

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL  
AMBIENTE (IAEG)

COMISIÓN IAEG 25 PUBLICACIÓN N.º 1

## **Directrices para el desarrollo y aplicación de modelos geológico-ingenieriles en proyectos**

*Patrocinador de la traducción*

Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (Sección 1).

Asociación Mexicana de Riesgos Hidrogeológicos (Sección 2).

*Traducción*

Norberto Jorge Bejerman (Sección 1).

Víctor Manuel Hernández-Madrigal (Sección 2).

*Revisores*

Julia Löffler y María Paula Bunicocontro (Sección 1).

Norberto Jorge Bejerman, María Paula Bunicocontro y Julia Löffler (Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería) (Sección 2).

*Autores principales*

Fred Baynes and Steve Parry

*Editores Principales*

Martin Culshaw and Jim Griffiths

*Autores y editores colaboradores*

Wayne Barnett, Jorge Bejerman, Anthony Bowden, Richard Brehaut, Joe Cant, Trevor Carter, Dafydd Chandler, Roberto Cravero, Martin Culshaw, Antonio Dematteis, Yogendra Deva, Diego Dicurzio, David Dobson, Jia-Jyun Dong, Mark Eggers, Peter Fair, Robin Fell, Phil Flentje, Andrew Forsythe, Martin Griffin, Jim Griffiths, Bill Haneberg, Nizam Hasan, Chris Jack, Graeme Jardine, Stratis Karantanellis, Aliko Kokkala, Christoph Kraus, Teemu Lindqvist, Robert MacKean, Vassilis Marinos, Stuart Millis, Tim Nash, Judith Nathanail, Paul Nathanail, Simon Nelis, Alicia Newton, Jan Novotny, Darren Paul, Alistair Schofield, David Shilston, Ian Shipway, Doug Stead, Keith Turner, Giovanna Vessia, David Waring, Felicia Weir, Ann Williams, Erik Wunder

*Referencia bibliográfica*

Baynes, F. J. and Parry, S. 2022. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication



No. 1, 129 pp.

Se puede descargar en <https://www.iaeg.info/C25EGMGuidelines/>

Los derechos de autor son propiedad de IAEG, excepto algunas figuras que fueron publicadas por primera vez por otros. No puede copiar ni adaptar esta publicación sin obtener permiso previo. Póngase en contacto con el Secretario General de IAEG en [iaegsg@163.com](mailto:iaegsg@163.com). Puede citar extractos de una extensión razonable sin permiso previo, siempre que se dé pleno reconocimiento de la fuente del extracto.

# Directrices para el desarrollo y aplicación de modelos geológico-ingenieriles en proyectos

Documento elaborado por el Grupo de Trabajo de la Comisión 25 de IAEG

Versión	Fecha	Estado legal	Elaborado por
IAEG C25 EGM Guidelines v1.0.pdf	14 de Diciembre de 2022	Directrices & Ejemplos v1.0	Fred Baynes & Steve Parry

**La Asociación Internacional de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, los autores, los editores y los colaboradores no hacen ninguna declaración de ningún tipo con respecto a la integridad, idoneidad o utilidad de la información contenida en este documento. Quienes utilizan estas Directrices son responsables de tomar sus propias decisiones al aplicar la información proporcionada en las mismas.**

# Índice

INTRODUCCIÓN	7
Antecedentes	8
<b>I CLÁUSULAS DE RECOMENDACIONES</b>	<b>9</b>
<b>I.1 PRINCIPIOS DEL DESARROLLO DE MODELOS GEOLÓGICO-INGENIERILES</b>	<b>10</b>
I.1.1 Definiciones	10
I.1.2 Principios Fundamentales	11
<b>I.2 PROCESO DE DESARROLLO DE UN EGM</b>	<b>15</b>
I.2.1 Descripción general del proceso de desarrollo	15
I.2.2 Elección del nivel de desarrollo del EGM	16
I.2.3 Detalles del proceso de desarrollo	20
I.2.4 EGM y Eurocódigo	26
<b>I.3 ARMADO Y COMUNICACIÓN DEL EGM</b>	<b>27</b>
I.3.1 Introducción	27
I.3.2 Resumen para la documentación de los componentes del EGM	27
I.3.3 Participación en las adquisiciones del proyecto	27
I.3.4 Informes del EGM	28
I.3.5 Creando y visualizando un modelo digital 3D	30
<b>I.4 GESTIÓN DE INCERTIDUMBRE DEL EGM</b>	<b>35</b>
I.4.1 Introducción	35
I.4.2 Fuentes de incertidumbre	35
I.4.3 Evaluación holística de la confiabilidad del EGM mediante revisión	35
I.4.4 Otros métodos de determinación de la incertidumbre y confiabilidad del EGM	35
<b>I.5 ASEGURANDO LA CALIDAD DEL EGM</b>	<b>38</b>
I.5.1 Controlando la calidad del proceso de desarrollo del EGM	38



<b>2</b>	<b>COMENTARIOS</b>	<b>39</b>
2.1	PRINCIPIOS DEL DESARROLLO DE MODELOS GEOLÓGICO-INGENIERILES	40
2.1.1	Definiciones	40
2.1.2	Principios Fundamentales	40
2.2	PROCESO DE DESARROLLO DE UN EGM	41
2.2.1	Descripción general del proceso de desarrollo	41
2.2.2	Elección del nivel de desarrollo del EGM	42
2.2.3	Detalles del proceso de desarrollo	42
2.2.4	EGM y Eurocódigo	52
2.3	ARMADO Y COMUNICACIÓN DEL EGM	53
2.3.1	Introducción	53
2.3.2	Resumen para la preparación de los componentes del EGM	53
2.3.3	Implicaciones en la adquisición del proyecto	53
2.3.4	Informes del EGM	53
2.3.5	Creando y visualizando un modelo digital 3D	57
2.4	GESTIÓN DE INCERTIDUMBRE DEL EGM	66
2.4.1	Introducción	66
2.4.2	Fuentes de incertidumbre	68
2.4.3	Evaluación holística de la confiabilidad del EGM mediante revisión	69
2.4.4	Otros métodos de evaluación de la incertidumbre y confiabilidad del EGM	69
2.5	GARANTIZANDO LA CALIDAD DEL EGM	74
2.5.1	Objetivos generales de la calidad del EGM	74
2.5.2	Controlando la calidad del proceso de desarrollo del EGM	74
2.6	INGENIERÍA DE PROYECTO Y EGM	76
2.6.1	Generalidades	76
2.6.2	Generalidades de las etapas del proyecto y del EGM	76



2.6.3	El EGM en las investigación in situ	77
2.6.4	El EGM en el análisis y diseño	78
2.6.5	El EGM en la gestión de la construcción	80
2.7	REFERENCIAS	81

# Directrices para el desarrollo y aplicación de modelos geológico-ingenieriles en proyectos

## INTRODUCCIÓN

El propósito de estas Directrices es brindar asesoramiento conciso, práctico, accesible y autorizado sobre el uso eficaz de los Modelos Geológico-Ingenieriles en una amplia gama de aplicaciones que incluyen ingeniería civil, minería, estudios de riesgos geológicos, estudios marinos, planificación del uso del suelo y evaluaciones ambientales. Las Directrices son de amplio alcance y están destinadas a ser utilizadas o referenciadas por las partes interesadas en proyectos de todas las escalas que interactúan con el terreno o requieren una comprensión del mismo. La intención es que tengan aplicación mundial.

Un Modelo Geológico-Ingenieril (EGM) proporciona un marco de conocimiento integral que respalda la interpretación y evaluación de las condiciones geológico-ingenieriles y permite evaluar la interacción de estas condiciones con el proyecto propuesto, de modo que se puedan tomar decisiones de ingeniería apropiadas durante todo el ciclo de vida del proyecto desde su inicio hasta su desmantelamiento. Al adoptar esta definición, la intención es ir más allá del concepto de que un "modelo" es una representación tridimensional simplificada y estática de las condiciones del terreno y reconocer que la formación y el desarrollo del EGM es un proceso continuo de recopilación/integración de conocimientos que proporcionan dirección y control a la ingeniería de terreno a lo largo de un proyecto.

Las Directrices se han desarrollado para orientar a los profesionales sobre el "enfoque EGM", incluidas las técnicas de modelado digital 3D, y para informar a consultores, clientes, propietarios, organismos gubernamentales y reguladores sobre el uso de modelos geológico-ingenieriles en proyectos.

Las Directrices fueron desarrolladas por miembros de la IAEG C25 (Comisión para el uso de modelos geológico-ingenieriles) e integran las opiniones consensuadas de quienes colaboraron.

Se pretende que estas Directrices se traduzcan a otros idiomas para su difusión internacional dentro de la comunidad de ingeniería del terreno. Las Directrices serán revisadas después de transcurrido un año en respuesta a los comentarios en diferentes partes del mundo.

Las Directrices comprenden tres partes:

1. Cláusulas de Recomendaciones para el desarrollo de EGM (Parte 1). Las Cláusulas de Recomendaciones indican cómo se debe desarrollar un EGM apropiado para cualquier proyecto que interactúe con el terreno.
2. Comentarios a las Cláusulas de Recomendaciones (Parte 2). El Comentario proporciona información de respaldo adicional, cuando sea necesario, para cada Cláusula de Recomendaciones y está estructurado con la misma numeración de párrafos para facilitar la referencia; Se proporcionan enlaces con hipervínculo cuando sea relevante.
3. Ejemplos de aplicaciones de EGM (Parte 3). Los ejemplos proporcionan descripciones generales de la aplicación de EGM diferentes tipos de proyectos.

Notas:

1. El objeto de estas Directrices es proporcionar información y ayudar en la toma de decisiones. Las Directrices no pretenden definir un estándar de trabajo.
2. Las Directrices no deben interpretarse como un curso de acción o procedimiento para la construcción

de modelos, ya que puede haber variaciones en el enfoque y el método para tener en cuenta las necesidades específicas de la geología ingenieril y del proyecto.

## Antecedentes

El uso de "modelos" en ingeniería geológica fue discutido por Zaruba y Mencl (1954 en checo) y Morgenstern y Cruden (1977), aunque la primera vez que se creó una sección transversal del terreno para ilustrar las condiciones geológicas para un proyecto de ingeniería fue, posiblemente, el primer modelo geológico-ingenieril. Un ejemplo es el trabajo de William Smith y el desarrollo de mapas geológicos y secciones asociadas con la construcción de canales en el Reino Unido en el siglo XVIII. Fookes (1997) llevó la idea de modelos en geología-ingenieril a una audiencia más amplia, pero se refirió a los modelos simplemente como modelos geológicos. Fookes *et al.* (2000) refinaron el enfoque para incluir el concepto de "historia geológica total", es decir, que las características ingenieriles del terreno son el resultado de toda la historia geológica y geomorfológica del área. Knill (2003) sugirió que un "modelo geológico" es por sí solo inadecuado para fines de ingeniería porque la definición de las condiciones de ingeniería dentro del terreno natural no es suficiente ni ayuda a realizar un proyecto. Planteo que era más útil pensar en modelos geológicos, modelos del terreno y modelos geotécnicos, relacionándose el tipo de modelo con la progresión del proyecto. Bock *et al.* (2004) proporcionaron una perspectiva sobre la relación entre las disciplinas de la geología ingenieril, la mecánica de suelos y la mecánica de rocas, las áreas de interés de las sociedades científicas internacionales asociadas y la naturaleza de los modelos geológicos y los modelos terrestres.

La Comisión C25 de la IAEG publicó un informe provisional (Parry *et al.*, 2014) que definía un modelo como "una aproximación de la realidad creada con el propósito de resolver un problema", esbozaba una metodología para desarrollar modelos geológico-ingenieriles, diferenciaba lo conceptual y lo observacional del proceso y proporcionó ejemplos. Este enfoque se ha adoptado en directrices recientes (por ejemplo, The Geological Society, Londres, Engineering Geology Special Publication, 28, para terrenos glaciares y periglaciales, Giles *et al.*, 2017). Sin embargo, el enfoque C25 aún no se ha incorporado a las normas nacionales e internacionales.

Baynes *et al.* (2021) ampliaron el informe provisional del C25 y enfatizaron que el EGM es un marco de conocimiento que se puede utilizar para comprender y comunicar todo lo que se sabe sobre la información geológica y de ingeniería asociada en cualquier etapa de un proyecto.

Las Directrices actuales fueron desarrolladas por miembros de la IAEG C25 (Comisión para el Uso de Modelos Geológico-Ingenieriles) después de la 12.<sup>a</sup> Conferencia Regional Asiática de la IAEG en 2019 en Jeju, Corea del Sur. Se presentó un primer borrador en la Tercera Conferencia Regional Europea del IAEG en Atenas en octubre de 2021. Posteriormente, se revisaron las Directrices en función de los comentarios recibidos durante y después de la reunión de Atenas, incluida una contribución del IAEG C28 - Comisión para la Cuantificación de la Confiabilidad del Modelo Geológico en Grandes Proyectos de Ingeniería Civil.



# **Directrices para el desarrollo y aplicación de modelos geológico-ingenieriles en proyectos**

## **I CLÁUSULAS DE RECOMENDACIONES**

## I.I PRINCIPIOS DEL DESARROLLO DE MODELOS GEOLÓGICO-INGENIERILES

### I.I.1 Definiciones

Los términos importantes que se usan en estas Directrices son definidos aquí; otros términos se definen cuando aparecen en el texto.

- Modelo – una aproximación de la realidad creada a los fines de solucionar un problema.
- Geología ingenieril – La aplicación del conocimiento Geológico, geomorfológico e hidrogeológico a la ingeniería.
- Modelo Geológico Ingenieril (EGM) – un marco de conocimiento integral que permite la evaluación e interpretación de las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas que podrían impactar un proyecto y sus características ingenieriles. El EGM comprende tanto componentes conceptuales como observacionales y puede ser integrado por varios modelos y enfoques interrelacionados. El Modelo Geológico, el Modelo Geotécnico y una Evaluación de Riesgos Geológicos son salidas del marco de conocimiento del EGM.
- Modelo Conceptual – un modelo basado principalmente en conceptos e interpretaciones geológico-ingenieriles y en el conocimiento que ciertas condiciones y procesos geológico-ingenieriles tengan determinadas características de ingeniería.
- Modelo Observacional – un modelo basado principalmente en observaciones y mediciones geológicas y de ingeniería que están limitadas en el espacio por datos 3D (xyz) o en espacio y tiempo por datos 4D (xyz más tiempo). Cada vez más, el modelo observacional se desarrolla dentro de un entorno digital.
- Unidades Geológico-ingenieriles – volúmenes del terreno con una historia geológica similar y características ingenieriles similares que se establecen en el contexto de la ingeniería del proyecto.
- Mapeo geológico ingenieril – de ingeniería: la preparación de un mapa que representa la distribución y los límites de la superficie de las unidades Geológico-ingenieriles, estructuras geológicas, geomorfología y condiciones hidrogeológicas significativos para el proyecto utilizando una simbología apropiada realizada a una escala y nivel de detalle determinados por el propósito del mapeo, que podría abarcar desde la evaluación de recursos regionales hasta la confirmación de las condiciones de la fundación.
- Modelo Geológico – el resultado del sistema de conocimiento del EGM que representa la distribución en el espacio 3D de las unidades geológico-ingenieriles, las condiciones hidrogeológicas y los procesos geológicos y geomorfológicos.
- Modelo Geotécnico – el resultado del sistema de conocimiento del EGM que proporciona las características ingenieriles y/o parámetros geotécnicos de aspectos relevantes del Modelo Geológico.
- Modelo Analítico – una simplificación del Modelo Geotécnico desarrollado a los fines de la evaluación ingenieril, el análisis o el diseño.
- Modelo Digital – recopilación y presentación de datos dentro de un entorno de software para permitir la visualización, interpretación y ayuda en la comunicación de partes del EGM, siendo cada vez más habitual que se lo desarrolle en 3D.
- Visualización Digital – la salida de un modelo digital, generalmente una visualización gráfica en 2D o 3D parcial de los datos.
- Modelo del terreno – tipo de modelo, a menudo especificado como un entregable en contratos o

requerido por Normas, que proporciona un resumen de la comprensión de las condiciones del terreno y del agua subterránea en un sitio en un momento específico. Puede incluir parámetros geotécnicos para las diversas unidades contenidas. El significado de este término varía en diferentes códigos y normas.

- Riesgos geológicos – procesos o fenómenos geológicos y geomorfológicos que pueden afectar negativamente a un proyecto, por ejemplo, desarrollo kárstico, deslizamientos de terreno, minería subterránea, gas subterráneo, actividad sísmica, etc.
- Proyecto – el propósito para el cual se desarrolla el EGM. Los EGM se utilizan comúnmente para evaluar la respuesta del terreno a un proyecto de ingeniería, pero también se utilizan para aplicaciones más amplias, como la evaluación de recursos naturales, evaluaciones de riesgos geológicos regionales, etc.

### 1.1.2 Principios fundamentales

#### 1.1.2.1 El EGM evalúa las interacciones entre el Proyecto y el terreno.

El objetivo del EGM es evaluar la respuesta del terreno a los cambios y habitualmente incluye las posibles interacciones entre el proyecto y el terreno. Un EGM efectivo debe anticipar lo que podría pasar en el terreno y cómo el terreno responderá al proyecto.

#### 1.1.2.2 El marco del conocimiento del EGM

El marco de conocimiento del EGM representa el conocimiento de las condiciones geológicas que son de importancia ingenieril para el proyecto y que pueden usarse para resolver problemas ingenieriles (Figura 1-1). El EGM no es un 'modelo' sino múltiples modelos dinámicos, además de integrar los datos fundamentales (si no se encuentran dentro de los propios modelos), la documentación de respaldo (por ejemplo, los informes de investigación del sitio) y el conocimiento: marco que mantiene unidos estos componentes. Siempre que sea práctico, el EGM debe basarse en todos los conocimientos disponibles y relevantes, debe construirse lógicamente siguiendo los principios establecidos en estas Directrices, debe construirse en base a las condiciones geológicas relevantes y las características ingenieriles de importancia para el proyecto y debe ser claramente comunicado.

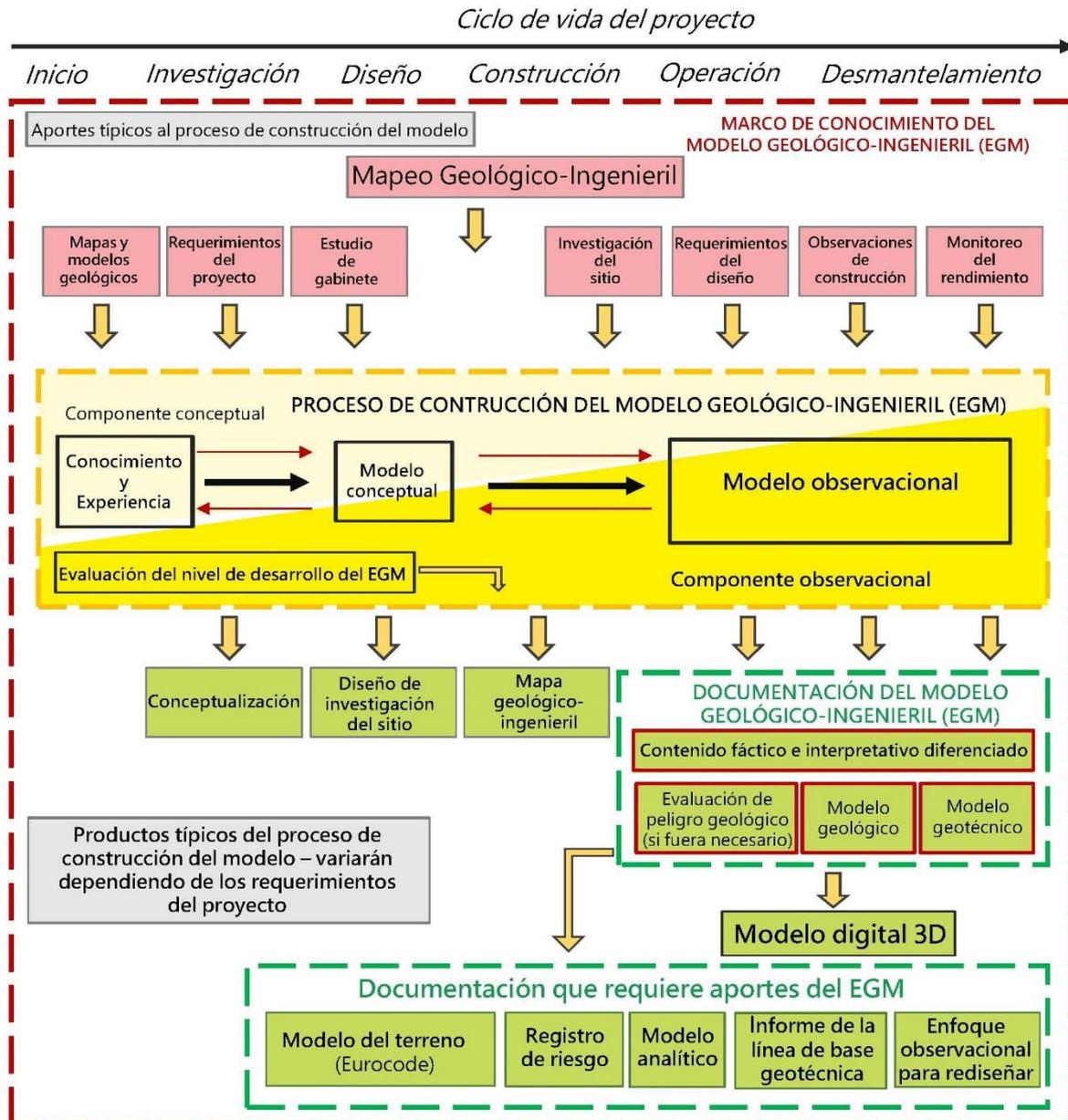
Tres salidas claves del EGM para un Proyecto son el Modelo Geológico, el Modelo Geotécnico y la Evaluación de Riesgos Geológicos.

#### 1.1.2.3 Los EGM incluyen ideas conceptuales y datos observacionales.

El equilibrio entre las ideas conceptuales y los datos de observación dentro de un EGM variará según el tipo de proyecto, su escala, la complejidad geotécnica del sitio y la etapa del proyecto (Figura 1-1). La evaluación del terreno al inicio de un proyecto es conceptual ya que se basa principalmente en el conocimiento, la experiencia y la referencia a otros ejemplos publicados de condiciones geológicas y geomorfológicas similares. A medida que avanza el proyecto y se dispone de mayor cantidad de datos de observación, el EGM evoluciona, pero el modelo conceptual permanece como marco para evaluar la interpretación de esos datos.

Las técnicas involucradas en el desarrollo de modelos conceptuales y modelos observacionales son diferentes.

El primero implica la acción de conceptualización y el segundo implica la evaluación de datos y recopilación de información. Sin embargo, se encuentran tan estrechamente relacionadas que en el desarrollo de EGM forman dos herramientas diferentes pero esenciales y complementarias que deben combinarse en todas las etapas del proyecto para generar un EGM apropiado.



**Figura I-1** Visualización esquemática del desarrollo del EGM a través de las etapas del proyecto.

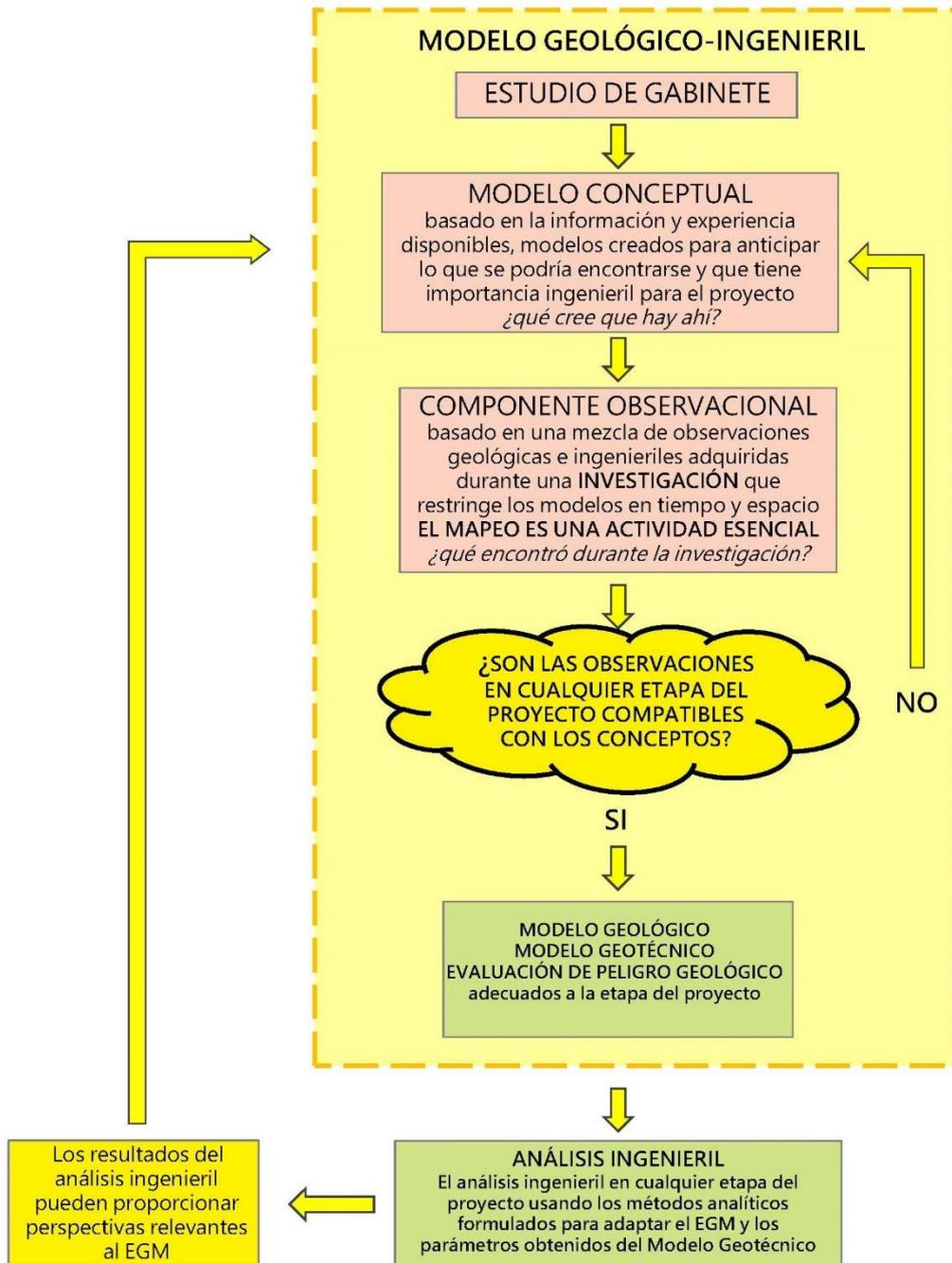
En cualquier etapa del análisis de ingeniería del proyecto se debe avanzar prudentemente hasta que las ideas conceptuales y los datos observacionales se hayan ajustado y cualquier discrepancia residual pueda gestionarse como riesgos del proyecto aceptados por todas las partes relevantes (Figura I-2).

#### 1.1.2.4 Un EGM debería ser desarrollado para todos los proyectos

Un EGM debería ser desarrollado para todos los proyectos que interactúan con el terreno y es igualmente aplicable tanto en proyectos muy grandes como en proyectos muy pequeños y sobre una variedad de escalas geográficas. Se debe tener en cuenta que para proyectos pequeños y simples, el EGM puede ser presentado en un único informe interpretativo.

1.1.2.5 El EGM es relevante a lo largo de las etapas del proyecto

El desarrollo del EGM debe comenzar en la etapa de inicio del proyecto y revisarse a lo largo del ciclo de vida, potencialmente aprobado por diversos contratistas y consultores, proporcionando un marco lógico y transparente para desarrollar comunicaciones del proyecto relacionados con el terreno (Figura 1-1). El marco de conocimiento del EGM también debe ser una parte integral del sistema de gestión de proyectos porque el conocimiento del terreno debe formar parte de la documentación del contrato (dependiendo del mecanismo de ejecución del contrato) y la base del proyecto.



**Figura 1-2** Análisis geológico-ingenieril se debe realizar cuando las observaciones sean compatibles con los conceptos



#### 1.1.2.6 El conocimiento de la geología y la ingeniería es necesario para desarrollar un EGM

Se necesitan conocimientos y experiencia tanto en geología como en ingeniería para desarrollar un EGM eficaz, pero el énfasis debe estar en la geología. Este conocimiento se debe basar en la educación, que idealmente implica al menos una licenciatura en geología o una licenciatura con geología como componente principal e, idealmente, una formación de posgrado en geología ingenieril o ingeniería geológica, o un período significativo de tutoría bajo la supervisión de un geólogo ingenieril experimentado. En algunas circunstancias y en proyectos simples, un ingeniero geotécnico competente con conocimientos geológicos significativos y/o con experiencia práctica válida en el ambiente geológico del proyecto podría construir un EGM confiable.

## I.2 PROCESO DE DESARROLLO DE UN EGM

### I.2.1 Descripción general del proceso de desarrollo

#### I.2.1.1 Pasos iniciales

Las siguientes preguntas claves deben ser respondidas en el comienzo del proyecto:

- ¿Dónde está ubicado el proyecto (geografía/geología/geomorfología/ambiente)?
- ¿Cuál es el tipo y la escala del proyecto? ¿Cómo interactuará con el terreno? ¿Cuáles son las dimensiones clave y los requerimientos del Proyecto, incluyendo el ciclo de vida? ¿Cuáles son las restricciones geotécnicas, la importancia o las consecuencias del fracaso de un proyecto de este tipo?
- ¿Cuál es la información existente disponible de las condiciones potenciales del terreno?
- ¿Cuál es la historia geológica/geomorfológica antropogénica del sitio y la región que podría ser de significación ingenieril para el Proyecto?
- ¿Qué riesgos geológicos podrían estar presentes?
- ¿Cuáles son las condiciones hidrogeológicas? y cómo podrían impactar en el Proyecto?
- ¿Cuál es el estado actual del proyecto, por ejemplo, si está en espera, buscando respaldo financiero, en construcción, etc.

Responder esas preguntas clave sigue siendo relevante durante el ciclo de vida del proyecto

#### I.2.1.2 El proceso de desarrollo

El proceso de desarrollo del EGM involucra los siguientes pasos esenciales, por lo general con repeticiones de la mayoría de los mismos:

- Reunión con el equipo, definir el alcance y el objetivo
- Reunir la información de ingeniería y geológico-ingenieril relevante que sea significativa para el Proyecto en el estudio de gabinete.
- Realizar un mapeo de reconocimiento inicial a cargo de un Geólogo ingenieril idóneo.
- Conceptualizar las probables condiciones geológico-ingenieriles basándose en el conocimiento, la experiencia y el estudio de gabinete al comienzo del proyecto, y reevaluarlas utilizando nueva información a medida que esté disponible en etapas posteriores del proyecto.
- Identificar y documentar incertidumbres clave en un registro de riesgos. Este registro se utiliza durante todo el ciclo de vida del proyecto y se debe actualizar periódicamente.
- Obtener información a través de investigaciones (que pueden incluir, entre otras, sensores remotos, mapeo, geofísica, perforaciones exploratorias, muestreo y ensayos); la importancia del mapeo geológico-ingenieril en investigaciones no se puede dejar de enfatizar.
- Combinar las observaciones y los conceptos para desarrollar una *interpretación* de las condiciones del sitio y si fuera necesario reevaluar el modelo conceptual.
- Describir las unidades geológico-ingenieriles, interpretar su distribución y generar un Modelo Geológico
- Caracterizar las unidades geológico-ingenieriles, las condiciones hidrogeológicas y los procesos geológicos utilizando parámetros geotécnicos obtenidos en estudio de gabinete, a partir de investigaciones y de la experiencia y generar un Modelo Geotécnico.

- Identificar incertidumbres significativas, vacíos y discrepancias en el marco del conocimiento; esos son los riesgos potenciales para el Proyecto y deben ser añadidos al registro de riesgos
- Evaluar los riesgos y, si fuera necesario, llevar a cabo investigaciones adicionales para mejorar el marco del conocimiento, minimizar las dudas y reducir los riesgos

El proceso de Desarrollo del EGM se ilustra en la Figura I-3 y se explica abajo

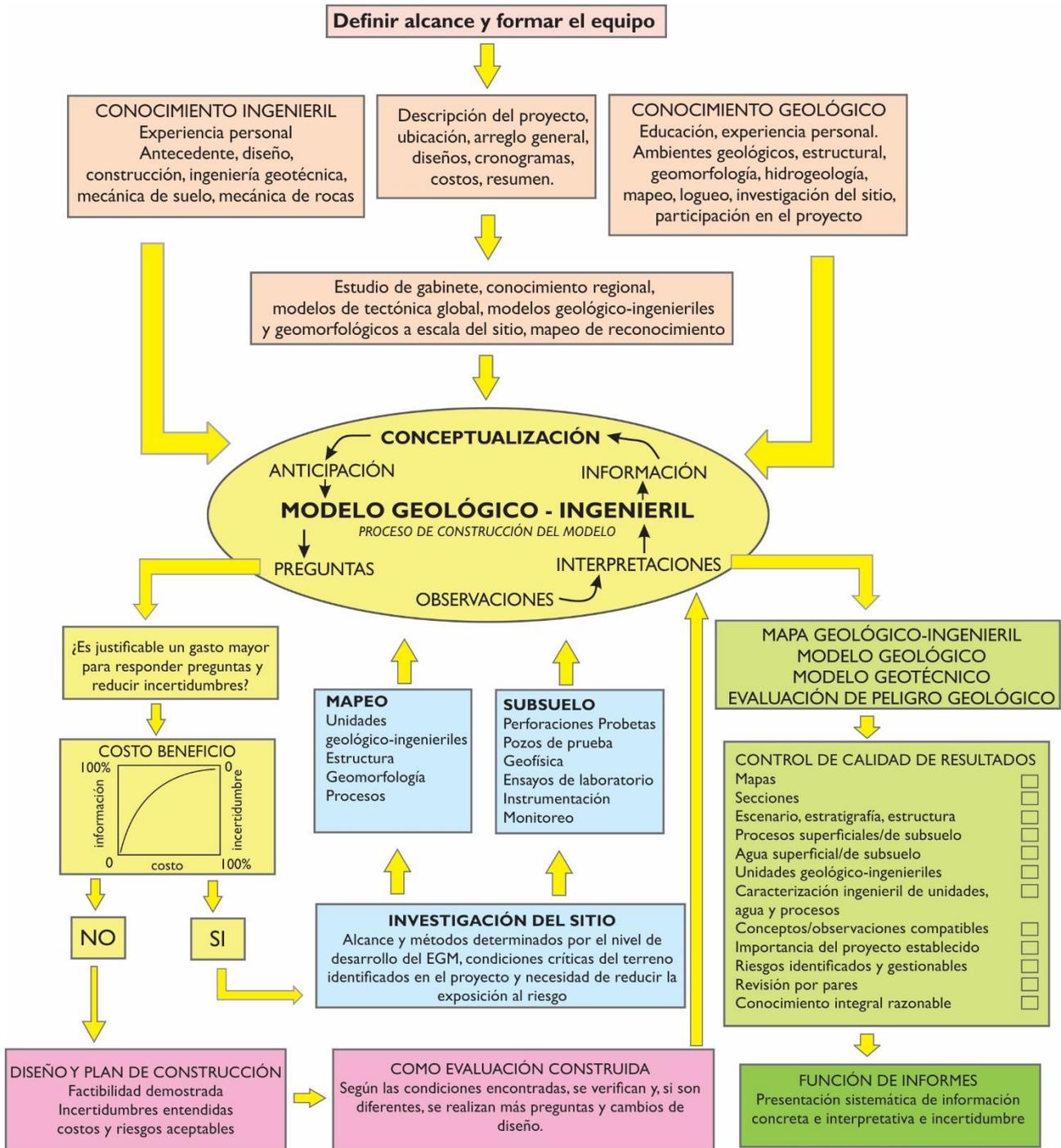


Figura I -3 Proceso de Desarrollo del EGM

### 1.2.2 Elección del nivel de desarrollo del EGM

El nivel de desarrollo del EGM que se debe adoptar está en función de la complejidad geotécnica considerada en el proyecto y las consecuencias de rotura; una guía sobre la elección del nivel de desarrollo es proporcionado en las Tablas I – 1 y I – 2. El nivel de desarrollo debiera ser revisado si la investigación indica que la complejidad geotécnica es mayor que la prevista.

**Tabla I-1** Niveles de Desarrollo del EGM relacionados con el Proyecto y la complejidad geotécnica. \*\*

	Complejidad geotécnica del terreno que podría influir el Proyecto – como se indicó en el modelo conceptual desarrollado de acuerdo con estas Directrices		
Complejidad del proyecto <sup>##</sup>	SIMPLE/UNIFORME: Estratos buzando suavemente u horizontales, suelos uniformes, sin riesgos geológicos, escasas restricciones geotécnicas	MODERADA/VARIABLE: Plegamiento variable y/o fallamiento, suelos variables, discordancias, pocos riesgos geológicos, algunas restricciones geotécnicas potenciales	COMPLEJO/PELIGROSO: Plegamiento sumamente variable y/o fallamiento, suelos profundos irregulares, discordancias, complejidad geotécnica considerable, riesgos geológicos significativos tales como grandes deslizamientos complejos, fallas activas, karst o riesgo geológico potencial de magnitud y/o frecuencia que pueda incrementarse por el proyecto
Desarrollo ingenieril menor, pequeño rastro, con baja consecuencia si fracasa	Nivel 1	Nivel 1	Nivel 2
Desarrollo ingenieril mediano, con consecuencia intermedia si fracasa	Nivel 2	Nivel 2	Nivel 3
Proyectos lineales grandes de infraestructura importante, estudios regionales, elevado impacto en un eventual fracaso	Nivel 3	Nivel 3	Nivel 3

\*\* Cuando se evalúa el nivel de desarrollo adecuado, la advertencia debe solicitarse a un geólogo ingenieril



competente.

## La complejidad del proyecto es subjetiva; la consecuencia baja y media del fracaso y/o rotura normalmente se limitaría a los impactos financieros; las consecuencias graves de un fracaso normalmente estarían asociadas con la pérdida de vidas; el fracaso es cuando el proyecto no se ejecuta de acuerdo con el diseño/desempeño especificado.

**Tabla I-2** Guía sobre los requerimientos del alcance para los niveles de Desarrollo del EGM.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Estudios especializados	Ninguno	Ninguno	Encargar estudios de riesgos geológicos distintos (donde sea aplicable)  Posibilidad de estudios geológicos especializados  Posibilidad de estudios de interacción terreno/estructura
Mapeo	Mínima visita al sitio, mapeo de reconocimiento, croquis geológico-ingenieril/sección transversal del sitio	Mapeo geológico ingenieril incluyendo secciones transversales del sitio y alrededores	Mapeo geológico ingenieril incluyendo secciones transversales del sitio del proyecto y alrededores, a una diversidad de escalas
Investigaciones del subsuelo	Investigaciones del subsuelo en una etapa única menor por ejemplo, sondeos de prueba, perforaciones si fuera apropiado	Investigaciones del subsuelo cuando sea apropiado usando perforaciones, ensayos de penetrómetros de cono, geofísica, etc.  Instrumentación	Investigaciones del subsuelo en múltiples etapas usando métodos tales como perforaciones, ensayos <i>in situ</i> , geofísica, et., instrumentación y monitoreo a largo plazo cuando sea apropiado.  Recolección de datos de la línea base
Ensayos de laboratorio	Realizar ensayos en forma limitada o no ejecutar ensayos de laboratorio	Ensayos de laboratorio cuando sea apropiado.	Ensayos de laboratorio extendidos y posiblemente especializados cuando sea apropiados
Documentación	Documentación del EGM en un informe de los hechos e interpretativo combinado	Documentación del EGM en informes de los hechos e interpretativos	Documentación del EGM en informes de los hechos e interpretativos. Consideración de la visualización digital 3D
Equipo	Posiblemente un único responsable individual para los trabajos	Pequeño equipo de geólogos ingenieriles e ingenieros geotécnicos responsable por los trabajos	Grupo grande multidisciplinario responsable de los trabajos
Revisión	Revisión interna <sup>**</sup>	Revisión interna por pares <sup>**</sup>	Revisión externa/panel de expertos <sup>**</sup>

<sup>\*\*</sup> Requerimientos de revisión específicos que podrían existir.

### 1.2.3 Detalles del proceso de desarrollo

#### 1.2.3.1 Reunión con el equipo, definir el alcance y el propósito

La composición del equipo dependerá de la complejidad tanto del proyecto como del terreno. Esto podría variar desde una sola persona con los conocimientos geológicos e ingenieriles necesarios para un proyecto pequeño hasta un grupo multidisciplinario y un panel de revisión para un proyecto importante. Se deben documentar las funciones y responsabilidades del equipo, los revisores y los que aprueban. El equipo debe comenzar definiendo el alcance y el propósito del EGM y debe tener en cuenta cualquier cambio planificado en la propiedad del EGM, por ejemplo, cuando el EGM es desarrollada por una agencia gubernamental y luego transferida a quien obtuvo el contrato. Cuando el equipo se une al proyecto en una etapa posterior, o el proyecto se transfiere entre partes contractualmente separadas, entonces se debe revisar la documentación existente del proyecto para identificar cualquier vacío o insuficiencia.

#### 1.2.3.2 Reunir información ingenieril y geológica relevante en un estudio de gabinete

Un estudio de gabinete es un ejercicio de recopilación de información para reunir material relevante de modo que se pueda obtener el máximo valor de las fuentes disponibles existentes antes de invertir tiempo y dinero en recopilar nueva información. La información primaria probablemente incluya mapas y memorias geológicas, mapas topográficos, datos de investigación de sitio existente, como perforaciones, datos de sensores remotos, información sobre riesgos geológicos, etc. Los datos históricos no deben descartarse ni para ser reemplazados por series de datos más recientes ni por haberse registrado en un estilo que no se ajusta a los estándares actuales.

Como parte del estudio de gabinete se debe realizar un mapeo de reconocimiento cuando sea posible. Esto permite la evaluación de los datos del estudio de gabinete y ayuda a la conceptualización.

#### 1.2.3.3 Conceptualizar el EGM

La conceptualización es el proceso mediante el cual se considera toda la información disponible y se desarrolla una comprensión de cuáles serán, posiblemente, las condiciones del sitio y cómo se desarrollaron en el tiempo. Esto se debería llevar a cabo inicialmente después del estudio de gabinete, y luego debería llevarse a cabo periódicamente a medida que se adquiera información adicional. La conceptualización permite evaluar qué condiciones y qué variaciones pueden ocurrir y los procesos geológicos y geomorfológicos que las han producido y que podrían ser de importancia ingenieril para el proyecto.

Durante la conceptualización se debe considerar los siguientes aspectos del sitio

##### 1.2.3.3.1 Ajuste del proyecto

Se basará en la consideración de:

- El ajuste de la tectónica en todo el ámbito y la geología regional de la ubicación del proyecto
- Los ajustes climáticos actuales, pasados y potenciales de la ubicación del proyecto
- La necesidad de mirar más allá del área inmediata del sitio, por ejemplo la evaluación de los riesgos de deslizamientos que puedan originarse fuera del área del sitio.

##### 1.2.3.3.2 Estratigrafía – tipos de rocas y suelos y relación entre ellos

Requiere una comprensión de los procesos de formación y modificación de las rocas, así como de los procesos de origen, transporte y deposición de los componentes de las rocas y suelos del área del proyecto. Esto pone en consideración las propiedades del macizo rocoso y de las rocas y suelos, las

características de las unidades geológico-ingenieriles, incluyendo las condiciones de contorno de las unidades además de su geometría, distribución y relaciones probables, tanto entre sí como con el proyecto.

Se debe conocer la edad estratigráfica de los materiales e identificar la secuencia de eventos geológicos de los materiales desde su formación. Esto respalda la aplicación del enfoque del *modelo geológico total* en el que todas las características ingenieriles del terreno se interpretan como resultantes de toda la historia geológica y geomorfológica del área.

#### 1.2.3.3 Estructura geológica

Se deben conocer las estructuras geológicas, incluyendo las características tectónicas en todas las escalas, los límites de las unidades geológico-ingenieriles y las discontinuidades dentro de ellas, su origen, geometría, espaciamiento, extensión, rasgos característicos y su importancia para la ingeniería. Esta comprensión también debe incluir el momento y la secuencia de los eventos de formación de rocas y suelos, las fases de deformación, el desarrollo del relieve y los efectos de alivio de tensiones.

#### 1.2.3.4 Procesos superficiales y subsuperficiales

Se necesita la identificación de riesgos geológicos posiblemente activos o potencialmente reactivados y una evaluación de sus probables variaciones en magnitud y frecuencia a lo largo del tiempo. También deben ser evaluadas las condiciones de agua superficial y subterránea y como podrían cambiar a lo largo del tiempo

#### 1.2.3.5 Caracterización geológica-ingenieril inicial

Es posible atribuir parámetros geotécnicos a partes del modelo conceptual, basado en datos existentes o conocimiento, en la medida que sea razonable teniendo en cuenta los datos disponibles, por ejemplo, resistencia de la roca y el suelo, dureza, permeabilidad, velocidades de procesos geomorfológicos, etc. La evaluación de potenciales riesgos geotécnicos (y posibles oportunidades de proyecto) pueden ser utilizados para completar un registro inicial de riesgos.

#### 1.2.3.6 Modelo geológico inicial

La conceptualización generará un **Modelo Geológico** inicial que puede ser utilizado para planificar la investigación del sitio. El Modelo Geológico luego es perfeccionado mediante datos de observaciones realizadas en las investigaciones del sitio.

#### 1.2.3.4 Obtener observaciones del área del proyecto por medio de investigaciones

La información adquirida durante el estudio de gabinete es el punto de partida para desarrollar modelos conceptuales y observacionales. Sin embargo, la mayoría de las observaciones se adquieren durante la(s) etapa(s) de investigación del sitio del proyecto. Se deben agregar más observaciones durante la construcción y operación.

Las investigaciones del sitio, que consistan únicamente en observaciones e interpretaciones sin el uso de un marco conceptual probablemente sean defectuosas y no deben aceptarse.

La conceptualización debe incluir una comprensión amplia de las posibles características y distribución de las unidades geológico-ingenieriles en el sitio, la naturaleza de cualquier riesgo geológico y hueco de información sospechoso. Este conocimiento luego debe centrarse en las características del terreno que son críticas para el diseño y usarse para identificar objetivos de investigación y planificar investigaciones que mejorarán el conocimiento y reducirán la incertidumbre en esas áreas críticas.

Se enfatiza la importancia del mapeo que incluye observaciones e interpretaciones en la investigación de cualquier proyecto. Todos los proyectos deben contar con un mapa geológico-ingenieril compilado y "propiedad" del equipo responsable de llevar a cabo las investigaciones. Esencialmente, dichos mapas deben desarrollarse en el campo, aunque cada vez más el componente de campo implica la verificación en terreno

de mapas preparados en la oficina combinando observaciones obtenidas de varios conjuntos de datos dentro de un entorno digital 2D o 3D o de la interpretación de imágenes de sensores remotos.

Para proyectos más grandes o sitios más complejos o estructuras críticas, la investigación del sitio generalmente consta de varias etapas y los datos de observación adquiridos se comparan con el modelo conceptual para ver qué áreas de incertidumbre y qué riesgos quedan por explorar en etapas sucesivas de la investigación.

Las investigaciones adquirirán datos de observación que normalmente incluyen:

- El levantamiento topográfico y, cada vez más, el uso de DEM (modelos digitales de elevación) generados por LiDAR (tecnología de teledetección que utiliza rayos láser para medir distancias y movimientos precisos en tiempo real).
- El mapeo geológico-ingenieril a varias escalas que van desde estudios regionales, estudios del área del proyecto, estudios de componentes geotécnicos y estudios de fundaciones individuales. Todo el mapeo debe integrarse perfectamente en un único conjunto de datos que pueda verse en una variedad de escalas.
- Información procedente de técnicas de investigación directas como perforaciones, calicatas, pozos, túneles, etc.
- Datos de geofísica en perforaciones, como endoscopía de pozo, geofísica y otras herramientas.
- Instrumentación instalada y los resultados de monitoreo
- Resultados de ensayos de laboratorio y campo.
- Mediciones de agua subterránea y superficial
- Resultados de relevamientos geofísicos
- Descripciones y clasificaciones (por ejemplo tipos de roca, clases de resistencia de la roca utilizando sistemas y terminología reconocidos)
- Mediciones estructurales tales como profundidades de intersección de unidades geológico-ingenieriles en una perforación, rumbos y buzamientos en estratos y discontinuidades.
- Técnicas de teledetección como InSAR (radar interferométrico de apertura sintética).
- Otros datos resultantes de observaciones incluyendo modelos de observación temporal (por ejemplo series temporales de sismicidad, precipitaciones, deslizamientos, etc.) que son fundamentales para predecir la frecuencia de futuros riesgos geológicos.

El mapeo debería comenzar tras el desarrollo del modelo conceptual y puede basarse inicialmente en los sensores remotos; esto puede evaluarse durante el reconocimiento de campo. Se puede realizar un mapeo detallado utilizando una variedad de técnicas que van desde simples levantamientos con cinta métrica hasta localizar las observaciones en un DEM de alta resolución (cuando esté disponible) u ortofotos.

Es esencial que cualquier mapeo geológico-ingenieril también incorpore modelos geológicos (por ejemplo, lineamientos, modelos estructurales, tipos de discontinuidades y trazas de contacto, etc.), así como la geomorfología.

#### 1.2.3.4.1 Verificación de datos de entrada

Antes de cualquier interpretación de los datos de observación, debe haber una revisión y recopilación de datos para comprobar la precisión, utilidad y representatividad de cada conjunto de datos. Cualquier

inquietud sobre la precisión y representatividad del conjunto de datos se debe documentar y se deben discutir las posibles aclaraciones.

#### 1.2.3.5 Combinando las ideas conceptuales y los datos de observaciones en el EGM

Combinar los componentes conceptuales y observacionales involucra la *interpretación*

La interpretación ha implicado tradicionalmente la creación de mapas en soporte papel, secciones, bocetos y textos, pero ahora se lleva a cabo cada vez más en un entorno de modelo digital. Esto implica la "interpretación de la superficie" durante el desarrollo de un modelo digital 3D en el que se incluyen mapas geológico-ingenieriles, mapas geomorfológicos, LiDAR, topografía, mapeo de campo y observaciones, etc., para interpretar las condiciones del terreno. Es esencial que dicha interpretación de la superficie se verifique sobre el terreno.

Este proceso iterativo de combinar los componentes conceptuales y observacionales del EGM debe ser rastreable, documentado y estructurado. Se deben evitar los juicios subjetivos de los responsables del desarrollo del EGM y reemplazarlos con fuentes objetivas y evaluables (por ejemplo, modelos e historias de casos de la literatura, cartografía, investigación geotécnica, monitoreo geotécnico, etc.) junto con el razonamiento detrás de la interpretación.

El mapeo geológico-ingenieril y geomorfológico basado en el campo rara vez se lleva a cabo de manera rutinaria en los proyectos, sin embargo, es una técnica que requiere que tanto la observación basada en el campo como la interpretación conceptual se lleven a cabo simultáneamente y, al hacerlo, genera la visualización 2D por excelencia del EGM en forma de mapa. Algún mapeo geológico-ingenieril y geomorfológico debería ser una parte esencial de cada proyecto.

#### 1.2.3.6 Definiendo y caracterizando las unidades geológico-ingenieriles

Un producto clave de cualquier EGM es la definición de unidades geológico-ingenieriles que se basan en el conocimiento de sus características geológico-ingenieriles/comportamiento geotécnico y que son apropiadas para la ingeniería del proyecto. La definición de unidades geológico-ingenieriles sustenta el desarrollo del **Modelo Geológico**.

Un enfoque común es adoptar unidades geológico-ingenieriles basadas en las divisiones litoestratigráficas distintivas identificadas en el sitio (es decir, las unidades de suelo y roca que se pueden diferenciar) que generalmente son subdivisiones de las unidades cronoestratigráficas (unidades basadas en la edad) consideradas en el mapa geológico. Sin embargo, las unidades litoestratigráficas pueden no corresponder a las unidades geológico-ingenieriles más útiles (es decir, es posible que no tengan en cuenta procesos geomorfológicos distintivos, comportamiento geotécnico, características hidrogeológicas, etc.). Además, la resolución de las unidades estratigráficas puede no adaptarse al objetivo del modelo.

Sin embargo, las unidades geológico-ingenieriles no deben cruzar los límites litoestratigráficos publicados, tales como se muestran en los mapas geológicos. La unidad litoestratigráfica contiene una historia geológica distinta y diferentes historias geológicas no se deben combinar en una sola unidad geológica-ingenieril, incluso si las características geotécnicas son similares. Las excepciones a esto son las zonas de fallas que pueden necesitar ser consideradas por separado y que, por definición, cruzan los límites litoestratigráficos. Tenga en cuenta que estos límites dependerán de la escala - los límites para un modelo regional pueden ser diferentes de los límites para un modelo a escala de sitio.

Las unidades geológico-ingenieriles elegidas deben reflejar aquellas condiciones que son significativas para el proyecto y pueden incluir controles geológicos como meteorización, alteración y fallamiento. La Figura 1-4 describe los pasos para definir las unidades geológico-ingenieriles y así desarrollar el Modelo Geológico.

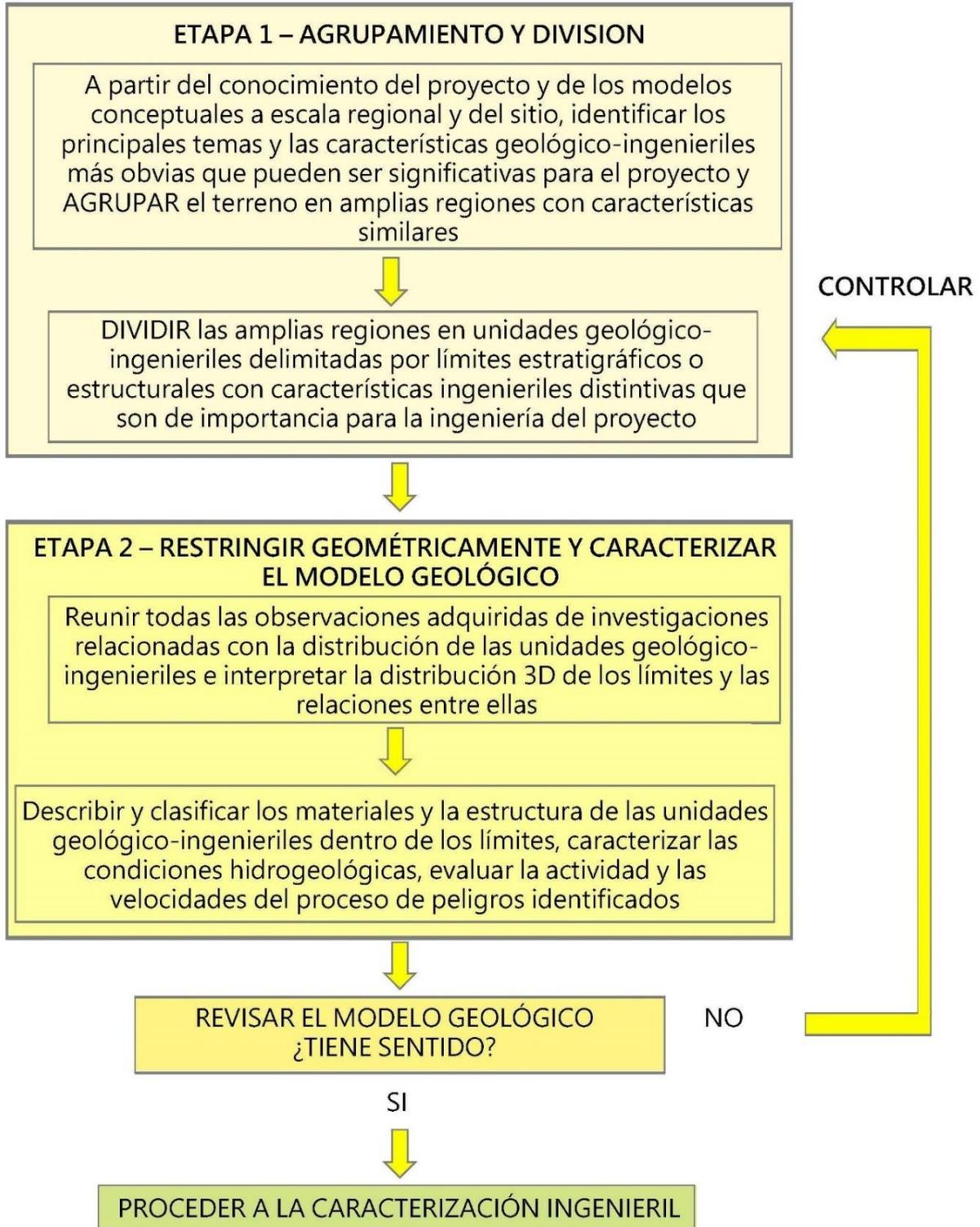
Al igual que con otros aspectos del EGM, la resolución y escala de las unidades geológico-ingenieriles deben



estar claramente vinculadas al alcance y propósito del EGM. Las unidades geológico-ingenieriles adoptadas deben revisarse a medida que se disponga de datos adicionales.

#### 1.2.3.6.1 Complejidad geotécnica

En áreas geotécnicamente complejas, las propiedades geotécnicas pueden variar en un amplio rango dentro del sitio del proyecto. La complejidad geotécnica debe, cuando sea posible, reflejarse en el Modelo Geológico en forma de suficientes unidades geológico-ingenieriles con distribuciones e interrelaciones apropiadas. Cuando esto no sea posible, puede ser necesaria una simplificación y la documentación del EGM debe describir los procesos geológicos y la historia geológica que produjeron la complejidad geotécnica, la naturaleza de cualquier supuesto simplificador utilizado para generar las unidades geológico-ingenieriles e ilustrar la complejidad potencial utilizando una visualización del modelo conceptual.



**Figura I-4** Estableciendo las unidades geológico-ingenieriles y la base del Modelo Geológico

### 1.2.3.7 Caracterización ingenieril

La caracterización ingenieril implica la evaluación y asignación de parámetros geotécnicos relevantes para la ingeniería del proyecto a cada unidad geológico-ingenieril en el Modelo Geológico, que luego evoluciona hacia un **Modelo Geotécnico**.

El proceso comienza durante la conceptualización, aunque cualquier parámetro asignado en esta etapa

probablemente estará asociado con una incertidumbre considerable. La investigación del sitio implica ensayos *in situ* y de laboratorio para ayudar con la evaluación de los parámetros geotécnicos relevantes que variarán dependiendo tanto de las condiciones del terreno como del tipo de proyecto. Los resultados de las investigaciones mejorarán la caracterización de las unidades geológico-ingenieriles y reducirán la incertidumbre, pero pueden diferir de lo previsto en el modelo conceptual.

El Modelo Geotécnico podría implicar una simplificación del modelo Geológico, por ejemplo, con respecto a una zona de falla compleja, esto podría reducirse a las superficies que limitan y algunas suposiciones simplificadas sobre la resistencia, rigidez y permeabilidad de toda la zona de falla. Sin embargo, cualquier simplificación no debería eliminar unidades geológico-ingenieriles clave que necesitan ser consideradas por separado debido a su comportamiento geotécnico.

Se debe adoptar el siguiente enfoque:

- La atención debe centrarse en las características ingenieriles que sean relevantes para el proyecto.
- Agrupar los resultados de los ensayos de laboratorio e *in situ* para cada unidad geológico-ingenieril identificada.
- Las propiedades de los materiales y los parámetros geotécnicos deben asignarse principalmente a partir de investigaciones específicas del sitio. Sin embargo, estos podrán complementarse con valores obtenidos de la experiencia, la teoría, la correlación o el empirismo, siempre que se explique, justifique y referencie el método de determinación.
- Considerar la parcialidad resultante de las dificultades del muestreo, tipo y cantidad de ensayos para cada unidad y decidir el rango de valores representativos para la unidad geológico-ingenieril. No se debe realizar un promedio de las propiedades del material que enmascare la presencia de zonas significativamente más débiles, y se debe evaluar toda la gama de resultados para identificar la probabilidad que los valores sean mayores y/o menores que los valores representativos.
- Comparar los valores representativos con la experiencia y los valores publicados para unidades similares.
- Considerar y explicar cualquier resultado anómalo o extremo. Estos pueden indicar que las unidades geológico-ingenieriles pueden necesitar refinamiento.
- Resalte cualquier limitación en los datos o el análisis.

Tenga en cuenta que la elección de los parámetros ingenieriles para su uso en el análisis por parte del proyectista se debe basar en la información anterior, idealmente presentada gráficamente, junto con consideraciones de los objetivos de ingeniería del proyecto, el riesgo y posiblemente los requisitos del código.

#### 1.2.3.7.1 Zonificación

Una vez definidas las unidades geológico-ingenieriles y evaluadas las características geotécnicas, puede ser útil definir zonas o dominios con las mismas características geotécnicas. Las zonas pueden definirse por comportamiento geomecánico, velocidad sísmica, clasificación del macizo rocoso, etc., pero también pueden basarse en cualquier atributo de importancia técnica para el proyecto, por ejemplo, potencial de sulfato ácido, susceptibilidad a deslizamientos, o geoquímica de aguas subterráneas, de modo que el EGM se puede utilizar para una variedad de análisis de ingeniería, evaluación de riesgos, evaluación de construcción, etc. La decisión sobre la zonificación apropiada debe tomarse en conjunto con los proyectistas y el equipo de ingeniería en general.

La escala a la que se emprende la zonificación debe reflejar la naturaleza de los datos y cómo se utilizarán

los resultados. La zonificación no debe ser ni más ni menos detallada de lo que permiten los datos.

Un error común es zonificar el terreno, por ejemplo, a escala de perforaciones, y luego intentar “unir los puntos” entre perforaciones. Es casi imposible tener en cuenta el entorno geológico más amplio y la historia geológica total utilizando este método. Para que el EGM contribuya efectivamente al análisis y diseño de ingeniería, la sensibilidad de los análisis a ciertas zonas críticas definidas por el modelo debe informar la resolución y escala de la zonificación.

#### 1.2.3.8 Incertidumbre, vacíos y discrepancias en el EGM

Durante el desarrollo del EGM se deben realizar evaluaciones periódicas del grado de concordancia entre las ideas conceptuales en evolución y los datos observacionales adquiridos progresivamente. Estas evaluaciones normalmente se llevarán a cabo en etapas acordadas de presentación de informes del proyecto.

Si hay una desconexión entre lo que se prevé que estará presente y lo que se ha encontrado durante las investigaciones, es necesario identificar las razones de esto y mejorar el EGM. Si durante el diseño el EGM el mismo no permite una predicción realista de cómo responderá el terreno al proyecto con el nivel requerido de certeza, entonces se necesita más información para mejorarlo. Las mejoras al EGM para mitigar los riesgos identificados pueden tomar la forma de investigaciones adicionales o estrategias de diseño, como una mayor moderación o la adopción del método de observación durante la construcción.

A medida que un proyecto avanza hacia la fase de construcción, las condiciones del terreno expuesto deben evaluarse con respecto a las condiciones anticipadas por el EGM. Luego se debe evaluar si estas variaciones podrían impactar potencialmente en la metodología de diseño o construcción y si estas metodologías deben cambiarse o si el registro de riesgos requiere una actualización.

A lo largo del desarrollo del EGM, la incertidumbre, los vacíos y discrepancias pueden manifestarse como riesgos. Cuando los riesgos potenciales para el proyecto se consideren significativos, deberán registrarse en el registro de riesgos. La gestión de esos riesgos debe basarse en el conocimiento del nivel de riesgo que sea aceptable para el cliente, el público en general y según lo determine cualquier legislación. La aspiración/tolerancia al riesgo del cliente debe basarse en una comprensión informada de las condiciones del terreno conocidas que deben comunicarse mediante el EGM.

#### 1.2.4 EGM y Eurocódigo

El enfoque descrito en esta sección es un proceso global adecuado para desarrollar un marco de conocimiento de EGM para la toma de decisiones de ingeniería en cualquier tipo de proyecto en cualquier etapa del ciclo de vida del proyecto. El enfoque del Eurocódigo tiene una aplicación más restringida a etapas seleccionadas de ciertos tipos de proyectos y existen diferencias terminológicas, especialmente con respecto a los componentes de un "modelo de terreno", mientras que no se menciona el concepto de un modelo geológico-ingenieril desarrollado a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Consulte la Sección de comentarios 2.2 **PROCESO DE DESARROLLO DEL EGM** para obtener más información.

## I.3 ARMADO Y COMUNICACIÓN DEL EGM

### I.3.1 Introducción

La EGM debe documentarse en un formato que pueda ser utilizado para comunicar sus diversos componentes, principalmente a consultores y contratistas, pero también a otros públicos.

La documentación debe incluir texto, mapas y secciones como mínimo, pero lo más frecuente es que consista en texto detallado adjuntando diagramas, tablas, registros, fotografías, mapas, secciones, conjuntos de datos, datos procesados y modelos digitales, cada uno de los cuales debe ser esencialmente transparente, autónomo, explicativo, autónomo y capaz de entenderse clara y fácilmente.

Todos los datos codificados de EGM deben procesarse/preservarse dentro de un sistema de presentación y gestión de datos centralizado, estandarizado e integrado. Los datos pueden variar desde mapas y secciones dibujados a mano hasta modelos 3D (espaciales) que incluyen, a veces, modelos sofisticados generados por software y modelos 4D (espaciales y temporales) que describen las velocidades de los procesos.

### I.3.2 Resumen para la documentación de los componentes del EGM

La Tabla I-3 es un ejemplo de resumen que los consultores deben seguir al documentar los distintos componentes de un EGM. Para proyectos pequeños, muchos de estos elementos podrían describirse en párrafos individuales y toda la documentación presentada en un breve informe.

En algunas circunstancias, se puede diseñar una investigación del sitio utilizando un EGM, pero una vez finalizada la investigación, el requisito contractual puede ser la producción de un informe de los hechos. El resultado será que la documentación del EGM estará incompleta porque carece de contenido interpretativo y esto debería ser reconocido y documentado por todas las partes del contrato.

Para proyectos grandes puede haber varios volúmenes de informes diferentes en los que se incluyen los componentes del EGM.

Al licitar servicios geotécnicos para grandes proyectos, lo ideal es que la provisión de todos los componentes de un EGM sea un elemento de alcance separado junto con la provisión de informes de hechos e interpretativos. En esas circunstancias, los documentos de solicitud de licitación deben describir específicamente las expectativas de desarrollo del EGM, mientras que el proceso de evaluación de la licitación debe considerar las capacidades del EGM del proponente y se deben realizar asignaciones presupuestarias adecuadas al inicio del proyecto.

### I.3.3 Participación en las adquisiciones del proyecto

Lo ideal sería incluir o hacer referencia a la documentación de los componentes del EGM preparada de acuerdo con estas Directrices en la documentación del proyecto. Dependiendo de la estrategia de adquisición del proyecto del Cliente, debe haber ítems dentro del cronograma del proyecto que contemplen la actualización del EGM y conservarse como un registro de lo que se conocía en ese momento. A medida que avanza el proyecto, se puede revisar la documentación de los componentes del EGM para reflejar los cambios en el conocimiento. Los siguientes son puntos de actualización típicos:

- Para proyectos pequeños habrá un único punto de actualización, generalmente al completar la investigación del sitio.
- Para proyectos más grandes, algunos o todos los siguientes puntos de actualización pueden aplicarse:
  - Al finalizar el estudio de gabinete.
  - Al finalizar cada etapa de la Investigación
  - Al finalizar cada etapa del proyecto

- Al finalizar el contrato de las Obras Principales.
- Por acuerdo de la línea de Base, si corresponde.
- En los hitos acordados durante la construcción relacionados con la finalización de diversos elementos del proyecto, por ejemplo, fundaciones de presas, túneles, etc.

Al licitar para las obras principales, la documentación del contrato debe garantizar que el EGM se transfiera a quienes licitan, cuando los acuerdos contractuales lo permitan.

**Tabla I-3** Resumen de documentación de los componentes del EGM

1. La documentación de los componentes del EGM debe seguir las Directrices de IAEG para el desarrollo y la aplicación de modelos geológico-ingenieriles en proyectos.
2. Se debe indicar el nivel de desarrollo del EGM debe ser acordado con el cliente (alcance del estudio).
3. Se debe presentar un informe de situación que proporcione los resultados de todas las investigaciones, observaciones y ensayos de laboratorio, incluyendo información de todos los estudios previos.
4. Se debe presentar un Informe interpretativo (posiblemente como informe separado), que incluye:
  - (i) Los hallazgos del estudio de gabinete.
  - (ii) El modelo conceptual y los riesgos clave iniciales identificados.
  - (iii) La justificación del diseño del plan de investigación del sitio, teniendo en cuenta el modelo conceptual y los riesgos clave del terreno.
  - (iv) Las Unidades Geológica-Ingenieriles identificadas: volúmenes de terreno con una historia geológica similar y un comportamiento geotécnico similar en el contexto de la ingeniería del proyecto.
  - (v) Un modelo geológico que presente la distribución en el espacio 3D de las unidades geológico-ingenieriles, las condiciones hidrogeológicas y los procesos geológicos y cómo estos podrían cambiar con el tiempo.
  - (vi) Un Modelo Geotécnico que presente las características de ingeniería y los parámetros geotécnicos relevantes de cada aspecto del Modelo Geológico. Se debe proporcionar una descripción de ingeniería y parámetros geotécnicos para cada unidad geológico-ingenieril identificada.
  - (vii) Se deben proporcionar mapas, planos y secciones a escalas apropiadas para ilustrar los modelos geológicos y geotécnicos interpretados y para informar la evaluación de ingeniería de todos los elementos geotécnicos del proyecto. A menudo resulta útil la combinación de información geológica, geotécnica y de ingeniería de proyectos en un solo dibujo o conjunto de dibujos.
  - (viii) Una evaluación de riesgos geológicos, si fuera necesario.
  - (ix) Si un modelo digital 3D forma parte de la documentación, se deberá proporcionar un Informe de modelo digital 3D.

#### 1.3.4 Informes del EGM

El informe debe estar claramente diferenciado en:

- Información de la situación y observaciones.
- Interpretaciones, incluyendo conceptualizaciones.
- Opiniones

Los requisitos de informes recomendados para los siguientes tipos se describen a continuación.

##### 1.3.4.1 Informe de situación

Un informe de situación debe incluir, pero no estar limitado a, la siguiente información:

- Objetivos y alcance acordado.

- Ubicación y descripción del sitio del proyecto.
- Descripción de la geología regional y local y cualquier modificación antropogénica al sitio del proyecto basada en datos preexistentes.
- Detalles de cualquier investigación previa en el sitio o en sus proximidades.
- Un plano que muestre los lugares de investigación existentes y actuales.
- Métodos de investigación utilizados
- Resultados de investigaciones e información adquirida
- Ensayos de laboratorio e *in situ* ejecutados y un resumen de los resultados.

Cualquier interpretación realizada como parte del informe de situación, por ejemplo, la asignación de unidades litológicas o estratigráficas, o la interpretación geofísica, debe registrarse claramente como tal y documentarse la incertidumbre asociada con ella, incluidas las interpretaciones alternativas. Se puede incluir una “declaración de limitación” relacionada con cualquier aspecto interpretativo de lo que es principalmente el contenido de situación del informe.

#### 1.3.4.2 Informe de interpretación

El Informe de Interpretación debe incluir, pero no estar limitado a, los siguientes componentes:

- Referencia a los datos en los que se basa la interpretación (el informe de hechos o de datos).
- Las conclusiones del estudio de gabinete
- El modelo conceptual y los riesgos clave iniciales identificados
- La justificación del diseño del plan de investigación del sitio teniendo en cuenta el modelo conceptual y los riesgos e incertidumbres clave.
- En base en los hallazgos de la investigación, se requiere información suficientemente detallada y documentada relacionada con los siguientes aspectos del proyecto:
  - Estratigrafía, litología, edad, meteorización y alteración
  - Características de configuración estructural, defecto o discontinuidad.
  - Geomorfología y procesos superficiales y subsuperficiales pertinentes.
  - Calidad del agua superficial y subterránea.
  - Historia Geológica Total relevante a las condiciones probables del terreno.
  - Detalles de cualquier modificación antropogénica al sitio de proyecto
- Las Unidades Geológico-ingenieriles identificadas y la base para su definición
- Un modelo geológico debe presentar la distribución en el espacio 3D de las unidades geológico-ingenieriles, las condiciones hidrogeológicas y los procesos geológicos y cómo estos podrían cambiar en el tiempo, sus controles y condiciones límite y las aguas subterráneas, los procesos geomorfológicos y los riesgos geológicos que se han observado o interpretado que ocurren en y alrededor del sitio. El Modelo Geológico debe caracterizar unidades del terreno con propiedades ingenieriles similares y describir los límites donde pueden ocurrir cambios en las condiciones. Se debe discutir el contexto regional del Modelo Geológico. Se debe caracterizar la incertidumbre en el Modelo Geológico. Dependiendo de los requisitos del proyecto y de los informes, el modelo geológico que se presenta puede tener un enfoque específico relacionado con el proyecto y puede

describirse mejor como, por ejemplo, un modelo hidrogeológico o un modelo de macizo rocoso.

- Un Modelo Geotécnico presenta las características de ingeniería y parámetros geotécnicos de cada aspecto relevante del Modelo Geológico, considerando el proyecto a contratar. Para cada unidad geológico-ingenieril se debe proporcionar una descripción de ingeniería y parámetros geotécnicos. Se debe describir la diversidad de propiedades del material y proporcionar el rango típico de parámetros. Se debe caracterizar la incertidumbre en el Modelo Geotécnico. La elección de los parámetros de ingeniería para su uso en el análisis se debe basar en la información anterior.
- Las zonificaciones que se hayan utilizado o los dominios que se hayan definido y las bases para su adopción.
- Una Evaluación de riesgos geológicos, donde sea necesario
- Una interpretación ingenieril de las complicaciones de las condiciones del terreno para el proyecto
- Se deben proporcionar mapas y secciones a escalas apropiadas que cubran el sitio y sus alrededores para ilustrar los Modelos Geológicos y Geotécnicos interpretados y para informar la evaluación de ingeniería de todos los elementos geotécnicos del proyecto. Dependiendo del proyecto, la combinación de información relacionada con el Modelo Geológico y el Modelo Geotécnico en un solo dibujo puede ser útil como base para realizar presentaciones a clientes, accionistas, aseguradores o al público en general.
- Si un modelo digital 3D forma parte de la documentación, se debe proporcionar un Informe de modelo digital 3D que comunique la incertidumbre y confiabilidad del modelo digital. Se deben incluir todos los archivos de bases de datos relevantes que incluyan datos interpretados y archivos de datos 3D (por ejemplo, los archivos de malla para las superficies de límites geológicos de ingeniería).
- Recomendaciones para trabajos futuros, si son relevantes o necesarios.
- Incertidumbres restantes
- Una “declaración de limitaciones” relacionada con cualquier aspecto del informe, cuando se considere necesario.

#### 1.3.4.3 Informe geotécnico de la línea de base

En algunos proyectos más grandes, particularmente obras subterráneas, el propietario y sus ingenieros pueden optar por preparar un Informe de referencia geotécnico (GBR) para asignar los riesgos asociados con el terreno entre el empleador y el contratista.

#### 1.3.4.4 Mapas y Secciones Geológico-ingenieriles

Los mapas y las secciones Geológico-ingenieriles son una parte fundamental del Sistema del conocimiento del EGM y debe ser preparado de acuerdo con estas directrices

### 1.3.5 Creando y visualizando un modelo digital 3D

Ha habido un cambio reciente, aunque fundamental, hacia el uso de software para crear modelos digitales 3D, generalmente para proyectos de mediana y gran escala o donde se encuentra una geología compleja. Esto, a su vez, ha llevado a una mejora radical en la interoperabilidad del marco de conocimiento del EGM con otras disciplinas. En la Figura 1-5 a continuación se muestra un proceso típico de desarrollo de modelos digitales 3D.

#### 1.3.5.1 Software de modelación

Existe una amplia gama de paquetes de software que se pueden utilizar para producir modelos digitales 3D

y 2D.

#### 1.3.5.2 Fuentes de datos y gestión

Deben conservarse registros claros y recuperables de cómo se crean/modifican/interpretan/almacenan los conjuntos de datos, así como de la verificación y otras etapas del proceso de desarrollo. Para ayudar en el proceso de verificación/revisión/verificación/aprobación, es importante conservar registros (metadatos) claros y recuperables de cómo se crean/modifican/interpretan/almacenan los conjuntos de datos. Los vínculos entre los conjuntos de datos originales y los conjuntos de datos del modelo modificado son útiles para mantener la coherencia, la responsabilidad y proporcionar información sobre la incertidumbre del modelo.

#### 1.3.5.3 Documentación del modelo digital 3D

Cada versión importante de un modelo digital 3D debe ir acompañada de un Informe de modelo digital 3D.

El Informe del Modelo Digital 3D debe documentar:

- El proyecto, el propósito y el alcance del modelo.
- Un resumen de la geología ingenieril del sitio
- La extensión geográfica, escala y aplicabilidad del modelo y el sistema de coordenadas utilizado.
- Las entradas al modelo, incluidos datos del subsuelo, datos de mapas, datos de superficie y puntos del subsuelo, superficies y mallas que se han utilizado para formular el modelo digital, una evaluación de la calidad y confiabilidad de los diferentes conjuntos de datos y qué manipulación/transformación ha habido para su incorporación al modelo.
- Las unidades y superficies delimitadoras que se muestran en el modelo digital, que pueden ser geológicas, geológicas de ingeniería, geomorfológicas, hidrogeológicas o geoquímicas, según el propósito del modelo.
- Los datos que no se han utilizado y por qué se han omitido.
- La confiabilidad y el estado del modelo y un resumen de cualquier otra suposición e incertidumbre en el modelo, incluida la confiabilidad del modelo y los riesgos relacionados.
- Evidencia de verificación
- Un resumen de los resultados obtenidos a partir del modelo, incluida cualquier limitación.
- El Registro de Decisión del Modelo y una lista de la gestión de datos/desarrollo de versiones del modelo digital 3D que incluye:
  - Fecha de decisión.
  - Detalle de la decisión/cambio.
  - Justificación de la decisión/cambio
  - Comentarios de verificación/revisión.

El Informe del modelo digital 3D debe actualizarse cada vez que se vuelva a editar el modelo digital 3D. En proyectos más grandes donde se realizan investigaciones en múltiples frentes, el modelo se puede actualizar diariamente ya que el modelo se puede vincular directamente a bases de datos y los nuevos datos se incorporan automáticamente. Un geólogo-ingenieril competente debe verificar los nuevos datos cuando se importan para confirmar la interpretación existente y realizar cualquier edición manual necesaria para incorporar el nuevo conjunto de datos.



#### 1.3.5.4 Revisión de modelos digitales 3D

La revisión de los modelos digitales 3D debe demostrar su confiabilidad con énfasis en la calidad del proceso involucrado en su construcción, claridad de comprensión y transparencia con respecto a las incertidumbres. Por encima de todo, la revisión debe demostrar la concordancia entre los resultados del modelo digital y la realidad de las condiciones geológicas de ingeniería observadas e interpretadas.

Siempre que se desarrollan modelos digitales 3D, se recomienda generar también planos y secciones 2D ilustrativos para garantizar que el vínculo con el EGM subyacente sea transparente y pueda ser explorado por personas sin conocimientos técnicos sin el uso de software de visualización patentado. El desarrollo de planos y secciones ilustrativos también suele ser una forma útil de detectar "irregularidades" geológicas de ingeniería en el modelo.

La lista de verificación en la Tabla I-4 a continuación proporciona elementos específicos a considerar durante la revisión y verificación cuando se ha desarrollado un modelo digital 3D.

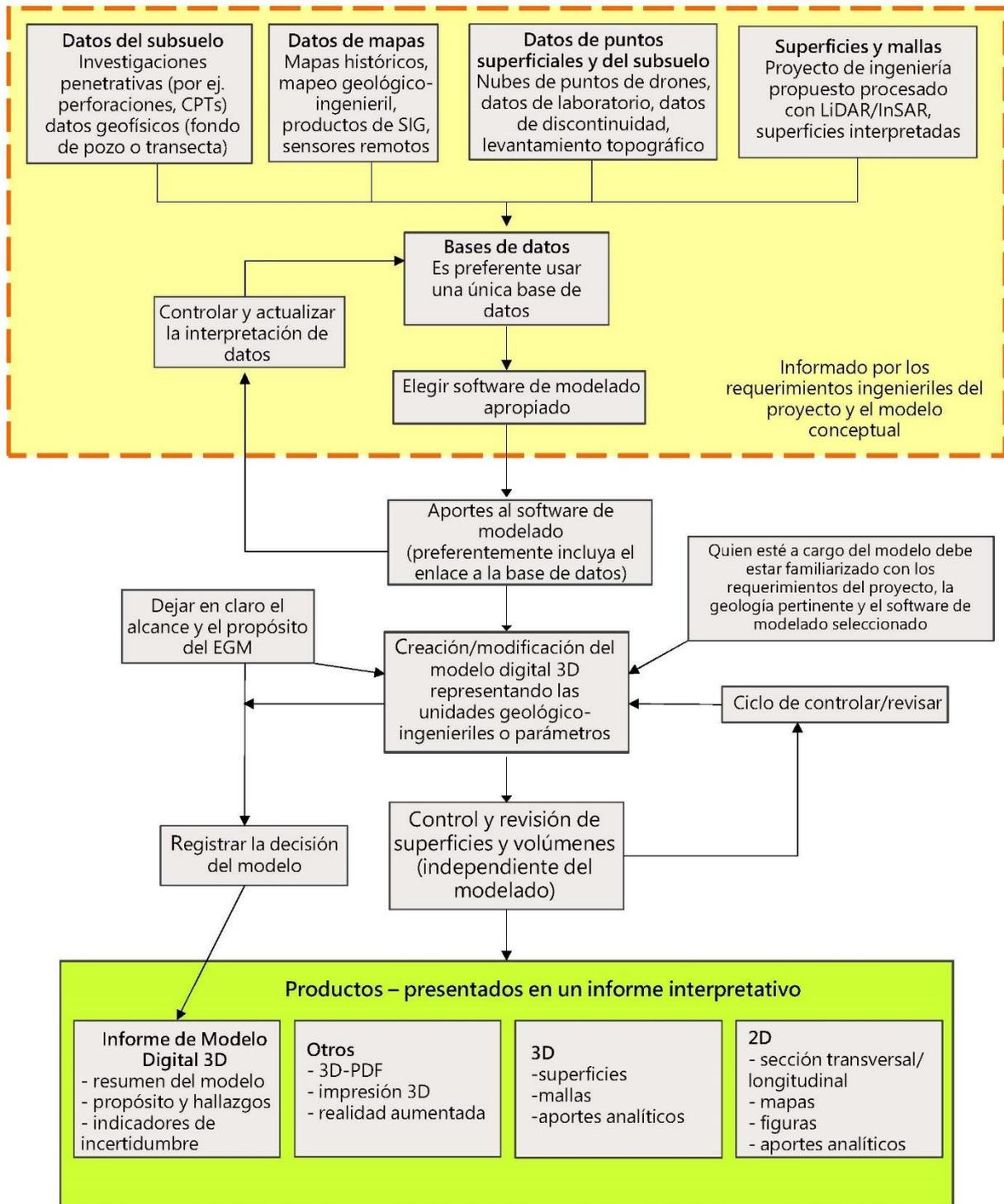


Figura I-5 Proceso típico de desarrollo de modelos digitales 3D.

**Tabla I-4** Lista de chequeo para revisión de los modelos digitales 3D

<b>Actividad clave</b>	<b>Estado</b>
¿Se ha definido claramente el propósito del modelo?	
¿Cubre el alcance del modelo el área de interés del proyecto y el alcance de los posibles efectos del proyecto, si el modelo se va a utilizar para evaluaciones de efectos?	
¿Se han identificado claramente las fuentes de datos utilizadas para formular el modelo?	
¿La calidad de los datos disponibles es suficiente para el propósito del modelo?	
¿Es necesario incorporar al modelo otras fuentes de datos potencialmente útiles?	
¿Es razonable ignorar los datos que se han omitido específicamente del modelo y se han dado razones por las cuales estas fuentes no se han considerado aplicables?	
¿Existe una cantidad adecuada de puntos de datos y una distribución razonable de puntos en el área del modelo para hacer una interpretación representativa razonable?	
¿La manipulación de los datos que se han utilizado es aplicable y geológicamente razonable?	
¿Se ha revisado el modelo de acuerdo con el Nivel de Desarrollo del EGM?	
¿El modelador le ha guiado al revisor a través del modelo?	
¿Se han proporcionado mapas ilustrativos y secciones transversales?	
¿Se ha elaborado un Informe de modelo digital 3D que incluya un Registro de decisiones del modelo, incertidumbres identificadas y riesgos asociados y recomendaciones para mejorar la confiabilidad?	

#### 1.3.5.5 Salidas de los modelos digitales 3D

Una vez que el modelo digital 3D y los resultados hayan sido revisados y verificados y estén listos para su emisión, se podrán entregar el modelo digital y los resultados especificados. La naturaleza de los resultados influirá en cómo se presenta la información. Pueden ser resultados 3D o 2D (o ambos), dependiendo de los requisitos del proyecto, pero puede que no haya necesidad de software de visualización si este no es el método de comunicación más eficaz; pueden ser más eficaces mapas, gráficos, dibujos animados, presentaciones, etc. La forma en que se presentan los resultados y el nivel de detalle incluido deben ser adaptados a la audiencia.

**Consulte la Sección de Comentarios 2.3 AJUSTE Y COMUNICACIÓN DEL EGM para obtener más información.**

## **I.4 GESTIÓN DE INCERTIDUMBRE DEL EGM**

### **I.4.1 Introducción**

La incertidumbre dentro del EGM tiene el potencial de reducir la confiabilidad de la ingeniería del proyecto y aumentar el potencial de riesgos del proyecto. Se debe evaluar la incertidumbre y desarrollar estrategias para reducirla y los riesgos asociados del proyecto a niveles acordados.

### **I.4.2 Fuentes de incertidumbre**

La forma en que se integra el conocimiento dentro del EGM refleja la relación dinámica entre el componente conceptual y el componente observacional. Estos dos componentes fundamentales del EGM se caracterizan por diferentes fuentes de incertidumbre: incertidumbre conceptual e incertidumbre observacional.

- La incertidumbre que se produce en el proceso de conceptualización se debe a una falta de conocimiento o a un sesgo. Esto también se conoce como incertidumbre epistémica pero para facilitar la referencia, estas Directrices han adoptado el término incertidumbre conceptual. La incertidumbre conceptual refleja principalmente la idoneidad de los conceptos subyacentes al EGM que, a su vez, dependen en gran medida del conocimiento y la experiencia de los involucrados.
- La incertidumbre en los datos dentro del modelo de observación se debe a la variabilidad y aleatoriedad de las propiedades intrínsecas del terreno y la precisión de las mediciones de los dispositivos de ensayos. Esto se conoce como incertidumbre aleatoria, pero para facilitar la referencia, estas Directrices han adoptado el término incertidumbre observacional. Es probable que las áreas con menos observaciones directas sean más inciertas que las áreas con observaciones directas frecuentes. Tenga en cuenta que cualquier interpretación de los datos dentro del modelo observacional estará asociada con incertidumbre conceptual.

### **I.4.3 Evaluación holística de la confiabilidad del EGM mediante revisión**

La revisión del proyecto debe evaluar la confiabilidad de los componentes conceptuales y de observación del EGM de manera integral, en lugar de separarlos. El Nivel de Desarrollo del proyecto proporciona orientación sobre el tipo de revisión (Sección 1.2.2. – Tablas 1-1 y 1-2).

- Para proyectos de Nivel 1, las revisiones internas proporcionarán una verificación básica de la confiabilidad del EGM. Otro ingeniero geólogo del equipo del proyecto responsable del EGM debería realizar una verificación del desarrollo y perfeccionamiento del modelo. La confiabilidad del componente conceptual debe compararse con análogos conceptuales apropiados derivados de la educación, la experiencia, la literatura y la compatibilidad del componente observacional con el componente conceptual evaluado.
- Para los proyectos de Nivel 2 la revisión será como para el Nivel 1 pero realizada por revisores externos. Estos pueden ser externos al equipo del proyecto o externos a la propia organización.
- Para proyectos de Nivel 3, lo ideal sería utilizar un panel de revisión de expertos formado por expertos reconocidos para evaluar la confiabilidad de un EGM revisando y comentando de forma independiente sobre el contenido, la integridad y la confiabilidad de la documentación del proyecto. Estos deberán ser designados por el cliente como especialistas independientes.

### **I.4.4 Otros métodos de determinación de la incertidumbre y confiabilidad del EGM**

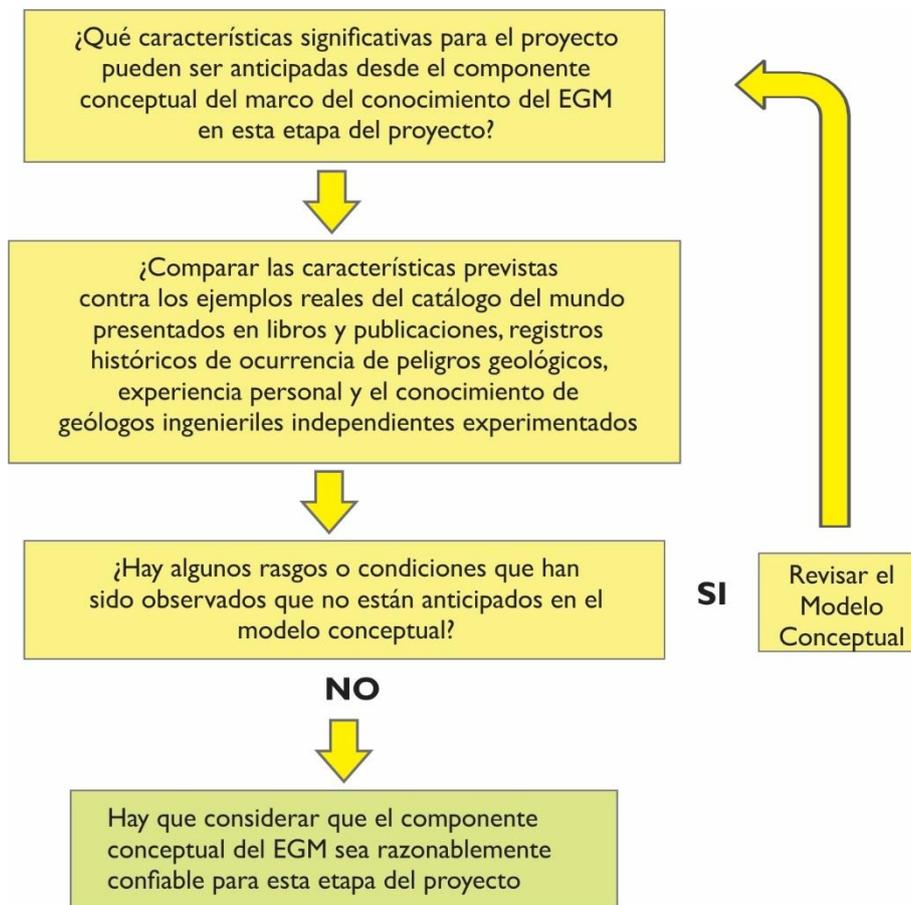
Es necesario considerar toda la información que contribuye al EGM para evaluar tanto la incertidumbre como la confiabilidad. Para el componente de observación del EGM, dichas comprobaciones son

relativamente sencillas y pueden realizarse cuantitativa o cualitativamente. Sin embargo, los métodos cuantitativos no pueden ayudar de manera realista a reducir los errores de confiabilidad derivados de imprecisiones en la comprensión conceptual. Sólo comprobando la veracidad de los conceptos mediante enfoques cualitativos se puede evaluar este componente del EGM y, por tanto, confirmar su nivel de fiabilidad.

#### 1.4.4.1 Evaluación de la confiabilidad del componente conceptual

En la Figura I-6 se ilustra un enfoque para la evaluación del componente conceptual del EGM. Este enfoque debe ser adoptado en todas las etapas del proyecto por individuos, revisores pares y paneles de expertos.

El mejor modo para evaluar la confiabilidad del componente conceptual es a través de un panel de expertos o una revisión por pares. Sin embargo, también se deben realizar verificaciones cualitativas básicas de la confiabilidad conceptual de un EGM a medida que se desarrolla. Siempre se debe realizar una autoverificación, así como una verificación interna, cuyos resultados deben documentarse.



**Figura I-6** Enfoque para evaluar la confiabilidad del componente conceptual del EGM.

#### 1.4.4.2 Evaluación de la confiabilidad del componente observacional: enfoques cualitativos

La confiabilidad del componente observacional del EGM se puede comunicar cualitativamente utilizando métodos como mapas temáticos y la clasificación de la confiabilidad de conjuntos de datos.

#### 1.4.4.3 Evaluación de la confiabilidad del componente observacional: enfoques semicuantitativos

Se han ideado varios métodos en los que se califican los componentes del EGM y se combinan las diversas puntuaciones para proporcionar una evaluación numérica ordinal de la confiabilidad.



#### 1.4.4.4 Evaluación de la confiabilidad del componente observacional: enfoques cuantitativos

Las evaluaciones cuantitativas se limitan a evaluar los componentes observacionales del EGM y se pueden emplear tres familias de herramientas:

- Simulaciones de campo aleatorio y método de elementos finitos aleatorios (RFEM implica el uso de terreno virtual aleatorio combinado con análisis de elementos finitos dentro de una simulación de Monte Carlo).
- Métodos geoestadísticos (tanto estacionarios como no estacionarios, como los métodos kriging).
- Simulaciones estocásticas.

**Se refiere a los comentarios de la sección 2.4 INCERTIDUMBRE EN LA GESTION DEL EGM para información adicional**

## I.5 ASEGURANDO LA CALIDAD DEL EGM

### I.5.1 Controlando la calidad del proceso de desarrollo del EGM

Si se implementan estas Directrices, se debería lograr un EGM de calidad adecuada. En la Tabla I-5 se establece una lista de verificación de QA/QC (Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad) para el cumplimiento de estas Directrices.

**Tabla I-5** Lista de chequeo del proceso Control de Calidad/Aseguramiento de la calidad

Actividad clave	Estado
¿Se ha formado un equipo eficaz y competente, incluido un revisor?	
¿Se han definido claramente el alcance y el propósito del EGM?	
¿Cumple el EGM con los documentos/especificaciones de la licitación?	
¿Se ha reunido en un estudio documental la información geológica y de ingeniería relevante para el proyecto?	
¿Se ha definido una extensión geográfica y una escala apropiadas para presentar el EGM?	
¿Se han adquirido las observaciones a través de investigaciones y se han documentado como hechos?	
¿Están claramente identificadas las fuentes de datos utilizadas para formular el EGM?	
¿La calidad de los datos disponibles es suficiente para cumplir con los propósitos del EGM?	
¿Existen otras fuentes de datos potencialmente útiles?	
¿Se han omitido datos específicamente en el EGM? ¿Es eso razonable?	
¿Están relacionadas las observaciones con los conceptos y se han conceptualizado e interpretado las condiciones geológicas de ingeniería?	
¿Se han definido unidades geológicas de ingeniería y sus características de ingeniería?	
¿Se ha presentado un Modelo Geológico?	
¿Se ha presentado un Modelo Geotécnico?	
¿Se ha presentado una Evaluación de Riesgos geológicos?	
¿Se han identificado riesgos, vacíos y discrepancias importantes en el marco de conocimientos?	
¿Se ha proporcionado información para su uso en análisis de ingeniería?	
¿Se ha documentado todo el marco de conocimientos de EGM?	
¿Se han proporcionado mapas y secciones para ilustrar las condiciones geológicas de ingeniería que son importantes para el proyecto?	
¿Se han indicado mayores conocimientos necesarios para mejorar el EGM, reducir los riesgos, facilitar la actualización del diseño o gestionar reclamos?	
Si se ha desarrollado un modelo digital 3D, ¿se ha completado la lista de verificación de la Tabla I-4?	
¿El EGM ha sido revisado por un ingeniero geólogo debidamente calificado y con experiencia apropiado para el nivel de complejidad de la geología y el proyecto?	

**Consultar la Sección de comentarios 2.5 GARANTIZAR LA CALIDAD DEL EGM para obtener más información.**



# **Directrices para el desarrollo y aplicación de modelos geológico-ingenieriles en proyectos**

## **2 COMENTARIOS**



## **2.1 PRINCIPIOS DEL DESARROLLO DEL EGM**

### **2.1.1 Definiciones**

Sin comentarios.

### **2.1.2 Fundamentos principales**

Sin comentarios.

## 2.2 PROCESO PARA EL DESARROLLO DE UN EGM

### 2.2.1 Descripción general del proceso

Sin comentarios.

#### 2.2.1.1 Etapas iniciales

Sin comentarios.

#### 2.2.1.2 Desarrollo del proceso

Sin comentarios.

#### 2.2.1.3 Técnicas útiles para el desarrollo de un EGM

En el desarrollo de un EGM se deben considerar las siguientes técnicas útiles:

- Conforme se desarrolla el EGM se debe tener un cuestionamiento continuo de conceptos, observaciones e interpretaciones. Sea flexible y prepárese para cambiar de opinión.
- Es esencial una perspectiva global. Al desarrollar el EGM considera desde procesos geológicos muy lejanos hasta los más próximos, tales como contextos tectónicos pasados y presentes, historial geológico y geomorfológico a largo plazo. Posteriormente, utiliza ese conocimiento para considerar las condiciones de escala, así como el área geográfica más allá de los límites del sitio que requiere evaluación. Puede ser necesario desarrollar modelos a gran escala a partir de conjuntos de información de pequeña escala.
- Los desarrollos a gran escala o modelos muy complejos con grandes cantidades de información pueden ser desafiantes. El EGM debe capturar las particularidades esenciales del diseño/proyecto, pero también debe ser lo suficientemente robusto para evaluar la variabilidad de la geología ingenieril, así como cualquier cambio probable en el proyecto.
- El EGM también debe tomar en cuenta la dimensión temporal. Por ejemplo, la velocidad con la que están ocurriendo los procesos geomorfológicos y cualquier impacto potencial en la estructura diseñada a lo largo de su vida útil.
- Cuando se conozca, el desarrollo propuesto (dibujado a escala) debe superponerse a todos los planos, secciones y visualizaciones 3D. Esto incluirá cualquier revisión del desarrollo, como adiciones, movimientos o eliminación de instalaciones, a medida que avanza el proyecto.

Los errores comunes que se cometen durante el desarrollo de un EGM incluyen:

- Omitir datos o hechos que no se ajusten o contradigan un modelo preconcebido. Los datos no deben omitirse a menos que se pueda demostrar que son sólidamente defectuosos, en cuyo caso se debe intentar la reinterpretación antes de la omisión. Tenga en cuenta que la información contradictoria a menudo puede indicar una complejidad geotécnica no considerada durante el desarrollo del modelo conceptual.
- Desarrollar ideas conceptuales incorrectas e inadecuadas y/o ideas conceptuales que no son relevantes para el proyecto.
- Descartar datos o información histórica relevante simplemente porque no fue registrada con los estándares actuales, o porque fue adquirida durante etapas anteriores al proyecto.
- Utilizar solo datos del subsuelo omitiendo los relacionados con la geología ingenieril de superficie y mapeo geomorfológico.

- No llevar a cabo un mapeo geológico sistemático del sitio y sus alrededores, o solo efectuar el mapeo de áreas específicas y de fácil acceso.
- Trabajar hacia atrás desde la causa, el resultado o la solución.
- Usar escalas distorsionadas o inapropiadas. Recopilación de datos a escala incorrecta para el proyecto. Uso de escalas exageradas en secciones geológicas transversales o longitudinales. Si su uso es necesario provee también una sección a escala natural.
- Tratar de incluir cada detalle sin discriminar su importancia.
- No mirar más allá del sitio o problema que se está considerando. Por ejemplo, en términos geomorfológicos, un proyecto debe colocarse en el contexto de su "situación de forma del terreno".
- Incluir datos o información sin referencia a su grado de confianza.
- Interpretar más detalles de los que permiten los datos.
- No considerar y comunicar interpretaciones alternativas.

#### 2.2.1.4 Habilidades requeridas para el desarrollo del EGM

Los conocimientos y habilidades necesarios para construir buenos EGM incluyen:

- Conocimiento de procesos geológicos, y ambientes de formación y modificación de rocas y suelos como la meteorización, la formación de laderas y la liberación de esfuerzos (es decir, conocimientos geológicos).
- Pensar en 4D (es decir, 3 dimensiones espaciales y tiempo).
- Comprensión de la geomorfológica ingenieril, en particular de los procesos geomorfológicos con sus frecuencias (a través del tiempo) y magnitudes (volumen, extensión espacial, velocidad de formación y propagación).
- Comprensión de la respuesta del suelo ante modificaciones naturales o antropogénicas. Es decir, conocimientos de ingeniería en términos de mecánica de suelos, mecánica de rocas e hidrogeología.
- Capacidad para observar los detalles y situarlos dentro del entorno general, así como evaluar críticamente la información y anular los sesgos inherentes e inconscientes.
- Comprensión del geo razonamiento y del método científico. El uso tanto del razonamiento inductivo (el proceso de hacer observaciones simples de cierto tipo y aplicar estas observaciones a través de la generalización a un problema diferente para tomar una decisión), como del razonamiento deductivo (llegar a conclusiones basadas en reglas lógicas aplicadas a un conjunto de premisas).
- Experiencia en la creación de EGMs realistas y exitosos.
- Comprender cuándo se requiere soporte técnico adicional, a menudo especializado. Este apoyo puede incluir la búsqueda de aportes de otros profesionales especializados en disciplinas como hidrogeología, ciencias geoambientales, geomorfología, geofísica, geología estructural, peligros geológicos, pedología. Además de las disciplinas de ingeniería pertinentes, como la geotecnia o la ingeniería de presas.

#### 2.2.2 Elección del nivel de desarrollo del EGM

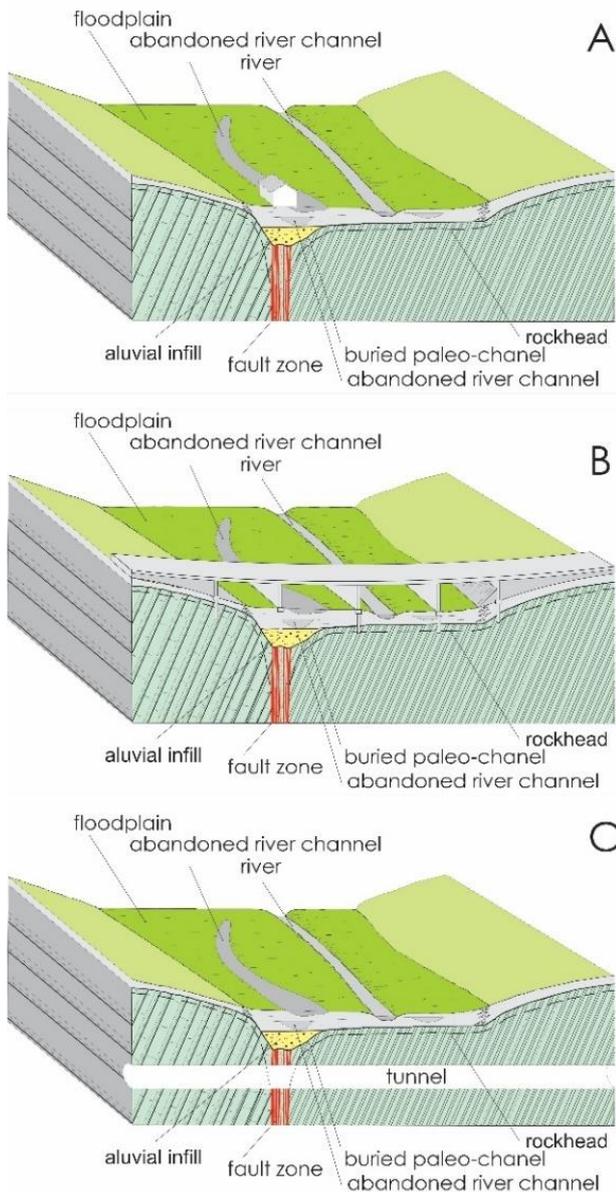
Sin comentarios.

#### 2.2.3 Detalles del proceso de desarrollo

2.2.3.1. Reunir el equipo, definir el alcance y el propósito.

Diferentes proyectos en la misma ubicación requieren que se desarrollen diferentes modelos debido a la variabilidad de la interacción potencial entre la geología y el proyecto.

La Figura 2-1 ilustra cómo diferentes aspectos de la misma geología serán significativos dependiendo de la naturaleza del proyecto (A: edificio de una sola planta; B: puente en una carretera; C: túnel). Se espera que el edificio imparta un esfuerzo vertical pequeño a la superficie del suelo. Mientras que los pilotes del puente aplicarán mayores esfuerzos verticales y laterales al terreno en profundidad; finalmente, se espera que el túnel drene y cambie el régimen de flujo de agua subterránea en profundidad (tomado de Parry et al. 2014).



**Figura 2-1** Influencia en el EGM a partir del tipo de proyecto. Reimpreso con permiso de *Springer Nature. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Parry et al. 2014, Engineering geological models – an introduction: IAEG Commission 25.*

### 2.2.3.2 Reúna información geológica y de ingeniería en el trabajo de gabinete.

En la Tabla 2-1 se presentan fuentes típicas de información a las que se debe acceder (cuando se dispone de ellas) durante un estudio documental.

**Tabla 2-1** Fuentes para un estudio documental (tomado de Shilston *et al.* 2012).

<i>Tema</i>	<i>Ejemplos de fuentes de información</i>
Topografía	Mapas, fotografías aéreas, imágenes aéreas y satelitales, DEM o DTM obtenidos de registros LiDAR, datos InSAR.
Geomorfología, geología, hidrogeología, y geología ingenieril	Mapas, memorias e informes, fotografías aéreas, imágenes aéreas y satelitales, (incluye modelos de sombras o del relieve generados a partir de LiDAR), artículos y libros publicados, registros de minas y canteras, base de datos temáticos, investigaciones previas sobre el terreno/sitio, registros del uso de agua subterránea, datos de peligros geológicos, por ejemplo peligro sísmico.
Ambiente y planificación del territorio	Mapas de planificación, fotografías aéreas, imágenes aéreas y satelitales, Google Earth, informes y mapas de geología urbana, registro de sitios arqueológicos y edificios históricos, exploraciones de suelo, registro de terrenos contaminados, Estudios de Impacto Ambiental (EIA) o Declaraciones de Impacto Ambiental (EIS), registros climáticos, información de ríos y costas.
Condiciones del sitio, uso del suelo e historia	Mapas y documentos históricos, fotografías aéreas, imágenes digitales aéreas y satelitales (incluyendo registros LiDAR), mapas de uso del suelo y planificación, informes de investigación del sitio, bases de datos de propiedades geotécnicas y de peligros geológicos, datos InSAR, mapeo de construcciones previas.
Reconocimiento del terreno	- Inspección del sitio y de la zona - Reconocimiento y verificación en terreno - Visitas a lugares específicos.
Conocimiento local	Historia local y sociedades geológicas, uso previo del sitio, registros de construcción, oficinas de autorización de construcción, periódicos, estudios geológicos regionales y nacionales, investigaciones para sitios adyacentes.
Antecedentes	Casos históricos, registros de construcción.
Códigos, normas, reglamentos y guías.	Colegios profesionales e institutos, departamentos gubernamentales, organismos de investigación y universidades.

Cualquier búsqueda bibliográfica debe diferenciar entre realidad y ficción. Existe una multitud de sitios web que contienen información potencialmente relevante. Sin embargo, no se puede confiar que todos proporcionen datos confiables. El acceso a sitios en los que se puede confiar es vital y los más adecuados son departamentos y agencias gubernamentales nacionales, regionales y locales, museos, universidades, organismos académicos y profesionales, organizaciones de normalización, etc. (Griffiths, 2019). Los sitios web de empresas, hemerotecas nacionales y regionales, y evidencias anecdóticas deben tratarse con cierto escepticismo.

Muchos proyectos de gran envergadura necesitarán incorporar mapas y secciones existentes, documentados de manera impresa en el estudio de gabinete, por lo que se aplican algunas reglas básicas:

- Garantizar que, en la medida de lo posible, todas las fuentes de datos y material archivado esté localizado. Esto puede requerir un esfuerzo considerable, ya que los registros archivados suelen estar incompletos y desordenados. Es posible que haya que tener en cuenta aspectos sobre la confidencialidad y los derechos de autor.
- Asegúrese de que la proyección cartográfica y los datos de cualquier registro antiguo se entiendan y se relacionen con la proyección y los datos que se están utilizando en el EGM. Los SIG tienen un valor incalculable al permitir la evaluación espacial de todos los registros del estudio documental, sobre todo para buscar patrones en los datos.

### 2.2.3.3 Conceptualización del EGM

Una estrategia fundamental en el desarrollo del marco conceptual es que debe haber una comprensión de la "historia geológica total" del sitio (Fookes et al., 2000). Esta estrategia se basa en la premisa de que las características ingenieriles del terreno son el resultado de la historia geológica total del área del proyecto, incluyendo modificaciones antropogénicas posteriores.

La conceptualización también brinda la oportunidad de articular una comprensión más profunda de las posibles influencias geológicas en un proyecto. Se apoya en el conocimiento y experiencia de aspectos similares como el contexto geológico, materiales o procesos, tipos o niveles de complejidad de proyectos. Este proceso es fundamental para el desarrollo del EGM y se lleva a cabo a lo largo de toda la vida del proyecto. El enfoque conceptual genera modelos hipotéticos con un grado relativamente alto de incertidumbre. Esta se encuentra directamente relacionada con el tipo y la cantidad de datos existentes, el conocimiento, y la experiencia del personal involucrado.

Los modelos conceptuales pueden ser:

- Específicos del sitio, proporcionando un marco para interpretar los datos de observación y anticipar las condiciones del terreno que pueden estar presentes en el sitio específico bajo investigación.
- Modelos conceptuales genéricos, que son independientes de una ubicación específica y proporcionan, por ejemplo, información sobre el clima general, o configuración de la geología estructural.
- Modelo conceptual temporal (a veces llamado modelo evolutivo), que ilustra cómo han evolucionado las condiciones del terreno a lo largo del tiempo geológico.

Los conjuntos de datos enumerados en la Tabla 2-1 se pueden utilizar para interpretar información relevante para el EGM de la siguiente manera:

#### *Mapas Topográficos:*

- Localización geográfica; y en consecuencia, clima actual y uso del terreno.
- Mapeo geomorfológico inicial.
- Identificación de lineamientos estructurales.
- Identificación de ríos principales y otros cuerpos de agua.
- Modificaciones antropogénicas: mapas de canteras, vertederos, pozos de minas, terraplenes, cortes, etc.
- Posibles depósitos superficiales con formas del terreno distintivos como llanuras fluviales y aluviales, loess, procesos de remoción en masa, etc.

#### *Mapas geológicos, informes, memorias y publicaciones*

- Los mapas geológicos generalmente representan la distribución de unidades crono y litoestratigráficas, los que los mapas estandarizados necesitan una interpretación considerable antes de ser parte de la base un mapa de ingeniería geológica.
- Litología. Estas unidades proporcionan el componente básico del EGM y al considerar el ambiente de formación puede proporcionar información sobre posibles variaciones litológicas que pueden estar presentes, pero no mapeadas. El conocimiento de la litología también indicará el tipo, la orientación y el espaciado de las discontinuidades que pueden estar presentes, así como el tipo y geometría de los límites externos (contactos litológicos) tanto de la unidad geológica como de las subunidades internas.

- Estratigrafía (Edad). Permite evaluar la relación entre las unidades geológicas y el posterior proceso de modificación de rocas/suelos. Por ejemplo, cambios diagenéticos, modificaciones tectónicas, meteorización, desarrollo de caliche (duricostras), etc.
- Estructuras geológicas mapeadas. Por ejemplo, plegamiento y fallamiento que permiten evaluar sus posibles efectos sobre el macizo rocoso como el desarrollo de diaclasas asociado al plegamiento, la zona de influencia de las fallas que, a su vez, influye en la profundidad de meteorización.
- Depósitos cuaternarios. Tenga en cuenta que es posible que no se haga el mapeo o solo se haga cuando superan un espesor fijo. Por ejemplo, en el Reino Unido los depósitos superficiales de menos de 1 m de espesor no suelen mapearse. Cuando se mapean, a menudo se simplifican considerablemente.
- Límites geológicos, a menudo con grados de incertidumbre indicados, por ejemplo, observados, inferidos, interpretados.
- Modificaciones antropogénicas. Trabajos asociados con la mineralización, molienda o trituración, vertederos, pozos o trincheras.
- Aunque se deben utilizar los mapas geológicos más recientes y a escala adecuada, puede ser necesario consultar mapas más antiguos porque pueden mostrar características importantes, por ejemplo, trabajos de minas abandonadas o estructuras que no se muestran en mapas posteriores. La geología mapeada puede cambiar con cada generación de mapas a medida que se revisan los paradigmas geológicos y puede ser útil entender cuál es la situación.

#### *Fotografías aéreas, imágenes de sensores remotos.*

La cartografía mediante fotografías aéreas, escáneres multiespectrales aerotransportados o imágenes satelitales ayuda en gran medida al desarrollo de ideas conceptuales. Si bien, las imágenes específicas pueden ser limitadas, las imágenes de *Google Earth* están disponibles para prácticamente todo el mundo. La cartografía debe incluir, pero no limitarse a:

- Entorno geomorfológico.
- Procesos geomorfológicos pasados y presentes (y tasas probables de cambio). Por ejemplo, los procesos periglaciares relictos y la actual incisión fluvial.
- Estructuras geológicas específicas y estructura geológica general.
- Regolito, cuando se utiliza la interpretación de datos multiespectrales de la litología y mineralogía de arcillas.
- Afloramiento, y en algunos casos, cuando se utilizan datos multiespectrales, una interpretación provisional de la litología superficial.
- Modificación antropogénica.

#### *LiDAR*

En algunos países, se dispone de amplias fuentes públicas LiDAR, pero para muchos proyectos se requieren registros específicos LiDAR. Utilizando Modelos Digitales de Terreno (DEM), se pueden generar imágenes de sombreado/relieve sombreado cuya interpretación proporciona información sobre:

- Geomorfología. Por ejemplo, deslizamientos, cauces abandonados, etc.
- Delimitación de afloramientos.
- Mapeo superficial.

- Estructuras geológicas principales.
- Actividades antropogénicas y/o para investigaciones arqueológicas.

#### *Datos existentes de investigación terrestre*

Muchos proyectos contarán con datos de investigación existentes. Dependiendo de la antigüedad de los registros existentes los datos pueden estar asociados a diversos grados de incertidumbre. En consecuencia, es posible que los datos deban interpretarse antes de la conceptualización.

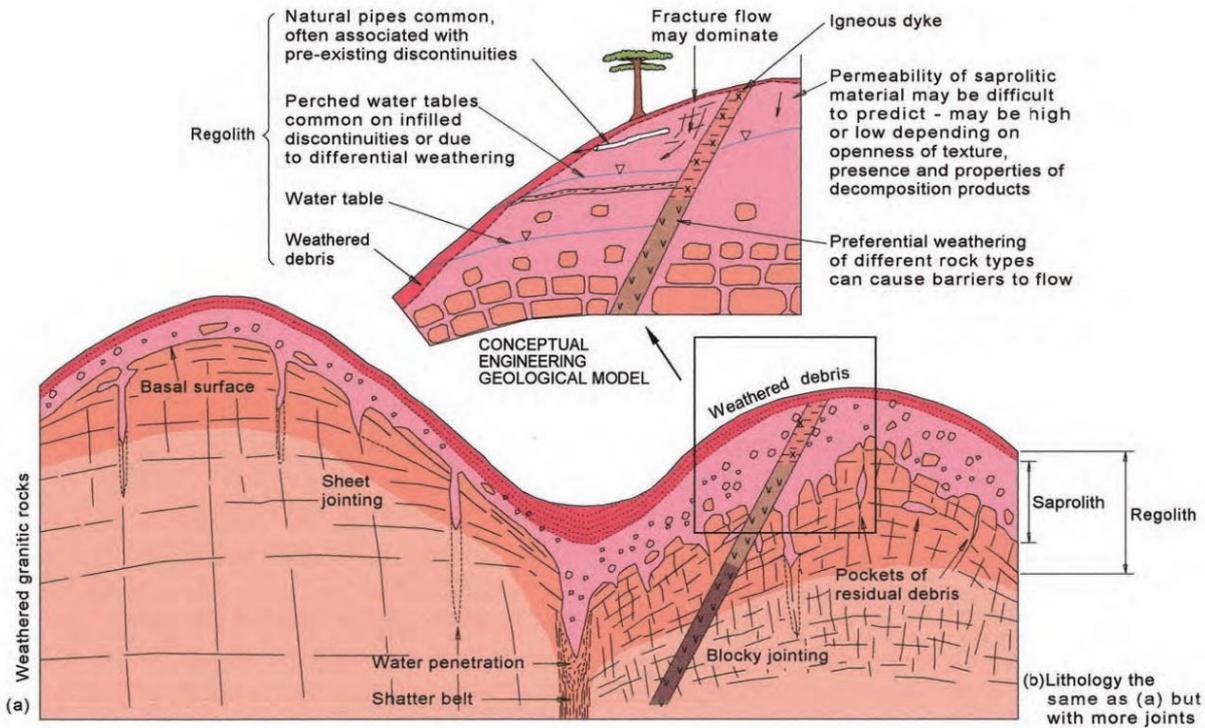
Durante la recopilación de toda la información relevante, el proceso de conceptualización debe desarrollarse sistemáticamente bajo los siguientes enunciados:

##### 2.2.3.3.1 Configuración del proyecto

Los resúmenes globales y regionales de las condiciones geológicas y geomorfológicas, entornos tectónicos, climas presentes y pasados, y procesos asociados a la formación del terreno, esfuerzos *in situ*, etc., proporcionan un contexto general para la conceptualización.

##### 2.2.3.3.2 Estratigrafía: tipos de suelo y roca y su relación

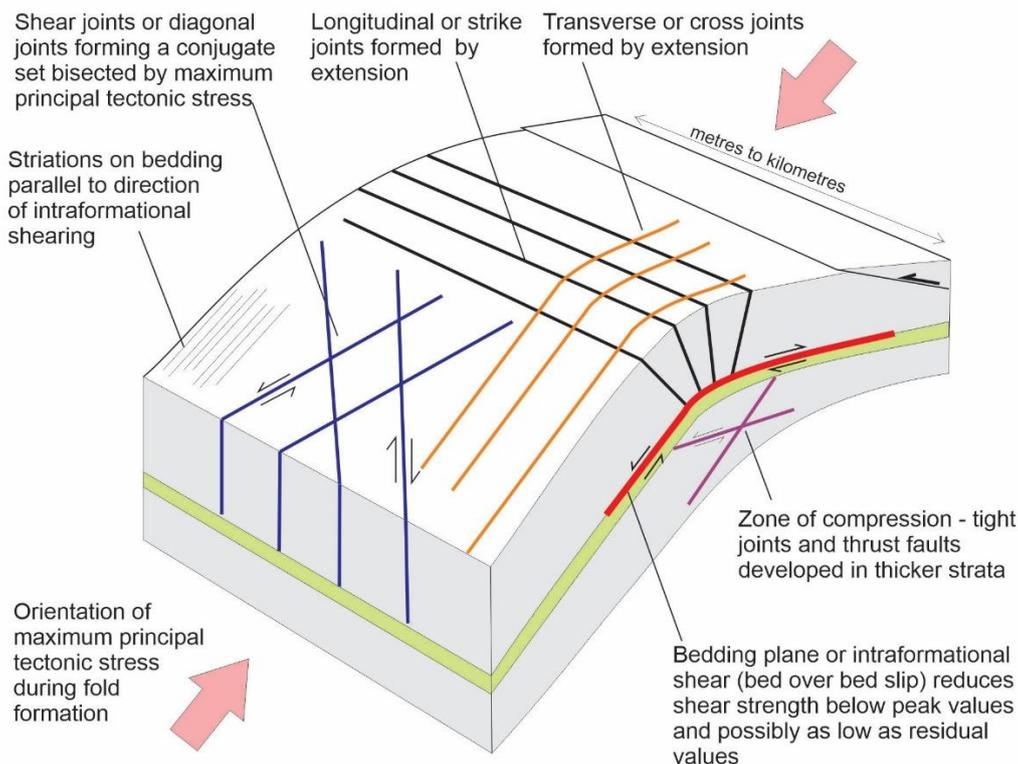
Los tipos de suelo y roca presentes en el área del proyecto y sus relaciones estratigráficas pueden deducirse de los mapas geológicos, y a menudo se muestran mediante columnas litológicas o perfiles geológicos en el mapa. El conocimiento obtenido de los mapas geológicos apoya el desarrollo de un modelo conceptual que anticipa la presencia y características de ciertas unidades geológicas, la naturaleza de sus límites y la relación espacial entre ellas, etc. Es decir, el mapa geológico y cualquier memoria o informe que lo acompañe, pueden utilizarse para deducir la *historia geológica total*. Esta parte de la conceptualización se basa en el conocimiento geológico fundamental de los diferentes tipos de rocas e importancia ingenieril de sus propiedades. Desde una perspectiva geológica, hay una gran variedad de rocas, pero para fines ingenieriles las clasificaciones simplificadas contenidas en la mayoría de las normas descriptivas son normalmente suficientes. Inicialmente, este tipo de evaluación se basará en la experiencia personal y en referencias bibliográficas relevantes, particularmente en modelos genéricos y compilación de características ingenieriles. Para revisión de diferentes modelos conceptuales genéricos, véase Fookes et al. (2015) y Fell et al. (2015). Por ejemplo, la Figura 2-2 muestra las condiciones que se pueden anticipar en terrenos graníticos que han sido sometidos a meteorización química profunda.



**Figura 2-2** Características típicas del granito. Tomado de Fookes et al. (2015). *Geomodels in engineering geology – an introduction*. © Whittles Publishing 2015.

### 2.2.3.3.3 Estructura geológica

La estructura geológica probable puede extrapolarse a partir del mapa geológico o del conocimiento y experiencia de entornos geológicos similares. Lo que se puede anticipar es, una vez más, una mejor apreciación al considerar modelos conceptuales genéricos relevantes, por ejemplo, ver Figura 2-3.



**Figura 2-3** Estructuras asociadas con un anticlinal (basado en Price y Cosgrove, 1990).

#### 2.2.3.3.4 Procesos superficiales y subterráneos

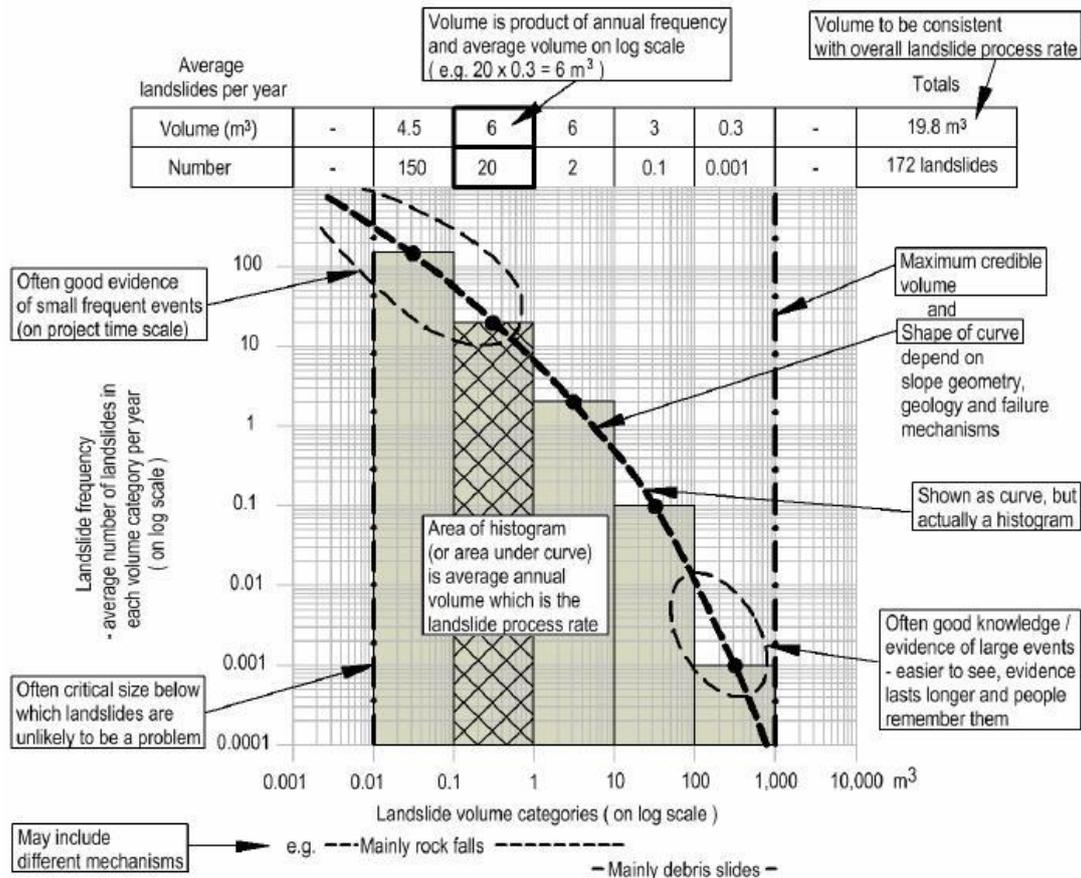
Se requiere conocimiento y experiencia en geología y geomorfología para evaluar qué procesos pueden haber ocurrido en el pasado, así como qué procesos están activos, o podrían ser reactivados por el proyecto. Por ejemplo, la posible relajación de esfuerzos en el valle que podrían afectar la estabilidad de laderas, la permeabilidad del macizo rocoso, el control de las aguas subterráneas y su entrada en los túneles.

Por lo general, ello implica la clasificación del proceso relevante y el desarrollo de información sobre su velocidad de desarrollo. En la Figura 2-4 se muestra un ejemplo de cómo el marco de conocimientos desarrollado para los deslizamientos que afectan al sitio de un proyecto se puede presentar en una forma adecuada para respaldar una evaluación de peligros.

El concepto de palimpsesto (literalmente: sobreimpresión de escritura en diferentes épocas) debe ser considerado en cualquier investigación del paisaje. La mayoría de los paisajes son una combinación de relictos y componentes activos y procesos producidos bajo una variedad de condiciones ambientales.

Como resultado, el paisaje puede contener una combinación de:

- Formas del relieve como relictos a los que los procesos contemporáneos no afectan.
- Formas del relieve como relictos afectados por procesos contemporáneos o que podrían reactivarse si se producen cambios.
- Formas del relieve activos.



**Figure 2-4** Modelo genérico de frecuencia de Procesos de Remoción en Masa con respecto a su volumen (Moon et al. 2005). Reproducido con permiso de los autores.

El modelo conceptual debe explicar la evolución del paisaje actual y anticipar cómo éste puede verse afectado o afectar al proyecto. Para comprender los posibles procesos geomorfológicos, es útil desarrollar un modelo conceptual genérico de las formas morfológicas que caracterizan el área. Estas constituyen conjuntos identificables de formas geográficas que resultan de tipos climáticos distintivos que actúan durante un período de tiempo. Los modelos conceptuales genéricos pueden ayudar en la creación de modelos conceptuales específicos del sitio. También proporcionan una lista de verificación del tipo de características y peligros geológicos que se pueden encontrar en estas áreas. Para visualizaciones de diferentes modelos conceptuales genéricos de relieves, véase Fookes et al. (2015).

### 2.2.3.3.5 Caracterización inicial de la ingeniería

Sobre la base del conocimiento y la experiencia, se pueden documentar las posibles características ingenieriles de los diversos componentes del modelo conceptual. Numerosas publicaciones resumen las características ingenieriles típicas de diferentes materiales geológicos. Por ejemplo, las propiedades del macizo rocoso de un granito y gneis con diferentes grados de meteorización fueron resumidas por Dearman et al. (1978). Cuando existe conocimiento y experiencia considerables, es posible desarrollar estimaciones iniciales de características como resistencia y rigidez a partir de descripciones de macizos rocosos utilizando una variedad de métodos. Por ejemplo, el enfoque GSI (Hoek y Brown, 2019). Sin embargo, las incertidumbres asociadas con este enfoque deben documentarse plenamente.

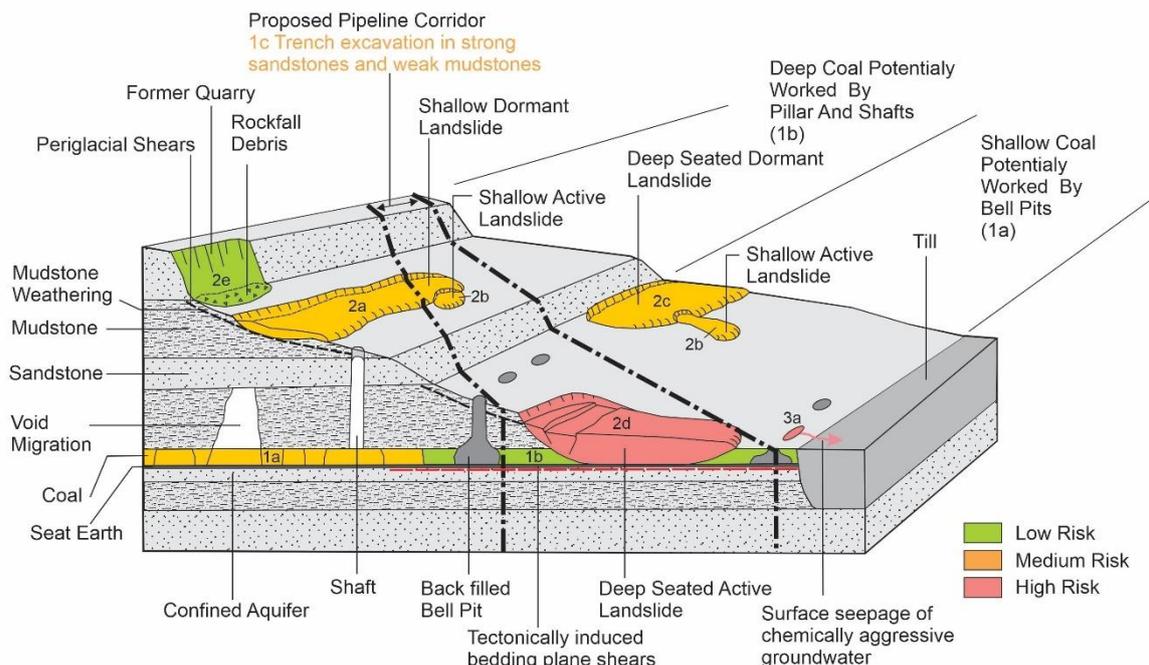
Además de los registros de riesgo iniciales, el modelo conceptual puede utilizarse para generar "Condiciones de Referencia" iniciales que definan contractualmente las condiciones que se esperan para los proyectos (Baynes et al., 2005).

### 2.2.3.3.6 Modelo Geológico inicial

Dependiendo del proyecto, el Modelo Geológico inicial puede incluir una cantidad significativa de datos observacionales existentes o puede basarse casi por completo en la conceptualización y, por lo tanto, la incertidumbre del modelo puede variar significativamente. Sin embargo, a medida que se desarrolla el Modelo Geológico se obtiene un marco lógico para el diseño de la investigación del sitio que debe tener como objetivo reducir la incertidumbre del modelo.

### 2.2.3.3.7 Ejemplo de conceptualización

En la figura 2-5 se muestra el ejemplo de la visualización de un modelo conceptual.



**Figura 2-5** Visualización de un EGM a partir del estudio de gabinete del componente conceptual para un gasoducto que atraviesa un terreno inestable afectado por la minería y deslizamientos (tomado de Baynes et al., 2021).

### 2.2.3.4 Adquirir observaciones del área del proyecto a lo largo de las investigaciones

Los registros "reales" del terreno se generan mediante el registro conforme a las normas nacionales o las directrices internacionales. No obstante, dichos registros pueden presentar limitaciones y pérdida de datos observacionales si solo cumplen con los estándares mínimos. Es necesario que los sistemas de registro sean flexibles para enfocar la recopilación de datos en factores clave que el modelo conceptual o el modelo observacional temprano indican que probablemente controlarán el diseño.

En general, es útil proporcionar una interpretación geológica en el registro (según lo dispuesto en las Normas Australianas, ASI726 2017), ya que esto ayuda en la interpretación de las condiciones generales del sitio y por lo tanto agrega valor a los registros. Sin embargo, esto requiere que el intérprete tenga conocimiento del EGM. Es posible una interpretación incorrecta, por lo que es esencial una indicación del grado de confianza de la interpretación.

Los observadores necesitan interpretar lo que están observando y deben decidir qué más o dónde más las condiciones deben ser observadas y medidas, en función de sus observaciones e interpretaciones previas.

Claramente, las personas más experimentadas tienen una ventaja. Si se proporciona al observador el EGM, la probabilidad que haga una interpretación correcta aumenta significativamente. Además, los valores atípicos y las anomalías son más fáciles de reconocer, documentar y evaluar.

Tenga en cuenta que la interpretación de campo puede cambiar con datos adicionales o conocimientos/experiencia y, a medida que se desarrolla el EGM, puede ser necesario reevaluar los registros anteriores. Cuando se realicen cambios en la interpretación, estos deben documentarse.

A pesar del cambio a la entrada digital de datos, algunos datos no son fácilmente manejables. Por ejemplo, el registro en terrenos complejos y las complejas relaciones ilustradas por dichos registros no son necesariamente fáciles de introducir de manera digital. En tales circunstancias, también se deben proporcionar los registros originales con bocetos en papel y lápiz.

#### 2.2.3.5 Combinación de modelos conceptuales y modelos observacionales en el EGM

Sin comentarios.

#### 2.2.3.6 Definición y caracterización de unidades geológico-ingenieriles.

Sin comentarios.

##### 2.2.3.6.1 Complejidad geotécnica

Sin comentarios.

##### 2.2.3.6.2 Caracterización ingenieril

Sin comentarios.

##### 2.2.3.6.3 Zonificación

Sin comentarios.

##### 2.2.3.7 Incertidumbre, huecos de información y discrepancias en el EGM.

Sin comentarios.

### 2.2.4 EGM y Eurocódigo

La última versión del Eurocódigo 7, Parte 2 (en preparación para su implementación en abril de 2023) describe un enfoque para la investigación y diseño de los componentes geotécnicos de un proyecto. Norbury (2020) señaló que había dos tipos distintos de modelos en el Eurocódigo 7.

- (1) El Modelo Terrestre (en EN 1997-2:2004) incluye la geología, presentación y evaluación de resultados de ensayos.
- (2) El Modelo Geotécnico (en EN 1997-1:2004) cubre el diseño de la estructura y, por lo tanto, incluye la selección de los parámetros de diseño geotécnico.

Aunque la terminología es diferente, el enfoque del Eurocódigo encaja dentro del enfoque general del EGM para los proyectos de ingeniería civil. Sin embargo, el enfoque del Eurocódigo no se adapta tan bien a la gama más amplia de decisiones de ingeniería geotécnica que a menudo se producen fuera del diseño de ingeniería civil. Por ejemplo, los estudios de peligros geológicos en alta mar, la evaluación de los recursos de canteras, la preparación de Informes Geotécnicos de Referencia, etc., donde el enfoque general del EGM es más eficaz.

## Volver a la Sección 1.2 PROCESO DE DESARROLLO DE UN EGM

## 2.3 ARMADO Y COMUNICACIÓN DEL EGM

### 2.3.1 Introducción

Sin comentarios.

### 2.3.2 Resumen para la preparación de los componentes del EGM

Sin comentarios.

### 2.3.3 Implicaciones en la adquisición del proyecto

Sin comentarios.

### 2.3.4 Informes del EGM

El EGM se documenta principalmente a través de informes de proyectos. En aquellas partes del mundo donde el litigio se ha asociado a menudo con la contratación de grandes proyectos, convencionalmente, y a menudo como una obligación contractual, se producen dos tipos principales de informes después de las investigaciones sobre el terreno: un informe fáctico y un informe interpretativo. Los "Informes Fácticos" se consideran generalmente como "Basados en Datos", mientras que los "Informes Interpretativos" a menudo tienen un contenido interpretativo limitado, suelen ser "A título informativo" y tienen una menor vigencia contractual. En estas circunstancias, es posible que no se presente un marco de conocimiento eficaz del EGM y que no se utilice plenamente en el ciclo de vida del proyecto.

#### 2.3.4.1 Informe de situación

En algunos casos, los propietarios optan por emitir solo información "de situación" (es decir, registros de pozos de prueba, resultados de ensayos de laboratorio, etc.) en la creencia que proporcionar cualquier "interpretación" aumentará de alguna manera su exposición al riesgo geotécnico. Se acepta que se trata de una práctica común, pero la retención de interpretaciones a los diseñadores o contratistas posteriores sólo trae como consecuencia la reducción de su capacidad para prever condiciones que se podrían encontrar en el terreno y, por lo tanto, ellos pagarían las consecuencias.

#### 2.3.4.2 Informe Interpretativo

Los informes interpretativos rara vez documentan los componentes conceptuales del EGM y suelen presentar un único "modelo de terreno" sin explicar cómo se obtuvo y si existe alguna incertidumbre asociada. Estos problemas se ven agravados por el hecho de que los contratistas que hacen observaciones in situ durante las investigaciones, a menudo son responsables de la presentación de informes fácticos y en contraparte, los consultores que tal vez nunca hayan estado en el lugar son responsables del componente interpretativo. Esta incongruencia de la investigación puede dar lugar a una interpretación incorrecta y engañosa del terreno.

#### 2.3.4.3 Reportes Geotécnicos de Referencia

Los informes interpretativos se utilizan cada vez más para generar Reportes Geotécnicos de Referencia (GBR, por sus siglas en inglés) para establecer una distribución más clara de riesgos al proporcionar una *interpretación contractual* de las condiciones del terreno (Davis, 2017). La Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC) cuenta con un libro de contratos (Emerald Book) especialmente diseñado para el uso de Informes Geotécnicos de Referencia (FIDIC 2019).

Un GBR establece los límites de riesgo entre el empleador y el contratista mediante la inclusión de declaraciones («declaraciones de referencia») que definen las condiciones geológico-ingenieriles o geotécnicas relevantes que el contratista puede esperar encontrar durante la construcción y las condiciones que se consideran permitidas en la licitación. Los GBR también pueden proporcionar una interpretación

equilibrada de las condiciones del terreno a partir de datos disponibles o ser lanzados a mejores o peores condiciones dependiendo del perfil de riesgo del cliente y su apetito por el riesgo. Las diferencias en las condiciones reales del terreno encontradas en el sitio, y sus impactos en los contratos, generalmente se arbitran a través de un "Tercero Independiente" durante los trabajos de construcción. El GBR puede incluir varios informes.

En su forma más simple el GBR es usado por todos los licitadores como base común para la determinación de precios del riesgo geotécnico, junto con la fijación de precios de las obras establecidas en los planos y especificaciones de la licitación. En el momento de la adjudicación del contrato, se considera que el contratista adjudicatario ha tenido en cuenta la gama de condiciones del terreno establecidas en las declaraciones de referencia en el GBR. Las declaraciones de referencia establecen lo que está "previsto" y proporcionan una prueba contractual para lo que podría alegarse como "imprevisto" en relación con las condiciones del terreno encontradas durante la construcción. En consecuencia, el GBR se utiliza para juzgar la validez de cualquier reclamación de indemnización por aspectos del terreno no considerados en el GBR. El marco de conocimiento del EGM apoya el desarrollo de 'referencias numéricas', 'valores característicos' y 'condiciones de referencia sobre el terreno', que son componentes de los GBR vinculados a cláusulas contractuales.

#### 2.3.4.4 Mapas y secciones geológico-ingenieriles

Los mapas y secciones geológico-ingenieriles son una parte fundamental del marco de conocimiento del EGM. Todos los mapas y secciones deben contener escala gráfica, leyenda, una flecha de norte, y deben diferenciar entre observaciones e interpretaciones utilizando simbología convencional como en la mostrada en la Figura 2-6. Al elaborar mapas digitales, los límites observados, proyectados e interpretados deben diferenciarse de manera similar.

—————	Observed geological boundary, position known
-----	Observed geological boundary, position approximate
-?-?-?-?-?-?-?-?-?-?-?	Geological boundary, interpreted or inferred

**Figura 2-6** Convención de simbología para rasgos geológicos lineales.

Una gran parte del conocimiento geológico-ingenieril es anterior al desarrollo de las técnicas informáticas y de la visualización geológica digital. Estos son los productos tradicionales "estáticos" e incluyen dibujos, diagramas y gráficos, fotografías, mapas, secciones transversales y modelos físicos. Sin embargo, en muchos proyectos, estas técnicas tradicionales siguen contribuyendo a la conceptualización y a la "verificación" del modelo digital 3D y, especialmente en el caso de proyectos más pequeños, pueden ser la clave para la elaboración del EGM.

En la mayoría de los proyectos de gran envergadura, las grandes cantidades de datos que se utilizan y los métodos modernos de adquisición electrónica de esos datos pueden conducir a que el procesamiento de datos con ordenadores será la forma más eficiente y probablemente la única alternativa práctica para cotejar los datos.

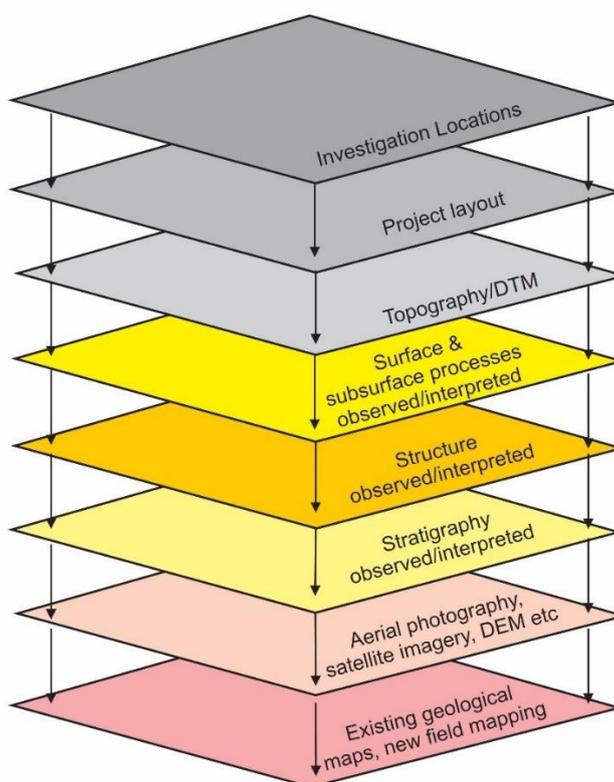
Parece posible que el "machine learning" sea cada vez más importante/necesario para interpretar/procesar grandes cantidades de datos adquiridos en los sitios de investigación utilizando multi sensores de percepción remota (LiDAR, fotogrametría, imágenes térmicas o hiperespectrales), instrumentación de perforaciones y monitoreo (por ejemplo: RADAR, InSAR, MS/AE). Esta perspectiva plantea preocupaciones con respecto a la capacidad del "machine learning" para conceptualizar e interpretar de una manera

geológicamente razonable.

#### 2.3.4.4.1 Datos cartográficos 2D

La visualización 2D de los datos geológicos normalmente se procesará dentro de un SIG (Sistema de Información Geográfica) que es ideal para comparar los diferentes tipos de datos geospaciales, cuando los datos se ordenan y presentan en capas discretas. Es posible producir mapas y secciones geológicas simples utilizando sistemas CAD (dibujo asistido por computadora), pero estos son más adecuados para el diseño y, por lo general, no tienen la funcionalidad necesaria para producir buenos dibujos geológicos.

La arquitectura de las capas SIG debe reflejar las diferentes fuentes de datos y, en la medida de lo posible, las capas derivadas de observaciones deben diferenciarse de las construidas a partir de interpretaciones. En la Figura 2-7 se ilustran las capas típicas de SIG dentro de un EGM.



**Figura 2-7** Arquitectura SIG para un EGM.

#### 2.3.4.4.2 Secciones 2D

Además, será necesario desarrollar secciones 2D basadas en una interpretación de los datos dentro del EGM. Estas secciones deben utilizarse para informar análisis posteriores, diseño, construcción o como herramientas de visualización. Las secciones transversales y longitudinales pueden dibujarse a mano o elaborarse utilizando programas 2D o 3D. Para el primer caso las secciones pueden ser dibujadas digitalmente por el usuario, mientras que las secciones 2D exportadas desde un modelo 3D pueden ser automáticamente generadas a lo largo de una línea de sección determinada por el usuario.

Independientemente de cómo se creen las secciones, deben seguir los mismos principios básicos:

- Las secciones deben ubicarse donde ilustren mejor la relación entre el componente del proyecto y las cargas o cambios impuestos por el componente sobre el terreno y la información fáctica disponible para

apoyar la interpretación de las unidades de ingeniería geológica. Las ubicaciones de las secciones pueden ser elegidas por los diseñadores para explorar casos de carga particulares.

- Cuando los datos se proyectan en una sección, deben indicarse los supuestos realizados y el método de proyección.
- Las secciones deben dibujarse perpendiculares a las curvas de nivel o a la entidad de interés, a menos que sea necesario (por ejemplo, para una sección longitudinal a través de una alineación o a lo largo de la dirección de desplazamiento).
- Las secciones deben trazarse sobre la línea central, o eje, de elementos críticos del proyecto donde debe haber mayor control (esto es, dato) y los datos en los que se basa la sección deben documentarse en ella misma. Cuando el mayor aspecto de interés o control no se encuentra a lo largo de la línea central, se debe usar el criterio para colocar una sección en un lugar apropiado y puede implicar líneas de secciones adicionales.
- La escala vertical de una sección debe ser (a menos que la escala no permita la visualización) la misma que la escala horizontal (es decir, sin exageración vertical). Cuando se utiliza una escala exagerada, también se debe proporcionar una sección sin exageración.
- La simbología de las unidades geológico-ingenieriles debe coincidir con las utilizadas en el modelo y/o mapa.

Los modelos digitales 3D no suelen mostrar límites discontinuos o incluir signos de interrogación, por lo que a menudo es difícil identificar dónde se tienen límites inferidos o aproximados. Un método para ayudar a identificar estas condiciones es incluir secciones de vallas 2D y mapas dentro del espacio del modelo 3D, ya que estos pueden incluir símbolos convenciones de las líneas mencionadas anteriormente.

#### 2.3.4.4.3 Consideraciones sobre la extensión y escala espacial

La extensión espacial de los mapas y planos que documentan el marco de conocimiento del EGM debe establecerse en función del área de terreno que podría verse afectada por el proyecto (por ejemplo, la respuesta a la carga de una cimentación), así como del área de terreno que podría afectar el proyecto (por ejemplo, un deslizamiento fuera del sitio que impacte en el proyecto). Estos van desde mapas regionales hasta planos de afloramientos o cimentaciones individuales.

La escala de presentación de los mapas y planos debe relacionarse con la escala a la que se recopilaban los datos. Si se preparan secciones y mapas convencionales, el nivel de detalle de cualquiera de sus elementos debe relacionarse con lo que se puede discernir a escala del dibujo cuando se ve en conjunto. Con los modelos digitales 3D, la escala puede ser dinámica, por lo que es crucial considerar las implicaciones de la escala seleccionada al decidir el nivel de detalle a presentar.

Se debe tener precaución y documentar las limitaciones cuando los conjuntos de datos utilizados para la compilación del modelo se presentan a escalas con mayor resolución. Por ejemplo, escalar los límites de un mapa a escala 1:100.000 a 1:5.000 en el proyecto geológico-ingenieril puede dar lugar a modelos poco fiables, especialmente cuando no se realiza la verificación y corrección de campo.

Tenga en cuenta que la escala de los productos requeridos puede cambiar a lo largo de varias etapas de un proyecto, pero la escala de los datos de entrada seguirá siendo la misma y ello puede limitar la forma en que se desarrolla el EGM.

#### 2.3.4.4.4 Representación estereográfica

Esta técnica se puede utilizar para ayudar a evaluar los patrones de defectos/estructuras y cómo y dónde cambian en el espacio. Por lo tanto, es una herramienta importante para evaluar y presentar datos

estructurales, y esencial para cualquier EGM donde la geometría de las discontinuidades sea significativa (por ejemplo, diaclasas, fallas, clivaje). Esto es particularmente importante para la ingeniería de rocas, pero también se aplicará a proyectos que involucren mecánica de suelos que contengan defectos. Tenga en cuenta que los datos estereográficos representan la geometría de conjuntos de defectos dentro de una unidad, zona o dominio de geológico-ingenieril o defectos específicos. Sin embargo, no proporcionan la geometría real ni las coordenadas espaciales reales de esos defectos específicos. La mejor manera de lograr esta representación es mediante el uso de contornos estructurales.

### 2.3.5 Creando y visualizando un modelo digital 3D

Los modelos digitales en 3D permiten comprender y comunicar las condiciones del subsuelo de una manera que antes no era posible bajo el enfoque analógico. En el caso de grandes conjuntos de datos, los modelos digitales 3D permiten una verificación e interpretación profunda de los datos y permiten una mayor integración de los productos del EGM en otras disciplinas. El software de modelado digital 3D permite la visualización de una amplia gama de observaciones (perforaciones, CPT, LiDAR, geofísica, niveles de agua subterránea, límites mapeados, etc.) junto con interpretaciones de límites para unidades de ingeniería geológica como superficies. Todo ello creado dentro de un único entorno de modelado digital. A partir de estas superficies, se pueden calcular volúmenes que reflejan unidades de ingeniería geológica en el espacio 3D.

Sin embargo, existen peligros asociados con el desarrollo de un modelo digital 3D si no se comprenden y comunican las limitaciones del modelo y los métodos numéricos, en particular los supuestos utilizados en estos dos elementos. Los modelos digitales 3D se pueden presentar con una precisión y certeza aparentes mucho mayores que los reales y es importante comunicar esta incertidumbre. Un modelo digital 3D aislado no es un EGM, ya que no proporciona un marco de conocimiento. El desarrollo de los modelos digitales 3D debe ser realizado, supervisado y verificado, por geólogos ingenieriles debidamente calificados y conocedores, en consonancia con el desarrollo de otros componentes del EGM. De lo contrario, se corre el riesgo de crear modelos inexactos, defectuosos y geológicamente irrazonables (esto es, poco confiables).

Turner et al. (2021) proporcionan un extenso tratado sobre modelado geológico digital.

#### 2.3.5.1 Software para el modelado

##### 2.3.5.1.1 Selección de software apropiado

La selección de los paquetes de software debe incluir las consideraciones de:

- El propósito del modelo. Puede requerir que el software permita la visualización tanto de las estructuras de ingeniería como elementos de ingeniería geológica.
- La fase de diseño del proyecto. Las diferentes fases de desarrollo pueden requerir diferentes herramientas/nivel de detalle.
- El tamaño y la complejidad probables del modelo. ¿Es el entorno geológico una simple estratigrafía en capas o un complejo sistema plegado/fallado?
- El tamaño de los conjuntos de datos. Las herramientas automatizadas/programadas pueden ser adecuadas para grandes conjuntos de datos en lugar de la interpretación manual y la manipulación de datos que requieren mucho tiempo, lo que es factible para conjuntos de datos pequeños.
- Flexibilidad de modelado. La modificación manual y el control de datos y superficies permiten al modelador, en la medida de lo posible, crear características geológicamente factibles y realistas.
- Requisitos de actualización del modelo digital. ¿El modelo requerirá actualizaciones frecuentes? Si es así, ¿qué herramientas tiene el software para limitar la reelaboración/reinterpretación?

- Incertidumbre espacial. ¿Se puede utilizar el software para el análisis estadístico y/o probabilístico de la variabilidad e incertidumbre dentro de los conjuntos de datos y el modelo más amplio?
- Funcionalidad y facilidad de uso. ¿Qué métodos de análisis están disponibles? ¿Qué es la interfaz del usuario? ¿Qué conjuntos de habilidades se requieren? ¿Cuál es la complejidad operativa? ¿Cuál es la compatibilidad con los modelos de software existentes?
- ¿Puede el software producir resultados 2D y 3D para informar los análisis, ayudar con la integración transparente con otras disciplinas, así como proporcionar una herramienta de comunicación para ayudar en la ingeniería y las decisiones relacionadas?
- ¿El paquete de software se adaptará a las habilidades disponibles dentro de la organización? ¿Quién desarrollará, comprobará y revisará el modelo digital 3D? ¿Tienen una comprensión adecuada del software y su funcionalidad, así como conocimientos de ingeniería geológica y experiencia relacionados tanto con el tipo de proyecto como con las condiciones del terreno?
- Los modelos 3D especializados pueden desarrollarse teniendo en cuenta un resultado analítico específico. Estos tipos de modelos pueden requerir técnicas de modelización específicas de programas informáticos que probablemente se limiten a proporcionar resultados para un conjunto muy limitado de métodos analíticos.
- ¿Habrà un requisito para compartir modelos digitales -quién puede editar o ver-? ¿Cómo se controla eso? ¿Con qué otros modelos tendrán que interactuar?

#### 2.3.5.1.2 Modelado en CAD

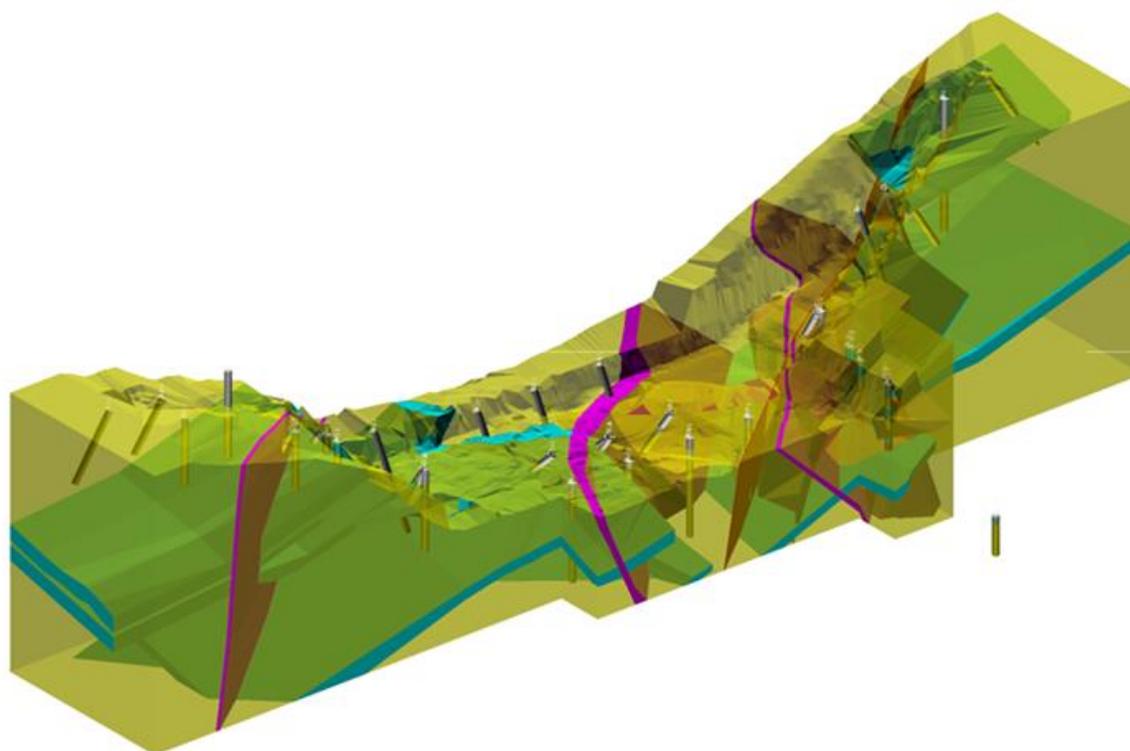
Los métodos de diseño asistido por computadora (CAD) se pueden utilizar para generar visualizaciones en 3D de las condiciones de ingeniería geológica. Sin embargo, los sistemas CAD no tienen capacidades topológicas, por lo que puede ocurrir la intersección inadvertida de los límites de las capas, especialmente cuando se trata de capas delgadas o discontinuas, y corregir la representación del modelo en el software puede convertirse en una tarea mayúscula. Además, los sistemas CAD no están diseñados para ingresar y procesar la amplia gama de información geológico-ingenieril que puede estar disponible para un proyecto, tienden a usar límites rectos y geológicamente poco realistas y pueden no tener una simbología adecuada.

No se recomienda el modelado de geología en CAD, aunque se puede utilizar para modelar aspectos simples de ingeniería geológica, generalmente limitada a mapas y secciones 2D. Sin embargo, CAD es una de las principales formas en que se comunica el modelo porque aquí es donde el Modelo Geológico se integra con los elementos del proyecto. Por lo tanto, aunque no se recomienda el modelado con CAD, CAD es una plataforma útil para comunicar el modelo.

#### 2.3.5.1.3 Software de modelado explícito

En el modelado explícito el modelador define manualmente la naturaleza y distribución de las superficies que restringen las unidades geológico-ingenieriles y los datos de investigación en los que se basa la interpretación, se representan en 3D. El modelado explícito es lo que se considera el método manual "tradicional" de creación de armazones de alambre y digitalización. El modelador interpreta los datos de investigación y luego define las superficies que restringen las unidades geológico-ingenieriles.

En la Figura 2-8 se proporciona un ejemplo de la salida de un paquete de modelado explícito.



**Figura 2-8** Visualización explícita de la geología y cimientos de una presa de gravedad de hormigón, incluidas andesitas de buzamiento suave y zonas de falla intruidas por diques de felsita de última etapa (imagen proporcionada por Richard Brehauss y reproducida con su permiso).

#### 2.3.5.1.4 Software de modelado implícito

En el modelado implícito, el software implementa algoritmos definidos por el usuario para interpolar y extrapolar entre puntos de datos. Los resultados definen la distribución de los atributos que caracterizan a las unidades de ingeniería geológica. Esta distribución puede ser continua o estar definida por límites. Esto permite la creación de formas de superficie más complejas que las que normalmente se observan en los modelos explícitos. Sin embargo, los resultados deben evaluarse para garantizar que el modelado produzca formas geológicamente sensibles basadas en el entorno de ingeniería geológica y respete los principios geológicos.

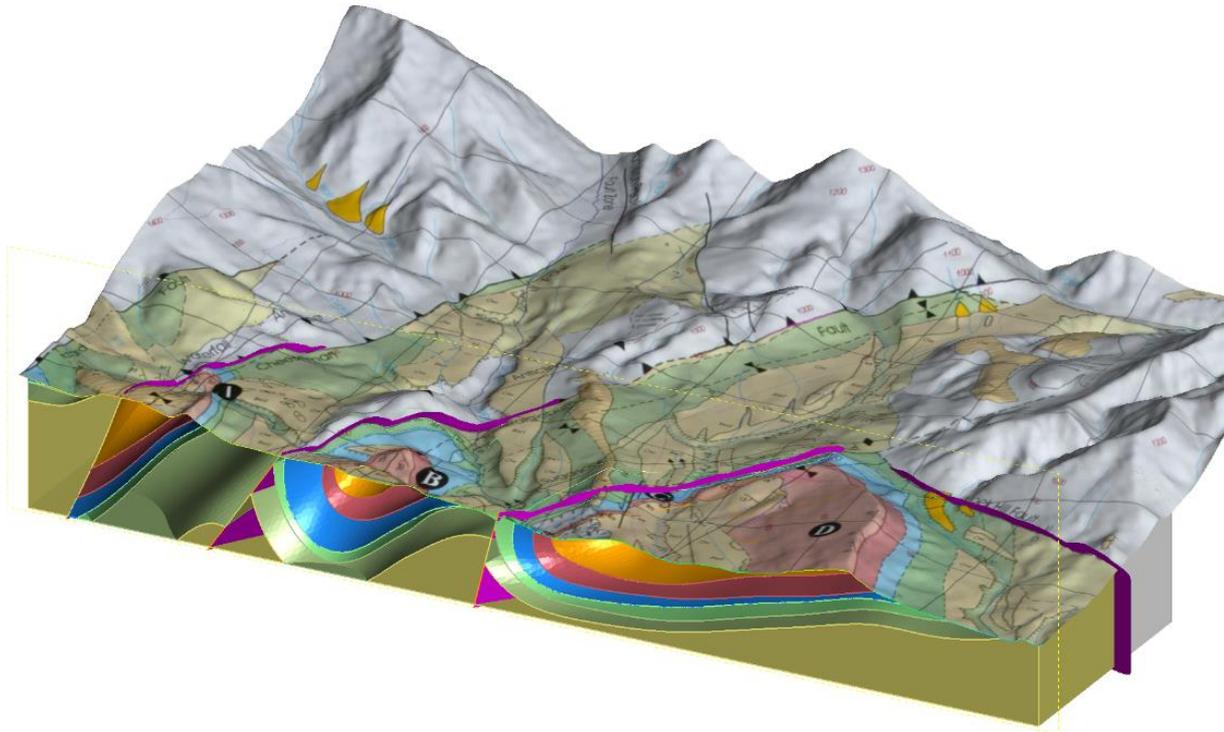
En la Figura 2-9 se proporciona un ejemplo de la salida de un paquete de modelado implícito.

Cuando la heterogeneidad substratigráfica es relevante, el modelo marco puede ser "discretizado" para formar una red celular 3D (o 'cajas'). A las cajas se les pueden asignar propiedades de los materiales como resistividad eléctrica, permeabilidad, porosidad, resistencia al cizallamiento, etc. con base en algoritmos geoestadísticos. Estas representaciones de cajas se pueden utilizar para generar mallas de diferencias finitas o elementos finitos para cálculos y modelado.

#### 2.3.5.1.5 Comparación de modelos digitales explícitos e implícitos

Se pueden utilizar métodos explícitos o implícitos para desarrollar modelos digitales 3D y, a menudo, estos se pueden integrar. Los paquetes modernos de software de modelado implícito suelen incluir funcionalidades de modelado explícito para facilitar el refinamiento de superficies. Independientemente del método de modelización, se requieren conocimientos de ingeniería geológica y el uso de principios geológicos apropiados. Si se modelan adecuadamente, ambos métodos darán lugar a modelos robustos con

interpretaciones similares. En la Tabla 2-2 se resumen las ventajas y limitaciones de cada enfoque.



**Figura 2-9** Modelo implícito desarrollado a partir de observaciones superficiales utilizando algoritmos para proyectar los límites del subsuelo (imagen proporcionada por Pat McLarin y reproducida con su permiso).

#### 2.3.5.1.6 Modelado de estratos geológicos mediante SIG

Los ambientes geológicos estratificados, que se extienden a profundidades de 100-200 m se encuentran comúnmente en proyectos de ingeniería y ambientales. Se puede crear un modelo digital de estos ambientes apilando una serie de superficies. Este método permite la incorporación de imágenes raster desarrolladas mediante procedimientos SIG o a partir de interpretaciones de registros digitales de sondeos y secciones transversales de ingeniería geológica. Es un enfoque atractivo y eficiente de generación de modelos cuando se modelan áreas de estratos sedimentarios relativamente no deformados. Sin embargo, representar fallas u otro tipo de estructura geológica que alteren esta estratificación simple puede ser difícil.

#### 2.3.5.1.7 Red de fracturas discretas

Una "Red de Fracturas Discretas" (DFN, por sus siglas en inglés) es un modelo que representa explícitamente las propiedades geométricas de cada fractura individual (por ejemplo, orientación, tamaño, posición, forma y abertura); así como las relaciones topológicas entre las fracturas individuales y los conjuntos de fracturas. Se puede generar una DFN a partir de mapeo geológico-ingenieril, fotogrametría adecuada y su análisis aplicable, o mediante simulación estocástica. Todos ellos pretenden representar diferentes tipos de fracturas de roca, incluyendo diaclasas, fallas, vetas y planos de estratificación. Es posible que la DFN tenga que ser una interpretación basada en datos disponibles o en un modelo computacional del macizo rocoso porque a menudo no todas las discontinuidades del macizo rocoso se pueden observar en 3D con suficiente resolución y en todas las escalas. Los modelos computacionales de un macizo rocoso fracturado en 3D se generan a partir de una población de conjuntos de fracturas cuyos parámetros se

extraen de distribuciones de probabilidad estadística derivadas de observaciones cartográficas y registro de pozos. El modelo computacional resultante se puede utilizar para realizar análisis probabilísticos de estabilidad de taludes, estabilidad de túneles, etc.

**Tabla 2-2** Comparación de modelos explícitos e implícitos.

	Modelos explícitos	Modelos implícitos
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden ser tan simples o complejos como el modelador elija.</li> <li>• No requiere necesariamente aplicaciones de software especializado.</li> <li>• El modelador puede definir características transversales y estructuras geológicas, como fallas, dibujándolas explícitamente en secciones espaciadas regularmente y uniéndolas.</li> <li>• Se puede digitalizar manualmente, como interpretaciones de secciones transversales individuales, a través de toda la extensión del sitio y posteriormente unirse para crear pseudosecciones transversales.</li> <li>• Alternativamente, el modelador puede utilizar software especializado para procesar y manipular datos espaciales que restringen las unidades, y conectar los límites para formar una representación visual de las superficies.</li> <li>• El modelo resultante es, por lo tanto, una función de superficies construidas manualmente.</li> <li>• Se pueden utilizar puntos adicionales (arbitrarios) entre las ubicaciones de contactos observados para suavizar las superficies y hacerlas más realistas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad para construir y analizar rápidamente modelos 3D, para visualizar y probar múltiples escenarios.</li> <li>• El modelado dinámico puede efectuarse con actualizaciones rápidas del modelo tan pronto como se adquieren e ingresen nuevos datos.</li> <li>• Capacidad para procesar conjuntos de datos grandes y variados en una computadora personal.</li> <li>• Diferentes puntos en el proceso de modelado pueden ser capturados como revisiones (en puntos específicos en el tiempo), explorando así hipótesis alternativas.</li> <li>• Capacidad para modelar elementos de un mismo valor directamente a partir de datos de perforación sin necesidad de análisis de inestabilidad espacial.</li> <li>• La capacidad de crear modelos múltiples y reproducibles que están condicionados a los datos en sí, no modelando la intuición. Note que esto significa que el criterio geológico también debe usarse para evaluar la razonabilidad de los modelos resultantes.</li> <li>• Muchos paquetes de software de modelado implícito permiten la edición explícita de superficies.</li> </ul>
Desventajas y limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La digitalización manual consume mucho tiempo.</li> <li>• El modelo final es producto de la interpretación del modelador y no puede ser reproducible por otros modeladores.</li> <li>• La incertidumbre es difícil de cuantificar.</li> <li>• Es posible que no se actualice automáticamente a medida que se disponga de información nueva o diferente. Las ediciones, por lo tanto, pueden llevar más tiempo que en los modelos implícitos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Documentar los detalles del funcionamiento del modelo o proporcionar un registro exhaustivo desde el modelo hasta los datos originales puede ser difícil, por lo que es importante registrar rigurosamente las entradas clave.</li> <li>• La incertidumbre en los modelos digitales persiste y es necesario hacer un esfuerzo para cuantificar o aclarar las fuentes y los impactos de la incertidumbre.</li> <li>• Los algoritmos de interpolación pueden ser difíciles de reproducir y verificar de forma independiente.</li> </ul>

### 2.3.5.1.8 Modelos de aguas subterráneas, contaminantes y flujo de calor

Se puede utilizar una serie de modelos digitales para predecir los cambios con el tiempo de cosas tales como:

- Los efectos de cambios hidrológicos (como el bombeo de agua subterránea o los desarrollos de riego) en el comportamiento de un acuífero.
- El flujo natural de agua subterránea en el ambiente y la química de las aguas subterráneas. Estos modelos de aguas subterráneas tratan de predecir el destino y el movimiento de los productos químicos en escenarios naturales, urbanos o hipotéticos.
- El calor fluye a través del terreno. Estos modelos tratan de predecir la variación periódica de la temperatura del terreno con respecto a la profundidad.

Todos estos modelos se desarrollan a partir de un modelo digital 3D bien restringido con atributos adecuados. Las ecuaciones diferenciales que a menudo solo se pueden resolver mediante métodos aproximados mediante análisis numérico se utilizan para predecir cambios en el tiempo.

Este tipo de modelos deben calibrarse ejecutándolos con datos observados reales y ajustando los parámetros del modelo hasta lograr una concordancia cercana.

#### 2.3.5.2 Fuentes de datos y gestión.

Las fuentes de información para la caracterización geológico-ingenieril pueden obtenerse de una amplia gama de métodos y técnicas de investigación. Estos datos pueden ser recopilados, registrados y desplegados como puntos, líneas, planos o secciones 2D, o como cajas o polígonos 3D. Esta variedad debe atenderse mediante el suministro de una estructura de datos genérica adecuadamente flexible.

Para incorporar registros de investigaciones (sondeos, sondas, etc.) en un modelo digital 3D, se requiere una base de datos relacional. Las relaciones entre registros/entradas en esta forma de base de datos se proporcionan a través de dos tablas relacionadas:

- Una tabla de fuentes de datos (archivo “collar”) que presenta coordenadas, orientación/azimut, inclinación, etc. y otra información de posición.
- Una tabla de atributos (archivo fondo de pozo) registrada para profundidades o intervalos de profundidad para cada fuente de datos.

Estas dos tablas están relacionadas entre sí por una clave que suele ser un solo atributo o un grupo de atributos. La clave es una parte importante crítica de una base de datos relacional y se utiliza para establecer e identificar relaciones entre tablas y también para identificar de forma única cualquier registro o fila de datos dentro de una tabla.

Desde una perspectiva de gestión de datos, es recomendable, en la medida de lo posible, utilizar archivos de proyectos universales, para minimizar la dependencia de archivos de proyecto específicos del software que son transitorios y tienen una compatibilidad limitada entre diferentes software o versiones. Los datos fijos o fácticos suelen codificarse de forma estandarizada que puede adaptarse a normas descriptivas nacionales o internacionales, como el formato de la Asociación de Especialistas en Geotecnia y Geo-medio ambiente [AGS] en el Reino Unido, y el formato de Intercambio de Datos para Especialistas en Geotecnia y Geo-medio ambiente [DIGGS] en los Estados Unidos. Se puede acceder a los formatos basados en texto sin ningún software de modelado específico, aunque el tamaño de los archivos puede ser grande.

Existen estándares de transferencia de datos que permiten compartir datos geotécnicos fácticos o “crudos” a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Al igual que con todos los datos, se requiere una verificación sólida para garantizar que la información geográfica y los atributos observados sean razonables y estén dentro de márgenes de error aceptables (según lo elegido y documentado por el modelador). Sobre la base de esta evaluación, se pueden tomar decisiones sobre si se deben incluir conjuntos de datos específicos en el modelo y el nivel de confianza que

se debe depositar en cada conjunto de datos diferente. La evaluación y las decisiones deben documentarse en el Informe del Modelo Digital 3D por parte del modelador.

### 2.3.5.3 Documentación del modelo digital 3D

Existen riesgos al proporcionar resultados "estáticos" a los equipos de diseño cuando la EGM se actualiza continuamente a través de un proyecto. Se requiere un proceso para garantizar que los equipos de diseño utilicen la información más actualizada de EGM. Es posible que sea necesario clasificar la información como fija (por ejemplo, información fáctica que no se prevé que se modifique como los registros de pruebas de laboratorio), así como información interpretativa (por ejemplo, límites/superficies geológico-ingenieriles) que puede evolucionar a medida que se obtienen nuevos datos fácticos.

Durante las etapas posteriores de los proyectos, especialmente durante la construcción, el modelo digital 3D debe revisarse y actualizarse con nueva información/datos y se debe considerar una reinterpretación de las deducciones de ingeniería asociadas. Esto podría ser responsabilidad del Ingeniero del Propietario o del Contratista, pero la responsabilidad debe asignarse claramente.

Es importante la transparencia en el cambio de versiones del modelo digital y sus componentes dentro de un marco de apoyo a la toma de decisiones. El resultado de los procedimientos judiciales puede depender de que se demuestre que el modelo representaba la mejor información en ese momento, no de lo que se descubrió más tarde. El historial del modelo digital debe documentarse manualmente a través de, por ejemplo, una hoja de cálculo o automáticamente con un software o una herramienta basada en Internet.

#### 2.3.5.3.1 Importancia de un flujo de trabajo eficiente en la gestión de datos

La gestión eficiente de los datos es un prerrequisito para establecer un flujo de trabajo eficiente para el proceso de desarrollo de modelos digitales 3D. Esto tiene importantes beneficios económicos para el costo total del desarrollo y uso del modelo. Se sugiere el siguiente flujo de trabajo:

- **Plan:** descripción de los datos que se compilarán y cómo se recopilarán, gestionarán y pondrán a disposición a lo largo de su vida útil. Es probable que esto involucre al cliente u otras partes interesadas. Se debe alentar a los propietarios a preservar sus propios datos.
- **Recopilar:** captura y adquisición de datos del sitio y de laboratorio como un archivo de datos estandarizado, o reportes fácticos impresos, o plantillas de captura de datos de hojas de cálculo/bases de datos (proforma).
- **Asegurar:** la calidad de los datos registrados se garantiza, siempre que sea posible, mediante controles a través de procedimientos de aseguramiento de la calidad (ISO 9001, UKAS, AGS) utilizando los procedimientos internos y adecuados de verificación y validación.
- **Describir:** los datos se ordenan (limpian y eliminan), se describen y comprenden de manera precisa y exhaustiva por parte del usuario final. Cuando se vayan a excluir datos, deberá documentarse claramente la justificación de ello.
- **Preservar:** los datos se envían a un archivo adecuado a largo plazo, ya sea en un sistema indexado en la nube o en carpetas y archivos de proyectos.
- **Descubrir:** se localizan y obtienen datos potencialmente útiles, junto con la información relevante sobre los datos (metadatos).
- **Integrar:** los datos de fuentes dispares se combinan para formar un conjunto de datos homogéneo que se puede analizar fácilmente. En este caso, es fundamental que se identifiquen y registren claramente las

limitaciones de datos o los problemas de escala.

- Analizar: los datos se emplean para crear visualizaciones (secciones transversales o modelos digitales 3D) y se evalúan utilizando hojas de cálculo o métodos más sofisticados para el análisis de datos.

#### 2.3.5.4 Revisión de modelos digitales 3D

El verificador y revisor deben tener la experiencia adecuada en las condiciones geológico-ingenieriles del sitio, los requerimientos del proyecto y el paquete de software utilizado para crear los modelos digitales 3D.

Antes de la revisión del modelo digital 3D, se debe realizar una comprobación del sistema de modelado. El ingeniero geólogo verificador debe estar familiarizado con el paquete de software y ser capaz de verificar los siguientes factores:

- Los datos de entrada deben estar actualizados y los atributos correctos se han importado de las bases de datos.
- La escala de la topografía y resolución del modelo 3D deben ser adecuados.
- La selección de superficies para cada unidad geológico-ingenieril.
- La relación entre cada superficie y las otras unidades geológico-ingenieriles.
- Las superficies en 3D y cómo respetan el modelo conceptual básico, el sondeo y los datos de entrada.
- Cualquier sección y otros productos entregables.

La comprobación, revisión y verificación de los modelos digitales 3D es un paso crítico en el proceso de modelado y proporciona garantía de calidad. Dado que el modelo digital 3D es un aspecto del EGM, deben seguirse los procesos y principios descritos en la Sección 1.1, así como los pasos de desarrollo descritos en la Sección 1.2. La revisión y verificación de los modelos digitales 3D puede ser más difícil y llevar más tiempo que la revisión de mapas y secciones convencionales, ya que se deben comprobar todas las áreas de las superficies y volúmenes para verificar que se adhieren a la EGM.

Si las secciones y cartografía en 2D se producen y entregan con el modelo 3D como base para la interpretación de los datos y no se proporciona como entregable, las secciones en 2D deben ser revisadas según la práctica estándar (se evalúan los datos de los pozos, de registros geológica, etc.)

#### 2.3.5.5 Salidas de modelos digitales 3D

Es importante que la incertidumbre en el modelo digital 3D esté documentada y comunicada claramente. Las superficies u otros elementos del modelo que se extraen deben tener su respectivo metadato adjunto que indique la incertidumbre.

Aunque la visualización puede haber sido creada en 3D, no todos los proyectos requieren salidas 3D del modelo. Para algunos proyectos, las salidas 2D del modelo digital 3D pueden ser suficientes o incluso preferibles. Muchos paquetes de software de modelado están ahora configurados para que las salidas 2D se puedan exportar desde el software en varios formatos, incluidos los formatos de visualización (por ejemplo, *Portable Document Format*) y los archivos de dibujo digital (por ejemplo, \*.dwg) que se pueden importar directamente a otros programas para su análisis.

Los modelos digitales 3D también pueden ser importados por otro software de modelado y diseño 3D para informar directamente el diseño de elementos que dependen de las condiciones del terreno. En estos escenarios se debe tener cuidado de comunicar claramente la incertidumbre a todos los usuarios actuales y

futuros del modelo digital 3D.

Puede ser útil incorporar detalles 2D dentro de una salida 3D. Un ejemplo de esto es la inclusión de secciones 2D detalladas típicas o específicas dentro de un modelo digital 3D. Estas secciones pueden ser anotadas. Esto proporciona un nivel de detalle al producto de salida que no se puede capturar fácilmente en un formato 3D y ayuda en la comunicación de los detalles y la incertidumbre del EGM.

Un reporte del modelo digital 3D debe acompañar a producto de salida.

Otras técnicas de visualización incluyen pdfs 3D, diversas herramientas específicas de visualización de modelos digitales, animaciones y vídeos, realidad virtual o realidad aumentada, impresión 3D, etc.

#### 2.3.5.5.1 EGM y Modelado de Información de Construcción

El *Building Information Modelling* (BIM) (Modelado de Información de la Construcción) es un proceso que implica la generación y gestión de representaciones digitales de las características físicas y funcionales de un edificio o lugares. Esto es para garantizar que se cree la información adecuada en un formato adecuado en el momento oportuno para que se puedan tomar mejores decisiones a lo largo del diseño, construcción y operación de los activos construidos (Kessler et al. 2015). La combinación de una visualización 3D del terreno con los componentes artificiales del proyecto (a veces denominados modelo federado) puede ser muy beneficiosa, por ejemplo, durante la evaluación del diseño.

Sin embargo, es importante comprender las diferencias clave entre los modelos estructurales sobre el suelo/BIM y el EGM en términos de incertidumbre y la forma en que se han desarrollado los modelos. Pueden surgir problemas con las salidas digitales del EGM que son importados en los sistemas BIM y luego se confía en que son precisas y razonables cuando es apropiado y/o necesario un mayor refinamiento.

Además, es importante reconocer o recordar a los usuarios/modeladores el nivel de incertidumbre y cómo se relaciona con las escalas correspondientes entre los EGM y BIM. En un modelo BIM, las obras se ven comúnmente con una precisión milimétrica, mientras que los EGM pueden tener una precisión en términos de decenas de metros, apropiada para las condiciones interpretadas del terreno. Esto tendrá un impacto en la aplicabilidad de cualquier modelo de este tipo dentro de la jerarquía de BIM en términos de El Nivel de Desarrollo (LOD) (BIM Forum, 2019).

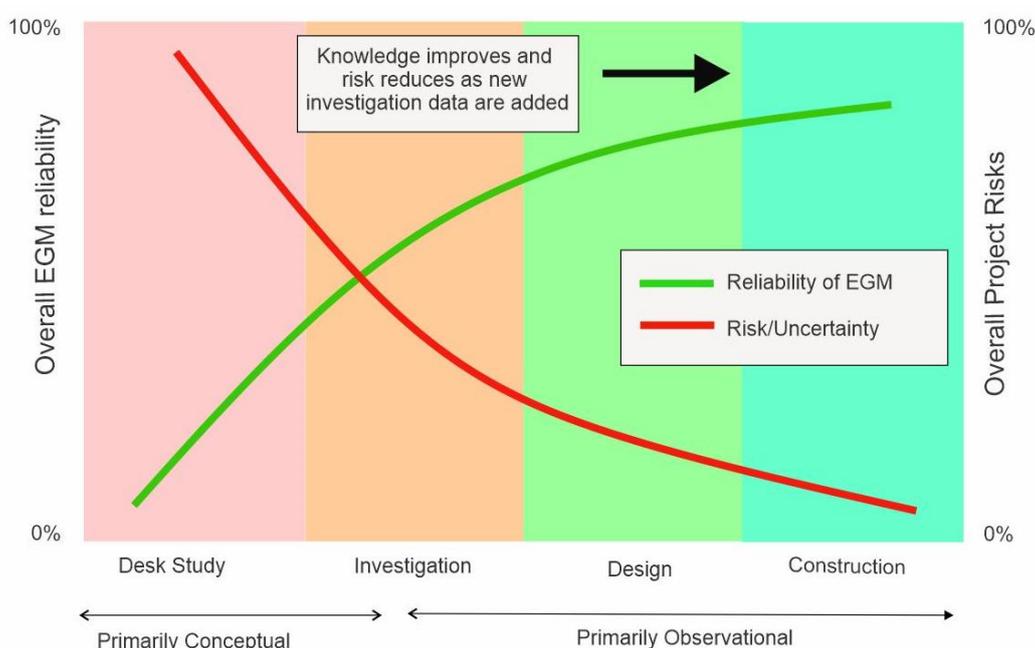
**Volver a la Sección 1.3 ARMADO Y COMUNICACIÓN DEL EGM**

## 2.4 GESTIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL EGM

### 2.4.1 Introducción.

La incertidumbre dentro del EGM es causada por aspectos imperfectamente conocidos o completamente desconocidos del marco de conocimiento. Esta incertidumbre puede afectar negativamente a la *confiabilidad* del EGM, que es el grado en que las condiciones geológico-ingenieriles previstas proporcionan una aproximación precisa y razonable de las condiciones actuales o del rendimiento a medida que influyen en el proyecto. La reducción de la confiabilidad conducirá a un aumento del *riesgo*, que es la probabilidad de un resultado adverso y a menudo se expresa en términos de una combinación de las consecuencias de una serie de eventos o escenarios y la probabilidad asociada que ocurran.

El aumento de la confiabilidad y la reducción del riesgo se producen a través de la acumulación de conocimientos conceptuales y observacionales dentro del EGM, normalmente a través de diversas etapas de investigación que se llevan a cabo a medida que avanza el proyecto (Figura 2-10).



**Figura 2-10** Mejoras idealizadas en la confiabilidad del EGM a medida que avanza el proyecto.

Sin embargo, la suposición clásica que la reducción progresiva del riesgo y el aumento de la confiabilidad asociado se crearán a través de pasos secuenciales de investigación, diseño, y construcción, puede ser engañosa. La reducción significativa del riesgo y la mejora de la comprensión requieren ciclos de retroalimentación durante cada etapa del proyecto (Carter, 1992; Carter y Marinos, 2020). Es esencial que, a medida que avanza el proyecto, se revise, verifique y, cuando sea necesario, se mejore o modifique el EGM. La mejora de la confiabilidad se logra mediante una mejor comprensión cuando las ideas conceptuales y los datos observacionales se han conciliado mediante un proceso iterativo de revisión, comparación, modificación y verificación.

La verdadera verificación del EGM frente a un entorno natural, real, complejo y geológico es problemática. Sin embargo, los bucles de retroalimentación en el proceso de desarrollo del EGM (Figura 2-11) permiten que el EGM se limite a observaciones obtenidas del proyecto. Si estas comparaciones muestran una mayor confiabilidad a medida que avanza un proyecto, entonces la construcción a menudo se puede completar de manera más eficiente, aunque el EGM no siempre sea totalmente preciso.

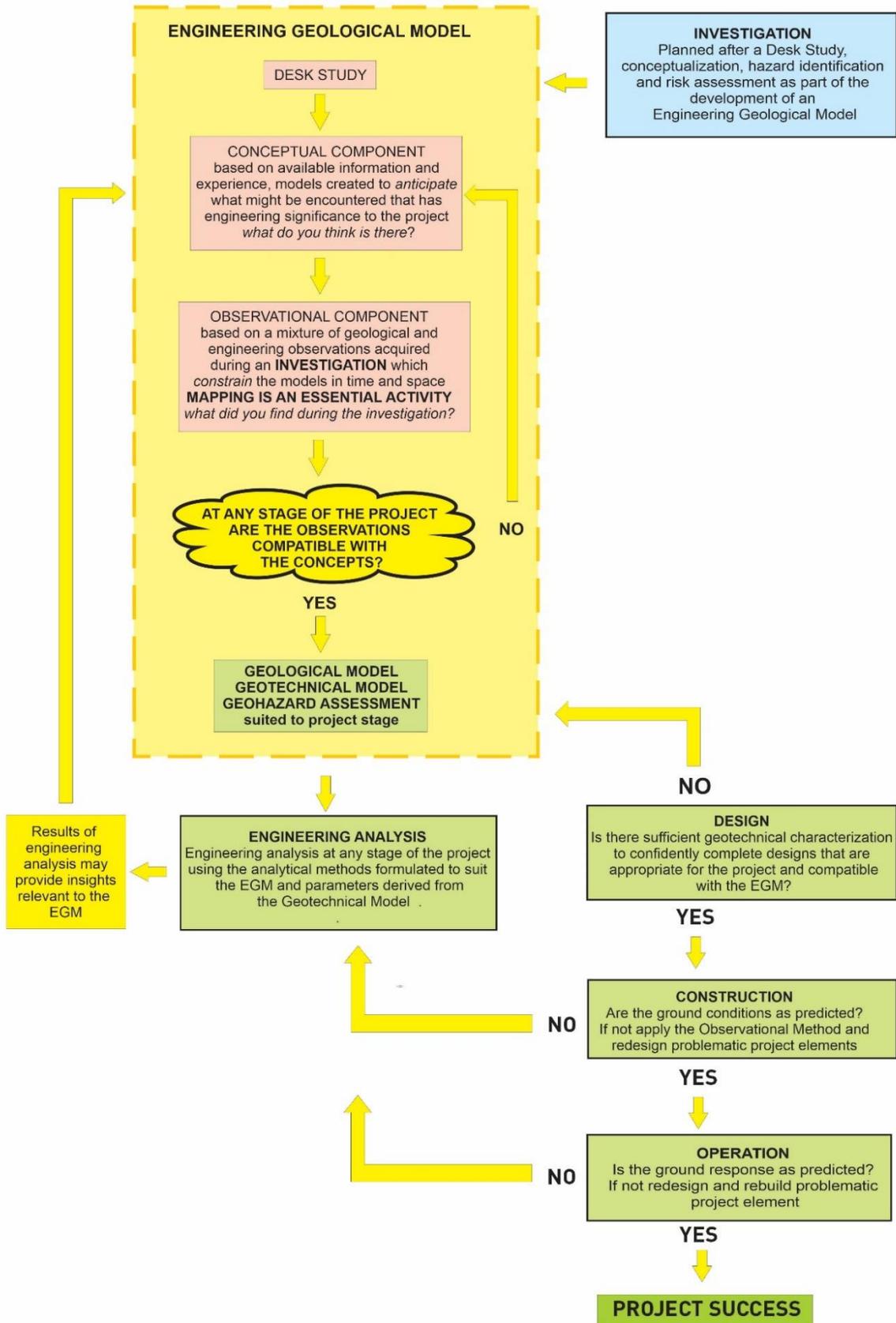


Figura 2-11 Bucles de retroalimentación para la actualización progresiva del EGM durante el ciclo de vida del proyecto.

El nivel de riesgo del proyecto, considerado como aceptable, refleja la inclinación del propietario por el riesgo y varía considerablemente en la industria de la ingeniería del terreno y en todo el mundo. Este perfil de riesgo objetivo debe considerarse en la etapa temprana del proyecto, ya que, en última instancia, orienta el nivel de incertidumbre aceptable dentro del marco de conocimiento del EGM y, por lo tanto, la naturaleza y alcance de las investigaciones que se requieren para reducir la incertidumbre a niveles aceptables. El perfil de riesgo objetivo puede expresarse de diversas maneras, desde la simple declaración de un nivel de riesgo aceptable expresado cualitativamente hasta el uso de una sofisticada evaluación cuantitativa del riesgo y criterios de aceptación definidos con precisión.

A lo largo del ciclo de vida del proyecto, la incertidumbre dentro del marco de conocimiento del EGM también tendrá que ser comunicada a las diferentes partes interesadas del proyecto, algunas de las cuales no tendrán conocimientos técnicos, utilizando métodos que sean relevantes para ellos y sus necesidades. Se prefieren las clasificaciones simples y transparentes del nivel de riesgo, como las que se indican a continuación.

#### Calificación del nivel de riesgo en un proyecto

<b>EXTREMO</b>	Amenaza significativa para el proyecto. Se requiere una acción inmediata.
<b>ALTO</b>	El riesgo puede representar una amenaza para el proyecto; recuperación posible. Se necesita atención de la alta dirección.
<b>MODERADO</b>	El riesgo puede representar una amenaza para el proyecto; posibilidad de recuperación casi inmediata. Debe especificarse la responsabilidad de la gerencia.
<b>BAJO</b>	El riesgo representa una amenaza mínima para el proyecto. Gestione mediante procedimientos rutinarios.

## 2.4.2 Fuentes de incertidumbre

### 2.4.2.1 Incertidumbre en el modelo conceptual

Las decisiones tomadas durante el proceso de conceptualización pueden introducir sesgos e incertidumbre en el modelo. Bond *et al.* (2008) señalaron varios tipos de sesgos, siendo los más relevantes:

- Sesgo de disponibilidad: una interpretación que viene más fácilmente a la mente y es familiar.
- Sesgo de anclaje: aceptar la opinión publicada "experta" o dominante.
- Sesgo de confirmación: buscar solo opiniones o hechos que apoyen la propia hipótesis, o interpretar de manera similar los datos para que se ajusten a la hipótesis.
- Sesgo optimista: interpretar de una manera que produzca un resultado más positivo para un estudio (como interpretar una mayor continuidad de las estructuras de control de la mineralización o evitar el emplazamiento de fallas), o preferir ignorar los datos contradictorios que pueden reducir los resultados positivos del proyecto.

Sin embargo, los siguientes factores también son importantes:

- La relevancia espacial de los datos para el proyecto: ubicación y escala.
- La calidad de las fuentes de datos disponibles.

- La representatividad y adecuación volumétrica (cantidad) de los datos disponibles.
- La complejidad geotécnica.

Sin embargo, la confiabilidad general del modelo conceptual depende principalmente del nivel de experiencia y conocimiento de quienes participan en su desarrollo.

#### 2.4.2.2 Incertidumbre en el modelo observacional

Siempre que se considere una cantidad adecuada de datos observacionales dentro de un modelo conceptual robusto, las incertidumbres en el modelo observacional se deberán a:

- Variabilidad inherente: la variabilidad espacial natural del entorno geológico que no puede reducirse.
- Datos limitados: la imposibilidad de medir las propiedades geológicas y geotécnicas en todos los puntos del terreno. La incertidumbre puede reducirse aumentando el número y distribución de mediciones.
- Incertidumbre de ensayos: incertidumbre relacionada con la precisión de los dispositivos de medición y ensayo que no se pueden eliminar sin mejorar la calidad del instrumento o equipo de laboratorio.

#### 2.4.3 Evaluación holística de la confiabilidad del EGM mediante revisión

Se ha establecido un EGM fiable cuando existe suficiente "compatibilidad" o "armonía" entre el modelo conceptual en evolución y los datos observacionales adquiridos. Es el modelo conceptual que se utiliza para medir esta compatibilidad o armonía, ya que representa el pensamiento geológico de ingeniería fundamentalmente correcto que debe desarrollarse para un sitio. Esta comparación también permite evaluar la idoneidad del modelo conceptual: si hay demasiadas discrepancias entre el modelo conceptual y los datos observacionales y aumentan a medida que se adquieren más observaciones, entonces el modelo conceptual debe ser reevaluado y revisado. Las versiones anteriores de un modelo conceptual no deben ser tachadas de erróneas o inexactas, sino que deben reconocerse como parte de un proceso iterativo y documentarse como parte del desarrollo del EGM.

Si bien la revisión por parte de expertos incluirá la evaluación de los componentes conceptuales del EGM, dicha revisión generalmente se lleva a cabo durante un tiempo limitado y, a menudo, no puede profundizar en los detalles del modelo lo suficiente como para descubrir problemas fundamentales de desarrollo que podrían afectar la confiabilidad final. Para minimizar el impacto de esta limitación inherente al proceso de examen, el enfoque óptimo es iniciar el examen de expertos lo antes posible, tan pronto como el proyecto haya comenzado, y luego continuar examinándolo periódicamente hasta su finalización. Esto no será posible cuando la revisión de expertos se encargue a mitad del proyecto, por ejemplo, en respuesta a algún fracaso importante del proyecto.

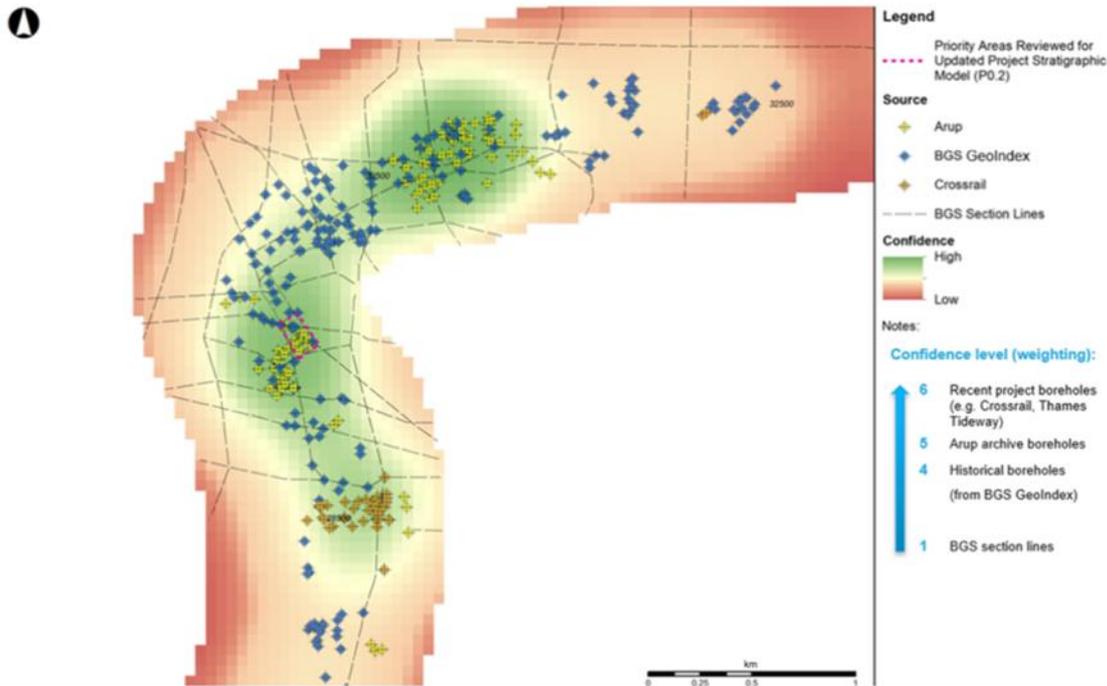
#### 2.4.4 Otros métodos de evaluación de la incertidumbre y confiabilidad del EGM

##### 2.4.4.1 Evaluación de la confiabilidad del componente conceptual

El EGM debe ser auto verificado en los puntos acordados a lo largo del desarrollo y perfeccionamiento del modelo, de modo que la confiabilidad del modelo conceptual pueda compararse con modelos conceptuales análogos apropiados de las mismas características geológicas que la zona del emplazamiento que se está modelando. Por lo tanto, la autocomprobación debe tener como objetivo comparar el concepto previsto con ejemplos de catálogos del mundo real.

##### 2.4.4.2 Evaluación de la confiabilidad del componente observacional: enfoques cualitativos

Existen múltiples formas de comunicar la confiabilidad del modelo observacional a los usuarios del modelo, incluyendo gráficos y mapas temáticos. La Figura 2-12 muestra un diagrama de confiabilidad en forma de mapa de calor como ejemplo de cómo comunicar gráficamente la incertidumbre en las observaciones.



**Figura 2-12** Mapa de calor de los grados de confianza para los niveles de los estratos (de Ting et al. 2020).

La incertidumbre en la representación geométrica de los modelos también se puede documentar y visualizar mediante el uso de técnicas como:

- Modelos digitales de distancia (sombrea la superficie y el subsuelo en función de la distancia desde los puntos de investigación).
- Buzamiento del frente de la superficie (esto localiza zonas de interés, como posibles fallamiento observado y superficies de buzamiento pronunciado entre los puntos de investigación).
- Contornear el límite del modelo a una distancia máxima de los puntos de investigación para no modelar más allá del límite establecido.

#### 2.4.4.2.1 Confiabilidad relativa de las Observaciones Geotécnicas

Se puede aplicar un enfoque cualitativo para evaluar la confiabilidad relativa de los datos del EGM para clasificar la confiabilidad de los conjuntos de datos (en orden de certeza de menor a mayor) bajo los epígrafes 'Implícito', 'Apto', 'Justificado' y, por último, 'Verificado' (véase la Tabla 2-3).

#### 2.4.4.3 Evaluación de la confiabilidad del componente observacional: enfoques semicuantitativos.

##### 2.4.4.3.1 Índice R para la construcción de túneles

El Índice R es un método de calificación desarrollado para estimar la confiabilidad de los Modelos Geológicos y Geotécnicos preparados para fines de construcción de túneles (Perello et al., 2005; Dematteis y Soldo, 2015; Venturini et al., 2019), pero se ha extendido a la aplicación en la industria minera, particularmente para validación de modelos de minas a cielo abierto (Carter y Barnett, 2021). Este método evalúa la calidad de los datos de investigación geotécnica y la complejidad geológica del sitio para calificar la confiabilidad del modelo.

**Tabla 2-3** Incertidumbre relacionada con la información disponible

Tipo de Dato	Requisitos (adaptado de Haile, 2004) asumiendo que el EGM se deriva de acuerdo con las Directrices
Implícito	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se necesitan ni se dispone de datos geotécnicos específicos del sitio.</li> <li>• El EGM es principalmente conceptual</li> <li>• El EGM tiene un nivel bajo de confiabilidad.</li> </ul>
Apto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los datos específicos del proyecto son ampliamente representativos de las principales unidades geológico-ingenieriles y de los dominios geotécnicos inferidos, aunque no se puede tener en cuenta adecuadamente la variabilidad o continuidad local.</li> <li>• Las observaciones se ajustan ampliamente al modelo conceptual. Áreas no conformes identificadas.</li> <li>• El EGM tiene un nivel moderado de confiabilidad.</li> </ul>
Justificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los datos específicos del proyecto tienen una distribución espacial suficiente (densidad) para identificar las unidades geológico-ingenieriles y demostrar la continuidad y variabilidad de las propiedades geotécnicas dentro de cada unidad.</li> <li>• Alto grado de concordancia entre los modelos conceptuales y observacionales.</li> <li>• El EGM tiene un nivel alto de confiabilidad.</li> </ul>
Verificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se derivan datos específicos del sitio. Todos los límites/unidades de ingeniería geológica han sido mapeados en campo a partir de su exposición durante la construcción.</li> <li>• Alto grado de concordancia entre los modelos conceptuales y observacionales.</li> <li>• El EGM incorpora el mapeo de exposición, por ejemplo, cimentación/túnel y observación directa de las condiciones <i>in situ</i>.</li> <li>• El EGM tiene un elevado nivel de confiabilidad.</li> </ul>

Dematteis y Soldo (2015) proporcionaron explicaciones detalladas para la aplicación del método, en un contexto de tunelización, a partir de un sistema de clasificación desarrollado para considerar los siguientes parámetros:

- Calidad de la investigación geológica y geotécnica. El método proporciona tablas de clasificación para cada uno de los parámetros que se subdividen en:
  - Mapeo geológico-ingenieril, incluyendo fotografía aérea e interpretación de imágenes satelitales.
  - Investigación geofísica (investigación indirecta).
  - Perforación y registro de pozos, pruebas *in situ* y pruebas de laboratorio (investigaciones directas).
- Complejidad del sitio, que puede ser descrita por medio de los siguientes tres parámetros geológicos, llamados Parámetros del Sistema (el método proporciona una tabla con las calificaciones a utilizar para las condiciones geológicas previstas):
  - Complejidad del entorno litoestratigráfico (LC).
  - Complejidad de las estructuras relacionadas con las deformaciones dúctiles (DC).
  - Complejidad de las estructuras relacionadas con la deformación frágil (BC).

Como muchos de los parámetros (Parámetros de Calidad y Parámetros del Sistema) involucrados pueden relacionarse entre sí, la influencia de un solo parámetro sobre todos los demás y viceversa se considera por medio de matrices de interacción binarias y totalmente acopladas.

El cálculo del Índice R se realiza a lo largo del perfil geológico y geotécnico del túnel. La alineación se divide

en tramos homogéneos, a los que se asignan las valoraciones de los parámetros descritos anteriormente, que permiten calcular el Índice R para cada tramo. Los valores del índice R oscilan entre 0 y 10. Su importancia en términos de confiabilidad del modelo ha sido deducida a partir de la revisión de varios casos históricos y se expresa en cuatro clases (A, B, C, D) como se describe en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4** Confiabilidad de los modelos geológicos y geotécnicos en proyectos de túneles utilizando el Índice R (modificado de Dematteis y Soldo, 2015).

Índice R		Confiabilidad	Descripción
Clase	Valor		
A	10 – 7.6	Bueno a muy bueno	Los límites y fallas reportados en la sección se encontrarán dentro de un intervalo de $\pm$ 25-50 m. El margen de error para el espesor de las capas litológicas puede estar entre el 10% y el 20%.
B	7.5 – 5.1	Medianamente bueno a Bueno	Los límites y fallas reportados en la sección se encontrarán dentro de un intervalo de $\pm$ 50-100 m. El margen de error para el espesor de las capas litológicas puede estar entre el 30 y el 50%. Además de las indicadas, podrían estar presentes otras fallas menores.
C	5 – 2.6	Pobre a medianamente bueno	Los límites y fallas reportados en la sección se encontrarán dentro de un intervalo de $\pm$ 100-200 m. El margen de error para el espesor de las capas litológicas puede estar entre el 50 y el 100%. Además de las indicadas, podrían estar presentes otras fallas importantes.
D	2.5 – 1	Sin confiabilidad o no confiables	Los límites y fallas informados en la sección pueden estar ausentes, y otros elementos no reportados pueden estar presentes. El espesor de las capas litológicas no está definido. Pueden estar presentes elementos geológicos distintos a los previstos.

El método cuenta con un módulo específico orientado a abordar el plan de investigación geotécnica para mejorar la confiabilidad del modelo (Perelló et al., 2005; Dematteis y Soldo, 2015). El método proporciona una evaluación de la calidad de cada uno de los datos del modelo y el impacto que los diferentes tipos de investigación geotécnica pueden tener para mejorar la calificación y, por lo tanto, apoya una decisión sobre el tipo de investigación geotécnica más adecuado para mejorar la confiabilidad del modelo.

#### 2.4.4.3.2 Evaluación de la incertidumbre

Una vez que se ha completado una investigación del sitio, se puede evaluar sistemáticamente el nivel de incertidumbre y confiabilidad de las diferentes partes del marco de conocimiento del EGM para identificar las complicaciones del proyecto, por ejemplo, utilizando el método ideado por Paul (2018).

#### 2.4.4.3.3 Uso de las declaraciones de los metadatos

La incertidumbre relacionada con los archivos de datos digitales, que pueden incluir tanto datos como interpretación, puede documentarse en un metadato que consiste en un archivo independiente adjunto a los archivos que se intercambian dentro de las organizaciones o entre diferentes disciplinas y aplicaciones de software.

#### I. Evaluación de la confiabilidad del componente observacional: enfoques cuantitativos

Los siguientes métodos también son capaces de cuantificar y gestionar este tipo de incertidumbre: enfoque de campo aleatorio, kriging y simulación estocástica. Estos se presentan a continuación.

#### 2.4.4.4.1 Enfoque de campo aleatorio

Este método permite a los usuarios interpretar la incertidumbre de la variabilidad espacial a través de una función de tendencia determinista y fluctuaciones aleatorias. Al implementar las propiedades de fluctuación

aleatoria dentro de una simulación de Monte Carlo, los usuarios pueden calcular la desviación estándar espacial relacionada con los valores estimados de los parámetros en todo el dominio de interés (Vanmarcke, 1984).

#### 2.4.4.2 Métodos Kriging

Los métodos kriging son un conjunto de técnicas univariadas y multivariadas pertenecientes a la geoestadística que permiten mapear la distribución espacial de datos georreferenciados cuantitativos, como propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos y rocas, así como los fluidos contenidos. Estos métodos se basan en la Teoría de Variables Regionalizadas que considera los atributos cuantitativos de un determinado dominio (por ejemplo, una unidad geológico-ingenieril), medidos de forma discreta, como variables aleatorias y espacialmente dependientes. Es decir, es más probable que valores relacionados con mediciones cercanas sean más similares que si estuvieran más separados. Estas técnicas geoestadísticas proporcionan una cuantificación de la incertidumbre asociada con las estimaciones en términos de varianza de kriging que, a su vez, puede proporcionar un valor de desviación estándar (dentro de la misma unidad geológico-ingenieril) o límites de intervalo de confianza requeridos (Vessia et al., 2020). Para que el kriging dé resultados significativos, esto debe llevarse a cabo para las unidades de ingeniería geológica desarrolladas con el EGM.

#### 2.4.4.3 Métodos de simulación estocástica

Los métodos de Simulación Estocástica permiten cuantificar la incertidumbre proporcionando una serie de realizaciones, obtenidas utilizando funciones de variabilidad espacial definidas a través de mediciones experimentales (variograma o LMC). Las numerosas configuraciones equiprobables de distribución espacial relacionadas con el parámetro geotécnico en estudio resultan en una distribución estadística de valores en cada ubicación del dominio considerado, lo que representa una estimación y cuantificación de la incertidumbre local.

#### 2.4.4.4 Incorporación de la incertidumbre de los datos en los parámetros de diseño

Los comentarios sobre estos aspectos del diseño quedan fuera del ámbito de aplicación de las presentes Directrices.

### **Volver a la Sección 1.4 GESTIÓN DE INCERTIDUMBRE DEL EGM**

## 2.5 ASEGURANDO LA CALIDAD DEL EGM

### 2.5.1 Objetivos generales de calidad del EGM

El EGM debe aspirar a cumplir una serie de objetivos y debe ser:

- Cumplir con los documentos/especificaciones de licitación del proyecto.
- Robusto: creado a partir de una comprensión lógica basada en la asimilación de toda la información disponible, con aportes de una experiencia considerable y siguiendo la lógica geológica.
- Transparente: de fácil acceso y comprensible incluso para personas sin conocimientos técnicos.
- Defendible: de calidad lo suficientemente alta como para resistir críticas razonables.
- Consistente: todo debe funcionar en armonía y debe estar libre de defectos importantes.
- Suficiente: debe documentar y explicar todas las condiciones de ingeniería geológica importantes en el sitio.
- Necesario: las partes del EGM que no son esenciales deben eliminarse.

### 2.5.2 Controlando la calidad del proceso de desarrollo del EGM

#### 2.5.2.1 Estandarización de las entradas de datos del modelo

La estandarización de los datos de entrada de los modelos reducirá las dificultades en el desarrollo de modelos en diferentes etapas del mismo proyecto (que podrían ser llevados a cabo por diferentes organizaciones o individuos), y/o ayudará a estandarizar los formatos de entrada de datos en todas las carteras de activos. Esto es para garantizar que los usuarios/clientes puedan distribuir estos modelos internamente dentro de su negocio para permitir que se obtenga el máximo uso de ellos y permitir que los modelos sean mejor comprendidos por aquellos fuera de las disciplinas de geología, geotecnia e ingeniería civil. La Tabla 2-5, que se muestra a continuación, no pretende ser exhaustivo con respecto a la categorización de la capa espacial, sino proporcionar una orientación sobre el nivel de detalle de la información que los usuarios/clientes desearían ver sobre la información «típica».

Tenga en cuenta que la información más antigua que carece del formato "estándar" puede clasificarse como "inexacta o incompleta" y omitirse de la base de datos. Sin embargo, dado que dicha información puede proporcionar información inestimable sobre las condiciones del terreno, es imperativo que se incorpore al modelo. Es importante garantizar que los protocolos de estandarización de entrada no se utilicen para filtrar y omitir datos no estándar pero posiblemente críticos.

En algunos proyectos, es posible que las entradas de datos del modelo tengan que cumplir con un plan de gestión de ingeniería digital específico del proyecto.

**Tabla 2-5** Estandarización de datos de entrada

Tipo de dato	Subtipo	Información requerida
Topografía		Fecha de adquisición, método de adquisición, descripción de la topografía (por ejemplo, fusionadas a partir de superficies A y B, etc.), ¿reemplazada o actual? precisión declarada, escala
Datos de sondeo/excavación	Collar	Identificación del pozo, collar xyz, proyección y datum, profundidad, inclinación, acimut, registro estándar, tipo de pozo/pozo de prueba, método
	Datos de fondo de pozo (conjunto de datos de referencia para todos los datos derivados)	Identificación del pozo, desde, hasta, tipo y descripción de roca/suelo, normalmente se encuentra en una base de datos en un formato de datos reconocido; por ejemplo, AGS y se proporciona toda la base de datos.
Datos estructurales (mediciones geológicas)		Fecha de adquisición, tipo de defecto, medición del acimut magnético o del norte verdadero
Datos piezométricos		Identificación del pozo, fecha de perforación, collar del pozo, RL, profundidad del pozo, tipo de piezómetro, fecha de medición, nivel de agua, resultado de la prueba de permeabilidad in situ.
Secciones Geológicas		Título de la sección y breve descripción, fecha, dibujado/producido, dibujado/aprobado por, tolerancia de desplazamiento de la sección, orientación, escala, métodos de proyección de pozo/tajo
Elementos de estructuras geológicas principales (fallas, diques, zonas de cizalla, ejes de anticlinales y sinclinales)		Identificación de falla (si corresponde), confianza (conceptual, inferida/baja, moderada o alta), distancia de extrapolación y justificación, ancho estimado de falla/zona (si se conoce), descripción de las características de falla, estándar descriptivo (por ejemplo, como AS 1726:2017)
Mapas georreferenciados	Imágenes aéreas / Sensores remotos terrestres	Fecha de adquisición, tipo - LIDAR, foto aérea, imagen satelital, etc., método de adquisición, bandas de onda, métodos de procesamiento, reemplazado o actual, precisión estimada de la georreferenciación, escala
	Dibujos (información que debe incluirse en el propio dibujo o dentro de la convención de nomenclatura, según corresponda)	Número de plano, fecha de creación, escala, leyenda del dibujo (si está disponible), datum del dibujo original, precisión estimada de la georreferenciación
Geofísicos	Líneas de exploración (por ejemplo, sísmicas)	Fecha de adquisición, método de adquisición, tierra o sobre el agua, leyenda, precisión estimada de la georreferenciación
	Levantamientos aéreos (Por ejemplo, gravimétricos o radiométricos)	Fecha de adquisición, método de adquisición, leyenda, precisión estimada de la georreferenciación, escala
	Geofísica en pozos (por ejemplo, registros sísmicos o acústico -ATV-)	Tipo de relevamiento, fecha de adquisición, escala de medición (según corresponda)

**Volver a la Sección 1.5 ASEGURANDO LA CALIDAD DEL EGM**

## 2.6 INGENIERIA DE PROYECTO Y EGM

### 2.6.1 Generalidades

El marco de conocimiento del EGM apoya la documentación del proyecto, adquisición del proyecto, investigación, diseño, construcción y gestión de riesgos. Como tal, el EGM es relevante para el Propietario del Proyecto, el Ingeniero del Proyecto, Contratista, Autoridad Regulatoria y otras partes interesadas del proyecto.

### 2.6.2 Generalidades de las etapas del proyecto y del EGM

El EGM desempeña un papel clave en la progresión de modelado-análisis-diseño-construcción-operación. Aunque no todos los proyectos se desarrollarán de la misma manera y se utilizan diferentes términos para describir las etapas del proyecto en diferentes áreas de la geotecnia, a continuación, se presenta un esquema de cómo puede desarrollarse el EGM en el transcurso de un proyecto:

#### *Concepto/Prefactibilidad*

- Se basa en gran medida en un estudio documental y en información existente.
- Baja confiabilidad, especialmente a escala alta (sitio del proyecto). Mejor confiabilidad a escala media-baja (regional).
- Principalmente conceptual.
- Producción del Modelo Geológico Inicial.
- Informa sobre problemas y peligros geotécnicos de alto nivel y etapas de investigación posteriores.
- La visualización en 3D podría comenzar en esta etapa.
- La visualización puede ser relativamente simple. Por ejemplo, un énfasis en ayudar a la interpretación de la geomorfología y estratigrafía o litología, o puede ser más compleja, por ejemplo, si se realiza un mapeo de reconocimiento.

#### *Factibilidad*

- Se dispone de datos de investigación específicos del sitio. Conceptualización revisada y modificada si es necesario.
- Modelo geológico producido.
- Llevar a cabo una evaluación cualitativa o cuantitativa de la confiabilidad del EGM. Pregunte cuáles podrían ser los controles clave de la geología-ingenieril sobre el comportamiento del suelo y los mecanismos críticos de rotura.
- Diseñar más investigaciones para reducir la incertidumbre y lograr la sinergia entre la conceptualización y la observación.
- Modelo geotécnico producido
- Modelos analíticos iniciales desarrollados para informar análisis específicos.
- Verifique que la confiabilidad del EGM sea consistente con la etapa de diseño.

#### *Diseño esquemático/Diseño de licitación*

- Mayor detalle en los Modelos Geológicos y Geotécnicos debido a la investigación adicional del sitio.
- Modelos analíticos desarrollados para informar el diseño.

- Desarrolle submodelos adicionales para proporcionar una mayor confiabilidad a mayor escala según sea necesario.
- Garantizar que el EGM se transfiera a los licitadores, cuando los acuerdos contractuales lo permitan.

#### *Etapas de diseño detallado*

- La visualización puede ser un modelo digital en 3D.
- Confiabilidad coherente con los objetivos a la escala requerida.
- Modelos analíticos desarrollados a partir del Modelo Geológico y Geotécnico confiable. Las preguntas clave en este paso incluyen:
  - ¿Cuáles son los controles geológico-ingenieriles en el diseño según lo informado por el EGM antes del comienzo del análisis?
  - ¿De qué manera los resultados analíticos informan la comprensión de los mecanismos y el comportamiento del terreno y es esto consistente con la comprensión conceptual?
  - ¿Cómo influye la comprensión analítica y de ingeniería geológica en la selección de los parámetros de diseño? ¿Cómo impacta el perfil de riesgo del proyecto en las decisiones de diseño?

#### *Construcción*

- El EGM se utiliza como herramienta predictiva para los trabajos de construcción y se actualiza repetidamente en respuesta a la información del terreno observada durante la construcción.
- Observaciones y monitoreo de la construcción, verificación del diseño.
- Sirve como un registro "tal como se construyó" de las condiciones encontradas.
- Integración con el BIM.

### **2.6.3 El EGM en las investigaciones in situ**

Tras el desarrollo del Modelo Geológico inicial, junto con el registro de riesgo inicial, se puede planificar la investigación del sitio para comprobar el modelo e investigar las áreas de incertidumbre. Desde el punto de vista geológico-ingenieril, la investigación debe centrarse en la adquisición de información relacionada con los siguientes objetivos clave:

- Confirmación de la comprensión de los procesos de ambiente, estratigrafía, estructura y superficie en el sitio y sus alrededores. Los datos se pueden adquirir en ubicaciones específicas del proyecto, como las esquinas de una estructura, pero esos puntos pueden cambiar con el tiempo a medida que se modifica el diseño. Los datos más críticos deben adquirirse en lugares que sean óptimos para comprender el Modelo Geológico inicial, como la profundidad de los límites de las unidades geológico-ingenieriles importantes. Sin embargo, dado que los presupuestos son limitados y todas las partes deben participar en la planificación de las investigaciones, siempre habrá un compromiso en la planificación de los lugares de investigación.
- Evaluación, caracterización y documentación de las unidades y condiciones geológico-ingenieriles mediante observaciones y ensayos de superficie y subsuelo.
- Investigación y caracterización de cualquier peligro geológico o peligro de respuesta del terreno que se haya indicado en la conceptualización.

- Evaluación de cualquier condición geológico-ingenieril problemática que se sabe que existe, pero que es tan compleja que no es práctico investigarla con suficiente detalle.
- Buscar evidencia de cualquier condición problemática geológico-ingenieril que haya sido anticipada en el proceso de conceptualización pero que no se haya observado y, por lo tanto, si se encuentra inesperadamente durante la construcción, podría considerarse como condiciones imprevistas del terreno que podrían formar la base de un reclamo.

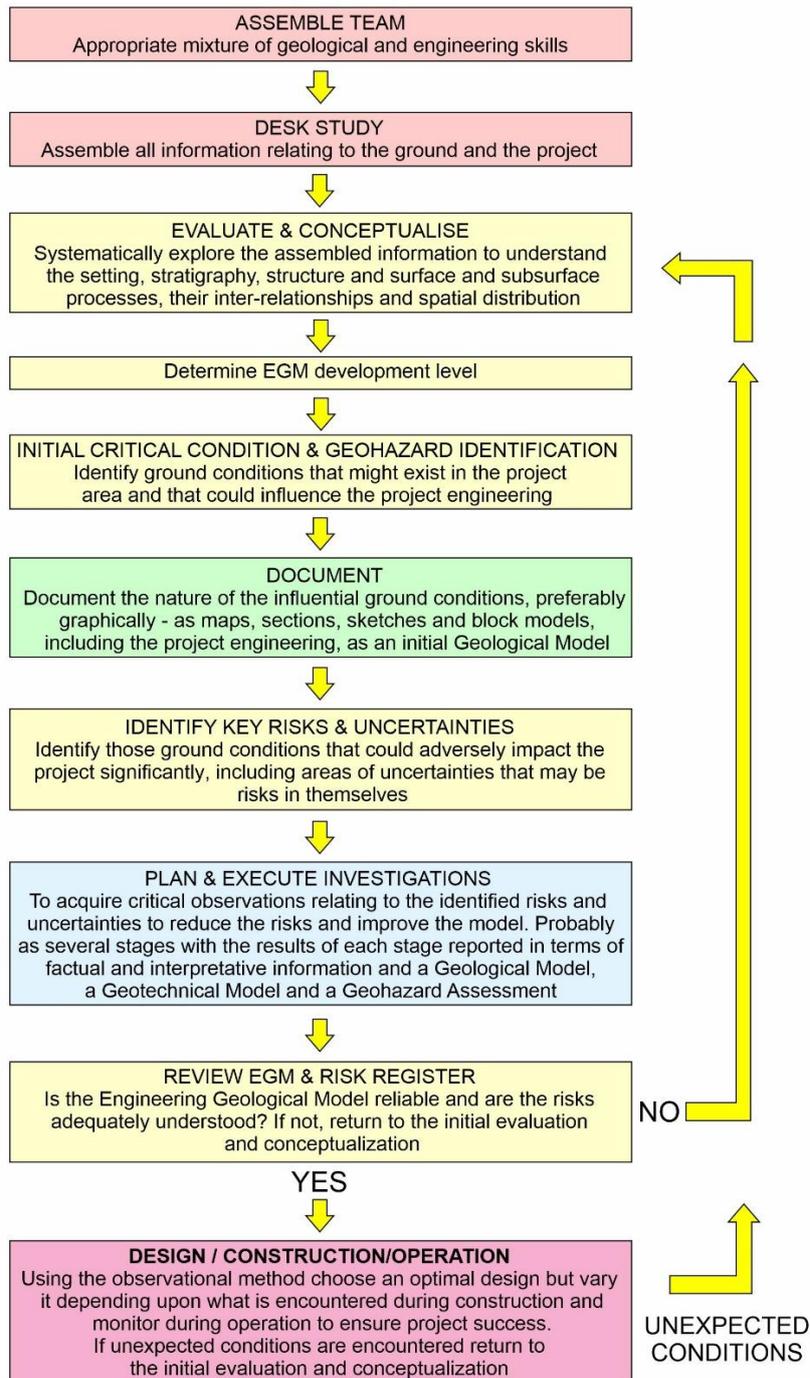
La Figura 2-13 proporciona un diagrama de proceso genérico para utilizar el marco de conocimiento del EGM para planificar y ejecutar investigaciones de sitio.

#### **2.6.4 El EGM en el análisis y diseño**

##### **2.6.4.1 Entradas del EGM para el diseño**

A medida que el EGM se perfecciona gradualmente durante las investigaciones, las observaciones adquiridas se vuelven cada vez más compatibles con los conceptos, la calidad de la comprensión mejora, la incertidumbre se reduce y, para cualquier etapa de un proyecto, se alcanza un punto en el que el diseño puede avanzar con confianza. En esa etapa, un EGM efectivo contribuye a:

- Desarrollar un marco para la evaluación y selección de parámetros geotécnicos apropiados para cada unidad geológico-ingenieril.
- Garantizar que las simplificaciones de la EGM que se requieran para el análisis geotécnico sean razonables y sólidas.
- Elegir los modelos analíticos más adecuados para el diseño. El nivel de análisis posible aumentará en sofisticación en relación con la calidad y confianza del EGM.
- Una evaluación de riesgos geotécnicos para los diversos componentes de ingeniería del proyecto.
- El EGM también se puede utilizar como base para una evaluación inicial de la posibilidad que el diseño permita una mayor eficiencia de la construcción y las técnicas de construcción asociadas que se pueden emplear, así como una base para la estimación preliminar de costos para el alcance de las obras que se están considerando (Estimación del ingeniero).



**Figura 2-13** Componentes del EGM e investigación del sitio (según Baynes et al. 2021).

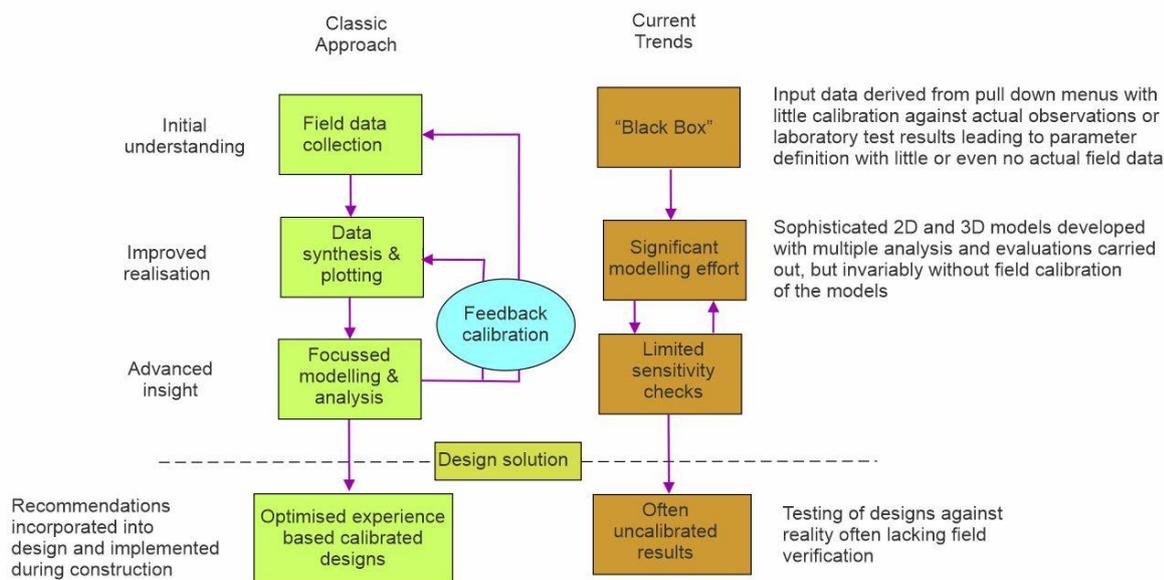
#### 2.6.4.2 Creación de modelos para el análisis

Las representaciones simplificadas tanto de la distribución de las unidades geológico-ingenieriles como de sus características ingenieriles deben exportarse desde el marco de conocimiento del EGM para proporcionar información sobre la cual desarrollar modelos analíticos. Por lo general, estos han comprendido secciones 2D, pero cada vez más se requieren en 3D. Los modelos analíticos deben adaptarse al programa informático que se utiliza y, por lo general, requieren una simplificación considerable tanto del Modelo Geológico como del Modelo Geotécnico y, por lo tanto, se requiere un juicio significativo para garantizar que se adopten

condiciones de terreno representativas y apropiadas, incluidos parámetros y límites geotécnicos.

### 2.6.4.3 Énfasis excesivo en los modelos digitales para el diseño

Los sofisticados modelos digitales en 3D de las condiciones geológico-ingenieriles que no se basan en un EGM confiable pueden dar una impresión engañosa de una mejor comprensión. Los diseñadores, constructores y propietarios deben reconocer y evitar la tendencia común de aumentar la sofisticación del modelado digital sin adquirir datos adicionales de verificación en campo. Este problema a menudo surge debido a la falta de experiencia, restricciones presupuestarias, limitaciones de tiempo o una combinación de estos factores (Figura 2-14)



**Figura 2-14** Comparación del enfoque clásico con la práctica de diseño actual (según Carter 2015).

### 2.6.5 El EGM en la gestión de la construcción

A medida que un proyecto avanza hacia la fase de construcción, las condiciones del terreno expuesto deben evaluarse en relación con las posibles variaciones previstas por el EGM y se debe evaluar si estas variaciones podrían o no afectar potencialmente a la metodología de diseño o construcción, y si la evaluación de riesgos geotécnicos requiere o no una actualización.

El EGM también desempeña un papel durante la construcción cuando se adopta el Método de Observación. El Método Observacional, propuesto por Peck (1969), es una metodología de diseño y construcción distinta del modelo observacional. Esencialmente, implica los siguientes pasos:

- Considere las complicaciones ingenieriles de una serie de condiciones geológico-ingenieriles que se pueden anticipar razonablemente a partir del EGM.
- Diseñe para las condiciones geológico-ingenieriles más probables, pero conciba diseños adecuados a la gama de posibles condiciones de ingeniería geológica y asegúrese de que el contrato permita dichos cambios.
- Durante la construcción, si las condiciones geológico-ingenieriles encontradas difieren de las esperadas, los diseños, en consecuencia, deben modificarse. Esto requiere un enlace muy estrecho entre los equipos de diseño, los geólogos de ingeniería in situ y los ingenieros constructores para garantizar que



se actúe rápidamente sobre las diferencias en las condiciones observadas con respecto a las previstas por el EGM.

## 2.7 REFERENCIAS

- AS1726. 2017. Australian Standard Geotechnical site investigations. Standards Australia, SAI Global, Sydney Australia, 75p.
- Baynes, F. J., Fookes, P. G. & Kennedy, J. F. 2005. The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 67-94. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0271-4>
- Baynes, F. J., Parry, S., & Novotny, J., 2021. Engineering geological models, projects, and geotechnical risk. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54. <http://doi.org/10.1144/qjegh2020-080>.
- BIM Forum 2019. Level of Development (LOD) Specification 2019, Part I & Commentary for Building Information Models and Data. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>, Accessed 7 January 2020
- Bock, H., Broch, E., Chartres, R., Gambin, M., Maertens, J., Maertens, L., Norbury, D., Pinto, P., Schubert, W. & Stille, H. 2004. The Joint European Working Group of the ISSMGE, ISRM and IAEG for the Definition of Professional Tasks, Responsibilities and Co-operation in Ground Engineering. In: Hack, R., Azzam, R. & Charlier, R. (eds), *Engineering geology for infrastructure planning in Europe*. Lecture Notes in Earth Sciences 104, Springer, Berlin, Heidelberg, 1–8, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-39918-6_1)
- Bond, C. E., Shipton, A. D., Gibbs, A. D. & Jones, S. 2008. Structural models: Optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty. *First Break*, 26(6), 65-71. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2008006>
- Carter, T. G. 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessment. In: *Proceedings of the 4th Italian Rock Mechanics Conference*, Torino, 1.1–1.22
- Carter, T. G. 2015. On increasing reliance on numerical modelling and synthetic data in rock engineering. In: *Proceedings of the 13th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Montreal, Canada. Paper 821, 17p. ISBN: 978-1-926872-25-4
- Carter, T. G. & Marinou, V. 2020. Putting geological focus back into rock engineering design. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53(10): 4487–4508. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02177-1>
- Carter, T. G. & Barnett, W. P. 2021. Improving reliability of structural domaining for engineering projects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28p. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02544-6> Print ISSN: 0723-2632 Electronic ISSN: 1434-453X
- Dematteis, A. & Soldo, L. 2015. The geological and geotechnical design model in tunnel design: estimation of its reliability through the R-Index. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1104547> .
- Davis, J. 2017. Crossrail's experience of Geotechnical Baseline Reports (GBRs). *Crossrail Project: Infrastructure design and construction*, 4, Published Online: August 21, 2017, © Thomas Telford Limited and Crossrail, <https://doi.org/10.1680/cpid.63594.323>
- Dearman, W. R., Baynes, F. J. & Irfan, T. Y. 1978, Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, 12, 354-374. <https://doi.org/10.1007/BF02635355>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. 2015. *Geotechnical engineering of dams*. London, CRC Press. ISBN 9781138749344 <https://doi.org/10.1201/b17800>
- FIDIC. 2019. *Conditions of contract for underground works*. Geneva, Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils (FIDIC). ISBN 9782884320870

- Fookes, P. G. 1997. Geology for engineers: the geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30(4): 293–424, <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1997.030.P4.02>.
- Fookes, P. G., Baynes, F. J. & Hutchinson, J. N. 2000. Total geological history: a model approach to the anticipation, observation and understanding of site conditions. Invited Paper, Proceedings of GeoEng2000, an International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, 19 – 24 November, Melbourne, Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania USA, 370–460.
- Fookes, P. G., Pettifer, G. & Waltham, T. 2015. *Geomodels in engineering geology – an introduction*. Dunbeath, UK, Whittles. 208 pp ISBN978-184995-139-5
- Giles, P. G., Griffiths, J. S., Evans, D. J. A. & Murton, J. B. 2017. Geomorphological framework: glacial and periglacial sediments, structures and landforms. In: Griffiths, J. S. & Martin, C. J. (eds.) *Engineering Geology of Glaciated and Periglaciated Terrains*. Geological Society Engineering Geology Special Publication, 28, 59-368. <https://doi.org/10.1144/EGSP28.3>
- Griffiths, J. S., 2019. Advances in engineering geology in the UK 1950-2018. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 52, 401-413. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-171>
- Haile, A. 2004. A reporting framework for geotechnical classification of mining projects. *AussIMM Bulletin*, September/October 2004: 30-37.
- Hoek, E. & Brown, E. T. 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(3), June 2019, 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Kessler, H., Wood, B., Morin, G., Gakis, A., McArdle, G., Dabson, O., Fitzgerald, R. & Dearden, R. 2015. Building Information Modelling (BIM) – a route for geological models to have real world impact. In: MacCormack, K., Thorleifson, H., Berg, R. & Russell, H. (eds). *Three-dimensional geological mapping: workshop extended abstracts*. Geological Society of America Annual Meeting, Baltimore, Maryland, October 31, 2015; Alberta Energy Regulator, AER/AGS Special Report 101, 13–18.
- Knill, J. L. 2003. Core values: the First Hans Cloos Lecture. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 1–34, <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0187-9>
- Moon, A. T., Wilson, R. A. & Flentje, P. N. 2005. Developing and using landslide frequency models. In: Hungr, H., Fell, R., Couture, R. & Eberhardt, E. (eds), *Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver. A. A. Balkema, Liden. 681-690.
- Morgenstern, N. R. & Cruden, D. M. 1977. Description and classification of geotechnical complexities: *International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations*. Italian Geotechnical Society, 2, 195–204.
- Norbury, D. 2020. Ground models; a brief overview. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-018>
- Parry, S., Baynes, F. J., Culshaw, M. G., Eggers, M., Keaton, J. F., Lentfer, K., Novotny, J. & Paul, D. 2014. Engineering geological models – an introduction: IAEG Commission 25. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 689–706. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0576-x>
- Paul, D. R. 2018. A simple method of estimating ground model reliability for linear infrastructure projects. *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings*, San Francisco, California, 2018 – Volume 2, Shakoor, A. & Cato, K. (eds.) [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93127-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93127-2_2)

- Peck, R. B. 1969. Ninth Rankine Lecture: advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19, 171 – 187.
- Perello, P., Venturini, G., Dematteis, A., Bianchi, G., Delle Piane, L. & Damiano, A. 2005. Determination of reliability in geological forecasting for linear underground structures the method of the R-Index. *Geoline 2005*. Lyon (FR). 1–8.
- Price, N. J. & Cosgrove, J. W. 1990. *Analysis of geological structures*, University Press, Cambridge, UK.
- Shilston, D. T., Teeuw, R. M., West, G. & Engineering Group Working Party. 2012. Desk study, remote sensing, geographical information systems and field evaluation. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication*, 25, 159–200. <https://doi.org/10.1144/EGSP25.06>
- Ting, C., Gilson, G. & Black, M. 2020. Developing the 3D geological model for Crossrail 2, London, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 54, <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-029>
- Turner, A. K., Kessler, H. & van der Meulen, M. J. (eds). 2021. *Applied multidimensional geological modelling: informing sustainable human interactions with the shallow subsurface*. London, Wiley, 450p, ISBN: 978-1-119-16312-1
- Vanmarcke, E. H. 1984. *Random fields, analysis and synthesis*. Cambridge (USA): MIT Press.
- Venturini, G., Bianchi, G. W. & Diederichs, M. 2019. How to quantify the reliability of a geological and geotechnical reference model in underground projects. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration*. 525-537.
- Vessia, G., Di Curzio, D. & Castrignanò, A. 2020. Modeling 3D soil lithotypes variability through geostatistical data fusion of CPT parameters. *Science of The Total Environment*, Volume 6981, Article 134340.
- Zaruba, Q. & Mencl, V. 1954. *Engineering geology*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 428p. (in Czech)