
Figura 51 Respuestas Riesgos Perfil del Terreno

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 52 Respuestas Riesgos Comportamiento del Terreno**

*Fuente: Elaboración Propia*



**Figura 53 Respuestas Modelo del Terreno**

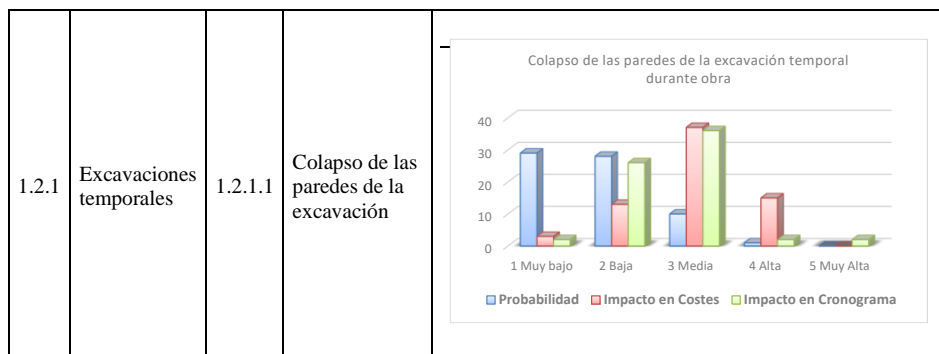
Fuente: *Elaboración Propia*

A partir de las respuestas obtenidas se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Al observar el comportamiento de la barra azul correspondiente a la probabilidad, se puede decir que la mayoría de los riesgos del perfil del terreno en la etapa de diseño se encuentran en probabilidad baja, es decir, pocas veces se han materializado en los proyectos. En cuanto a los riesgos de comportamiento del terreno y modelo del terreno, todos se encuentran en probabilidad muy baja a excepción del riesgo de Suelo con comportamientos especiales no identificados.
- En lo referente al impacto en costes representado por una barra roja, las respuestas en general se distribuyen de una manera muy similar entre el impacto bajo (5-10 % del coste del proyecto) e impacto medio (20% al 30% del coste del proyecto). Esto hace que los riesgos propios de la etapa de diseño se ubiquen en la matriz de riesgo en la zona verde y amarilla, es decir, riesgo bajo y medio. Por lo tanto, se recomienda conocerlos, planificar una posible respuesta y definir un umbral de acción que defina en qué momento llevar a cabo el plan de respuesta.
- El impacto en cronograma se representa con una barra verde. Es predominantemente medio en los riesgos relacionados con el perfil del terreno, y se encuentra entre bajo y medio para los demás riesgos durante el diseño. Esto puede indicar que el impacto en cronograma y en costes es percibido de manera muy similar por los encuestados durante la etapa de diseño del proyecto.

#### 5.4.2 Riesgos Durante Construcción

Para los riesgos durante construcción se obtuvo la siguiente distribución de respuestas:



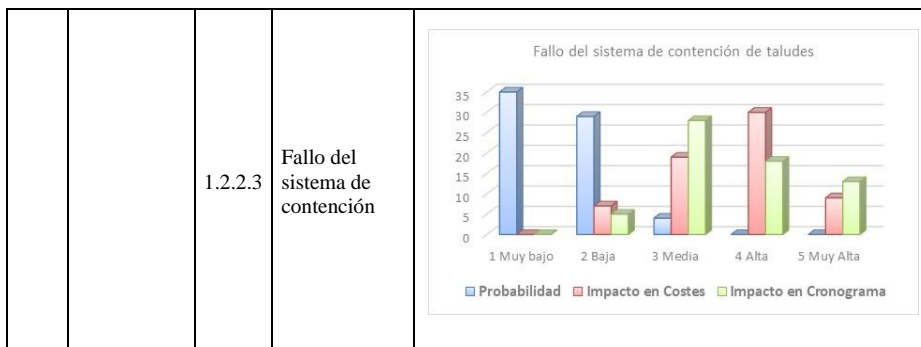


		1.2.1.2	Falla de fondo de la excavación	<p>Falla de fondo de la excavación en obra</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Probabilidad</th> <th>Impacto en Costes</th> <th>Impacto en Cronograma</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Muy bajo</td> <td>50</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2 Baja</td> <td>15</td> <td>18</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>3 Media</td> <td>5</td> <td>25</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>4 Alta</td> <td>2</td> <td>20</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>5 Muy Alta</td> <td>1</td> <td>5</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma	1 Muy bajo	50	2	2	2 Baja	15	18	12	3 Media	5	25	30	4 Alta	2	20	25	5 Muy Alta	1	5	2
Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma																									
1 Muy bajo	50	2	2																									
2 Baja	15	18	12																									
3 Media	5	25	30																									
4 Alta	2	20	25																									
5 Muy Alta	1	5	2																									
		1.2.1.3	Entrada de agua por nivel freático o precipitaciones	<p>Entrada de agua a las excavaciones por nivel freático o precipitaciones</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Probabilidad</th> <th>Impacto en Costes</th> <th>Impacto en Cronograma</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Muy bajo</td> <td>5</td> <td>15</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2 Baja</td> <td>35</td> <td>30</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>3 Media</td> <td>25</td> <td>15</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>4 Alta</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>5 Muy Alta</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma	1 Muy bajo	5	15	10	2 Baja	35	30	35	3 Media	25	15	12	4 Alta	10	15	15	5 Muy Alta	2	2	2
Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma																									
1 Muy bajo	5	15	10																									
2 Baja	35	30	35																									
3 Media	25	15	12																									
4 Alta	10	15	15																									
5 Muy Alta	2	2	2																									
		1.2.1.4	Daños a propiedades vecinas o a infraestructura enterrada	<p>Daños a propiedades vecinas o a infraestructura enterrada</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Probabilidad</th> <th>Impacto en Costes</th> <th>Impacto en Cronograma</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Muy bajo</td> <td>30</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>2 Baja</td> <td>25</td> <td>15</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>3 Media</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>4 Alta</td> <td>2</td> <td>25</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>5 Muy Alta</td> <td>1</td> <td>10</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma	1 Muy bajo	30	2	2	2 Baja	25	15	12	3 Media	10	20	20	4 Alta	2	25	20	5 Muy Alta	1	10	15
Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma																									
1 Muy bajo	30	2	2																									
2 Baja	25	15	12																									
3 Media	10	20	20																									
4 Alta	2	25	20																									
5 Muy Alta	1	10	15																									

**Figura 54 Respuestas Excavaciones Temporales**

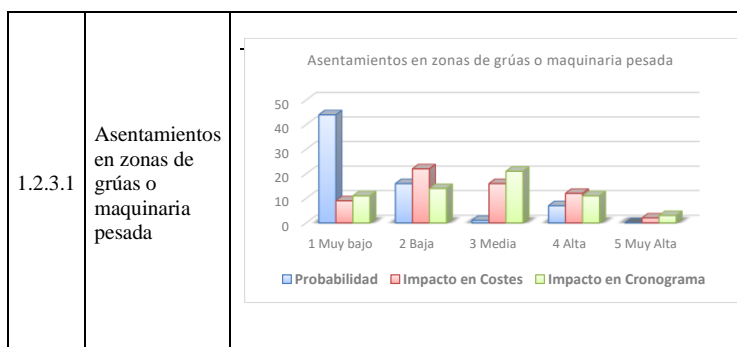
*Fuente: Elaboración Propia*

1.2.2	Taludes temporales y permanentes	1.2.2.1	Deslizamiento de taludes temporales por sobrecargas	<p>Deslizamiento de taludes temporales por sobrecargas de maquinaria</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Probabilidad</th> <th>Impacto en Costes</th> <th>Impacto en Cronograma</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Muy bajo</td> <td>45</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2 Baja</td> <td>25</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>3 Media</td> <td>5</td> <td>30</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>4 Alta</td> <td>2</td> <td>18</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>5 Muy Alta</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma	1 Muy bajo	45	5	5	2 Baja	25	15	15	3 Media	5	30	35	4 Alta	2	18	12	5 Muy Alta	1	2	2
		Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma																							
1 Muy bajo	45	5	5																									
2 Baja	25	15	15																									
3 Media	5	30	35																									
4 Alta	2	18	12																									
5 Muy Alta	1	2	2																									
1.2.2.2	Deslizamiento por lluvias o saturación del terreno	<p>Deslizamiento de taludes por lluvias o saturación del terreno</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel</th> <th>Probabilidad</th> <th>Impacto en Costes</th> <th>Impacto en Cronograma</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Muy bajo</td> <td>15</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2 Baja</td> <td>45</td> <td>12</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>3 Media</td> <td>15</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>4 Alta</td> <td>5</td> <td>20</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>5 Muy Alta</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma	1 Muy bajo	15	5	5	2 Baja	45	12	12	3 Media	15	30	30	4 Alta	5	20	20	5 Muy Alta	2	5	5		
Nivel	Probabilidad	Impacto en Costes	Impacto en Cronograma																									
1 Muy bajo	15	5	5																									
2 Baja	45	12	12																									
3 Media	15	30	30																									
4 Alta	5	20	20																									
5 Muy Alta	2	5	5																									



**Figura 55 Respuestas Taludes Temporales**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 56 Respuestas Cargas Temporales**

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las respuestas obtenidas se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Al observar el comportamiento de la barra azul correspondiente a la probabilidad, se puede decir que para la mayoría de los riesgos durante construcción es muy baja. Para algunos riesgos como Colapso en las paredes de la excavación temporal, entrada de agua a las excavaciones, daños en propiedades vecinas o deslizamiento por lluvias de taludes temporales, se puede decir que la probabilidad es muy baja a baja ya que a una gran parte de los profesionales encuestados les había ocurrido durante los proyectos realizados. En el riesgo de entrada de agua a las excavaciones, más de 20 profesionales marcaron la casilla de probabilidad media, por lo que se debe destacar que este riesgo es de los más probables de todos los riesgos geotécnicos identificados y debe ser considerado previo al inicio de esta etapa del proyecto.
- En lo referente al impacto en costes representado por una barra roja, la respuesta para la mayoría de los riesgos es media. En el riesgo Fallo del sistema de contención, este impacto se encuentra entre media y alta, siendo este y Daños a las propiedades vecinas, los riesgos de mayor impacto en costes durante construcción.
- El impacto en cronograma se representa con una barra verde. En general se observa que, para la mayoría de los riesgos, el impacto en cronograma se encuentra entre media y alta. Es decir, la ocurrencia de riesgos geotécnicos durante construcción puede llegar a tener consecuencias en el cronograma críticas para el proyecto. Para los riesgos Daños en las propiedades vecinas y Fallo en el sistema de contención de taludes, se debe considerar el alto impacto que puede tener sobre el cronograma, por lo que se debe prevenir desde el inicio del proyecto.

### 5.4.3 Riesgos Durante Operación

Para los riesgos durante construcción se obtuvo la siguiente distribución de respuestas:

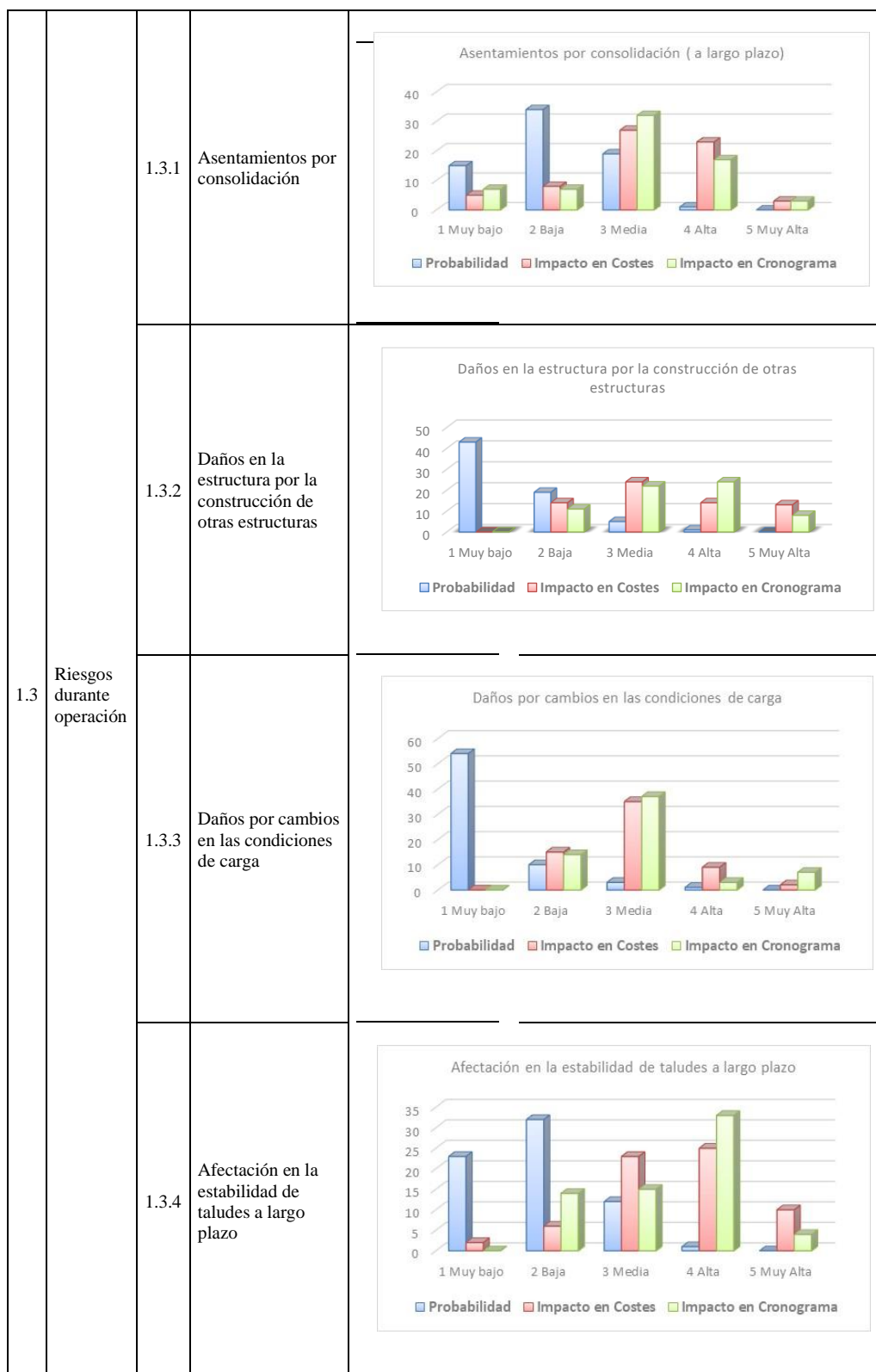


Figura 57 Respuestas Riesgos durante Operación

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las respuestas obtenidas se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Al observar el comportamiento de la barra azul correspondiente a la probabilidad, se puede decir que para la mayoría de los riesgos durante operación tienen probabilidad muy baja a baja. Los riesgos de Asentamientos por consolidación y Afectación de la estabilidad de taludes a largo plazo han ocurrido durante la experiencia profesional de los encuestados.
- En lo referente al impacto en costes representado por una barra roja, la respuesta para la mayoría de los riesgos es media a alta. El mayor impacto en costes se presenta en el riesgo Afectación en la estabilidad de taludes a largo plazo, por lo que debe considerarse desde las primeras etapas del proyecto.
- El impacto en cronograma se representa con una barra verde. En general se observa que, para la mayoría de los riesgos, el impacto en cronograma se encuentra entre media y alta. El mayor impacto en cronograma se encuentra también en el riesgo Afectación en la estabilidad de taludes a largo plazo.

#### 5.4.4 Riesgos Organizacionales y de Gestión de Proyectos

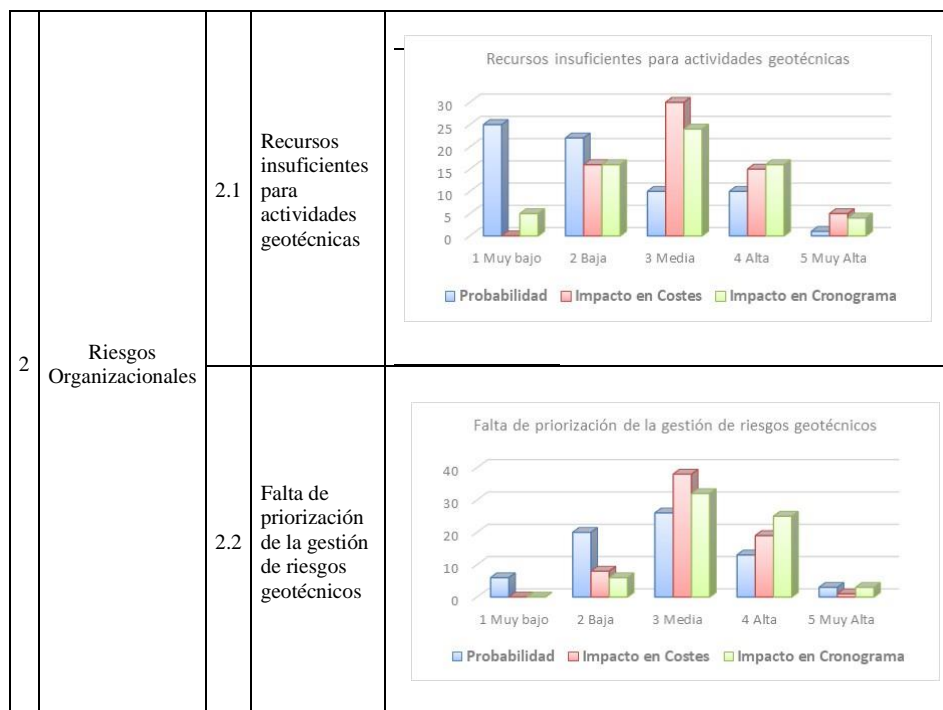
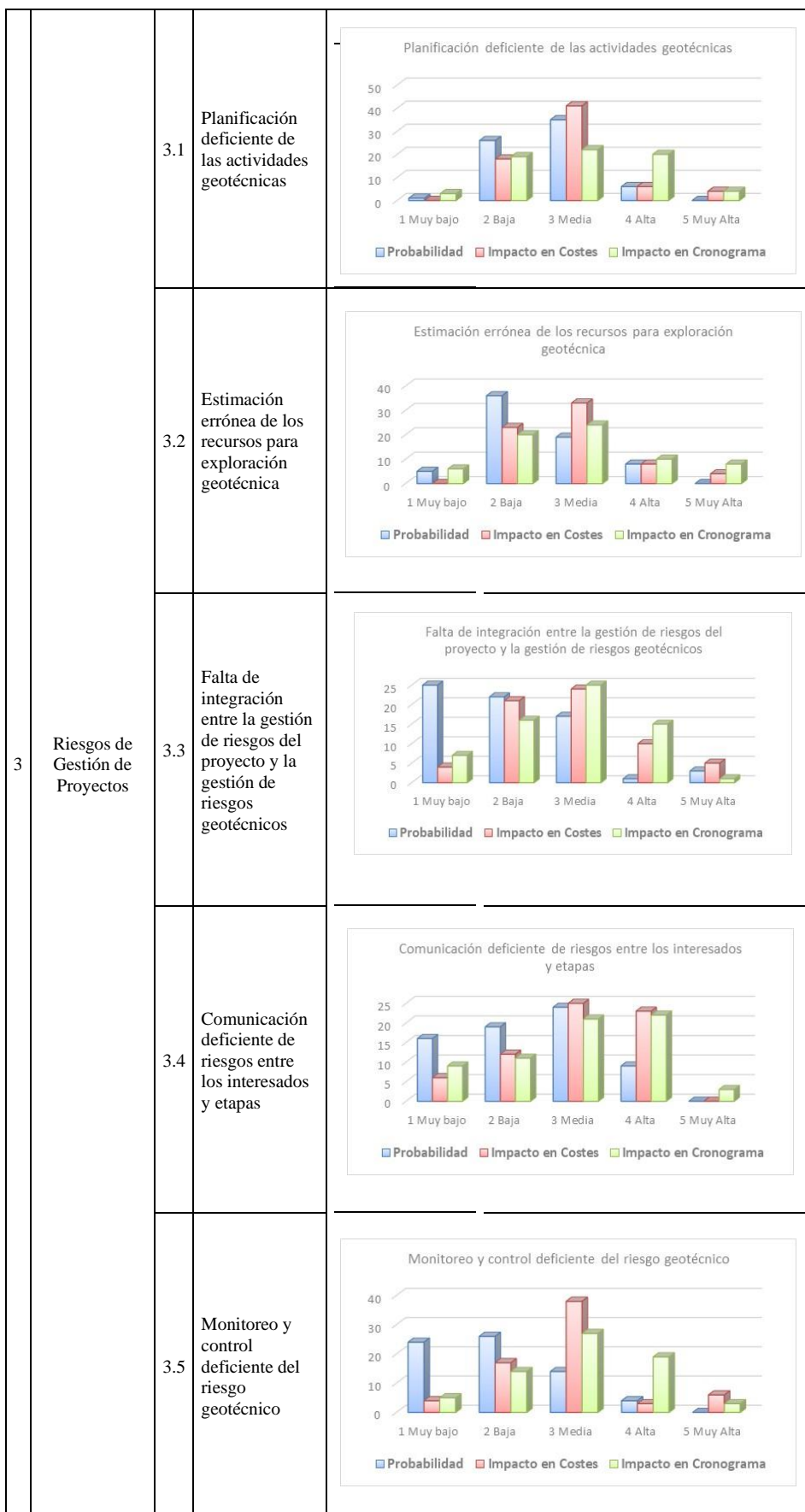


Figura 58 Respuestas Riesgos Organizacionales

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 59 Respuestas Riesgos de Gestión de Proyectos**  
Fuente: Elaboración Propia



A partir de las respuestas obtenidas se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Al observar el comportamiento de la barra azul correspondiente a la probabilidad, se puede decir que para la mayoría de los riesgos durante operación tienen probabilidad muy baja a baja o baja a media. Dentro de este grupo de riesgos, el más probable según los encuestados es la Planificación deficiente de las actividades geotécnicas.
- En lo referente al impacto en costes representado por una barra roja, la respuesta para la mayoría de los riesgos es media. Para el riesgo Planificación deficiente de las actividades geotécnicas y Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico, casi 40 personas en cada uno indicaron que el riesgo es medio para los costes. Estos dos serían los riesgos más críticos en este caso.
- El impacto en cronograma se representa con una barra verde. En general se observa que, para la mayoría de los riesgos el impacto en cronograma es de medio a alto. Los riesgos críticos para el cronograma serían en este caso Planificación deficiente de las actividades geotécnicas y Monitoreo y control deficiente del riesgo geotécnico.

## Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

- La gestión de riesgos en un proyecto es parte integral de todos los procesos de la organización. Adicionalmente, es parte de la toma de decisiones informadas conociendo la incertidumbre de manera explícita. En el caso de los riesgos geotécnicos en la primera etapa de diseño, se calcula cada riesgo identificado de manera que sea menor o igual al riesgo admisible. En la etapa de diseño para construcción o diseño detallado se reciben los riesgos transferidos de la primera etapa y se hace una determinación detallada cualitativa y cuantitativa para la definición de las estrategias de respuesta a cada riesgo. Dependiendo del tipo de contrato, se definen riesgos a transferir en el proceso de licitación, traducidos en requerimientos de la licitación en cuanto a experiencia previa, exploración adicional, monitoreo de riesgos entre otros. Adicionalmente, se incluyen cláusulas de gestión del riesgo asociadas al contrato de construcción y su gestión del riesgo con medidas de acompañamiento de geólogos y/o geotecnistas, mitigación de riesgos y detección de nuevos riesgos. Finalmente, durante la operación, la GRG se asocia al monitoreo y control de los riesgos transferidos durante las etapas de diseño y construcción al promotor del proyecto.
- La integración entre la GRG y la GR es fundamental en todas las etapas del proyecto e implica la identificación y estudio conjunto de los riesgos asociados a las condiciones geotécnicas del sitio y demás riesgos inherentes al proyecto. Para lograrlo, es necesario que el equipo de geotecnistas y geólogos tenga una comunicación constante y efectiva con el equipo de gestión del proyecto en todos los procesos de gestión del riesgo.
- La comprensión de los tres elementos principales: perfil del Terreno, comportamiento del terreno y modelo del terreno, permite una visión completa de la situación geológica y geotécnica de un proyecto, así como la identificación explícita de los elementos que generan incertidumbre, los cuales que se pueden traducir en riesgos para el proyecto durante las siguientes etapas.
- En la Fase 1 del estudio fue posible crear una EDR de los riesgos geotécnicos generales en España a partir de investigación bibliográfica. Además, se logró determinar los niveles de exposición a estos riesgos dependiendo de la localización del proyecto de acuerdo con mapas que caracterizan el territorio.
- En la Fase 2, se hizo un estudio de casos en los cuales se han materializado uno o varios riesgos geotécnicos a lo largo de las etapas del proyecto y permite plantear posibles acciones correctivas que se pudieron realizar para mitigar el impacto de los riesgos o prevenir su ocurrencia. Se utilizó como herramienta principal el árbol de fallo para identificar las causas de un suceso catastrófico:
  - Para el primer caso de estudio de la Presa de Yesa se concluye que no se encontró en ninguno de los documentos un análisis cualitativo de los riesgos mediante una matriz de probabilidad impacto o similar. Este proceso pudo ser útil para clasificar las respuestas a los diferentes riesgos del proyecto y enfocar los planes de emergencia hacia los riesgos de mayor probabilidad e impacto.
  - Se han hecho múltiples análisis cuantitativos de sensibilidad con los datos de exploración geotécnica y geológica de la ladera. Con estos análisis se ha podido dar solución temporal a la mayoría de los deslizamientos antes de que generen consecuencias catastróficas sobre la presa.
  - Para el segundo caso del estudio estudio la identificación temprana de riesgos era un aspecto fundamental para evitar todos los daños generados, incluso desde el momento de evaluar la viabilidad del proyecto posiblemente hubiera permitido replantear su ubicación.
  - Al ser una zona donde históricamente se han presentado deslizamientos de gran magnitud, se pudo utilizar en el proyecto la técnica de revisión de documentación histórica en la cual se han delimitado las zonas más inestables y las principales superficies de falla.

- Adicionalmente, se elaboran encuestas encaminadas a determinar la probabilidad y el impacto que tienen los riesgos geotécnicos en un proyecto de obra civil en España. Los resultados llevan a las siguientes conclusiones:
  - Para la matriz de impacto en costes del proyecto se puede concluir que ninguno de los riesgos geotécnicos está en la zona roja de mayor probabilidad e impacto. Varios de los riesgos se encuentran en la zona amarilla de riesgo medio, lo que implica que es necesario implementar alguna estrategia de manejo como escalar, evitar, transferir, mitigar o aceptar, dependiendo de la naturaleza del proyecto.
  - Para la matriz de impacto en cronograma la mayoría de riesgos han ocurrido con probabilidad baja en los proyectos en los que han participado los expertos pero con impacto medio sobre el cronograma, es decir, de 2 semanas a 1 mes.
- Comparando las matrices de impacto en coste e impacto en cronograma para el grupo general y para un grupo experto, se observó lo siguiente:
  - A partir de la comparación de las matrices de impacto en costes, se puede concluir que el grupo general tiene una percepción más baja de la probabilidad y el impacto de los riesgos geotécnicos propios del diseño que el grupo experto, este es el caso del riesgo 1.1.2.4.
  - Por otra parte, los riesgos organizacionales y de gestión de proyectos son percibidos como menos probables y de impacto en costes más bajo para las respuestas del grupo experto que para el grupo general.
  - Finalmente, los riesgos externos como sismos e inundaciones fueron en su mayoría percibidos como de mayor impacto por el grupo experto, pero con la misma probabilidad que el grupo en general.
  - En el caso particular del impacto en cronograma, hay variaciones muy pequeñas entre la respuesta de los dos grupos. En algunos riesgos como el 3.5, el grupo experto consideró mayor tiempo en el cronograma que el grupo general.
- Con respecto a los riesgos en las diferentes etapas del proyecto se puede concluir:
  - Se considera en general que los riesgos geotécnicos propios de la etapa de construcción, organizacionales y de gestión de proyectos pueden llegar a tener un mayor impacto sobre el coste y el cronograma del proyecto. Sin embargo, un error en el diseño puede desencadenar consecuencias catastróficas en etapas posteriores del proyecto, como ocurrió en los casos de estudio investigados en este trabajo. Por lo tanto, la detección de riesgos geotécnicos y su comunicación e integración con la gestión de riesgos del proyecto son procesos fundamentales en las etapas iniciales del proyecto y deben ser iterativos a lo largo de su ciclo de vida.



## Capítulo 7. Bibliografía

- Acciona Ingeniería. (2013). *PROYECTO DE DEMOLICIÓN DE LAS URBANIZACIONES Y ACONDICIONAMIENTO DE LA LADERA DEL ESTRIBO DERECHO DE LA PRESA DE YESA. T.M. DE YESA (NAVARRA). CLAVE 09.123.247/2111.*
- Ángela Guadalupe Canto de Gante, L., Elim Sosa González, W., Bautista Ortega, J., Judith Escobar Castillo, I., & Santillán Fernández, A. (2020). Escala de Likert: Una alternativa para elaborar e interpretar un instrumento de percepción social. *Alta Tecnología y Sociedad*, 38(1).
- Augusto, C., Montoya, H., & Pacheco De Assis, A. (2011). *HERRAMIENTAS PARA ANÁLISIS POR CONFIABILIDAD EN GEOTECNIA: LA TEORÍA* (Vol. 10, Issue 18).
- Ayuntamiento De Almuñécar. (2020). *PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN Agaz [ ingenia ]*.
- Ayuntamiento de Sangüesa/Zangoza. (2023, May). *VALORACIÓN DEL «DICTAMEN FINAL SOBRE LA SEGURIDAD DE LAS OBRAS DEL RECRECIMIENTO DE LA PRESA DE YESA, CON ATENCIÓN ESPECIAL A LA LADERA DERECHA».*
- Bernardo, L., & González, R. (2019). *Ingeniería Forense; algunos casos de la Ciudad de México the Creative Commons Attribution Non-Commercial License 4.0 (CC BY-NC 4.0).* <https://doi.org/10.3233/STAL190334>
- España. Dirección General de Carreteras. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera.* Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones.
- Esteban, F., Merino, M., Romero-Iribas, F., & Lechón, A. (2022). *ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA DEL ESTRIBO DERECHO DE LA PRESA DE YESA (NAVARRA).*
- Fnca, ©. (2014). *RECRECIMIENTO DE YESA: UNA APUESTA POR EL PASADO QUE OLVIDA EL FUTURO.*
- Henderson, T. O., Pickles, A. R., Henderson, T. O., & Pickles Ma, A. R. (n.d.). *Geotechnical management on major infrastructure projects.*
- Hruškovič, P. (2011). *MÉTODO PARA IDENTIFICAR CAUSAS DE PROBLEMAS TÉCNICOS DE PROYECTO GEOTÉCNICO TESIS DOCTORAL.*
- La Presidencia, M. DE, & Con Las Cortes Memoria Democrática, R. Y. (2021). *Real Decreto 264/2021.* <https://www.boe.es>
- Mamani Roque, M. (2022). *Control Geotecnico en Minería a TajoAbierto.*
- Martin van Staveren. (2013). *ISSMGE International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering TC304-Engineering Practice of Risk Assessment and Management INTERNATIONAL STATE OF THE ART REPORT ON INTEGRATION OF GEOTECHNICAL RISK MANAGEMENT AND PROJECT RISK MANAGEMENT PART 2-COUNTRY REPORTS PREPARED BY.* <https://doi.org/10.53243/R0005V2>
- Martinez-Bofill, J. (n.d.). *MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO ACTUALIZADO DE LA LADERA DEL ESTRIBO DERECHO DE LA PRESA DE YESA (NAVARRA) JOSÉ MOYA (1), FERNANDO ROMERO-IRIBAS (2), ANA LECHÓN (2).*
- Mateos, R. M., Azañón, J. M., Roldán, F. J., Notti, D., Pérez-Peña, V., Galve, J. P., Pérez-García, J. L., Colomo, C. M., Gómez-López, J. M., Montserrat, O., Devantèry, N., Lamas-Fernández, F., & Fernández-Chacón, F. (2017). The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). *Landslides*, 14(2), 743–754. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0723-5>



- Ministerio de Fomento. (2009). *NORMA SISMORRESISTENTE*.
- Ministerio de la Presidencia. (2010). *Real Decreto 903/2010*.
- Phoon, K. K., Cao, Z. J., Ji, J., Leung, Y. F., Najjar, S., Shuku, T., Tang, C., Yin, Z. Y., Ikumasa, Y., & Ching, J. (2022). Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. *Soils and Foundations*, 62(5). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101189>
- Phoon, K.-K., & Ching, J. (n.d.). *Risk and reliability in geotechnical engineering*.
- Porter, M., Lato, M., Quinn, P., & Whittall, J. (2019). *Challenges with use of risk matrices for geohazard risk management for resource development projects*. 71–84. [https://doi.org/10.36487/acg\\_rep/1905\\_01\\_porter](https://doi.org/10.36487/acg_rep/1905_01_porter)
- Sociedad Geológica de España. (2016). *Movimientos de ladera en la Costa de Almuñécar y su entorno*.
- Stake, R. E. (1998). *Investigación con estudio de casos*.
- Tidlund, Mats. (2021). *Geotechnical risk management using the observational method*.
- Victor Yepes Piqueras. (2021, December 20). <https://victoryepes.blogs.upv.es/>. ¿Cuántas Respuestas Son Necesarias En Una Encuesta? Pues Depende.



**ANEXOS.**

**ANEXO 1. CUADRO DE RIESGOS DE ESPAÑA**

**ANEXO 2. RIESGO DE INUNDACIÓN**

**ANEXO 3. RESULTADOS ENCUESTAS GESTIÓN DEL RIESGO GEOTÉCNICO**



**ANEXO 1. CUADRO DE RIESGOS DE ESPAÑA**



## **ANEXO 2. RIESGO DE INUNDACIÓN**



### **ANEXO 3. RESULTADOS ENCUESTAS GESTIÓN DEL RIESGO GEOTÉCNICO**