



Definición e importancia de la ingeniería geológica

La **ingeniería geológica** es la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería y del medio ambiente producidos como consecuencia de la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico. El fin de la ingeniería geológica es asegurar que los factores geológicos condicionantes de las obras de ingeniería sean tenidos en cuenta e interpretados adecuadamente, así como evitar o mitigar las consecuencias de los riesgos geológicos.

La ingeniería geológica surge con el desarrollo de las grandes obras públicas y el crecimiento urbano, diferenciándose como especialidad de la geología a mediados del siglo XX. La rotura de algunas presas por causas geológicas y sus graves consecuencias, incluyendo la pérdida de cientos de vidas humanas, como la presa de San Francisco (California, 1928), la de Vajont (Italia, 1963) y la de Malpasset (Francia, 1959), los deslizamientos durante la construcción del Canal de Panamá en las primeras décadas del siglo, o las roturas de taludes en los ferrocarriles suecos en 1912, fueron algunos de los hitos que marcaron la necesidad de llevar a cabo estudios geológicos aplicados a la ingeniería.

El desarrollo que alcanzaron otras ciencias afines, como la **mecánica del suelo** y la **mecánica de rocas**, configuraron los principios de la moderna **geotecnia**, dentro de la cual la **ingeniería geológica** representa la **visión más geológica a la solución de los problemas constructivos** (Figura 1.1). En la geotecnia se integran las técnicas de ingeniería del terreno aplicadas a las cimentaciones, refuerzo, sostenimiento, mejora y excavación del terreno y las citadas disciplinas de la mecánica del suelo, mecánica de rocas e ingeniería geológica.

En los albores del siglo XXI, los problemas del desarrollo sostenible, en un frágil equilibrio medioambiental sometido a la inevitable confrontación entre las consecuencias del progreso y los procesos geológicos,

junto a la expansión urbana de muchas ciudades que crecen incontroladamente en condiciones geológicamente adversas, o bajo la amenaza de riesgos naturales, constituyen una de las cuestiones prioritarias de la ingeniería geológica.

La necesidad de estudiar geológicamente el terreno como base de partida para los proyectos de grandes obras es indiscutible en la actualidad, y constituye una práctica obligatoria. Esta necesidad se extiende a otras obras de menor volumen, pero de gran repercusión social, como la edificación, en donde los estudios geotécnicos son igualmente obligatorios.

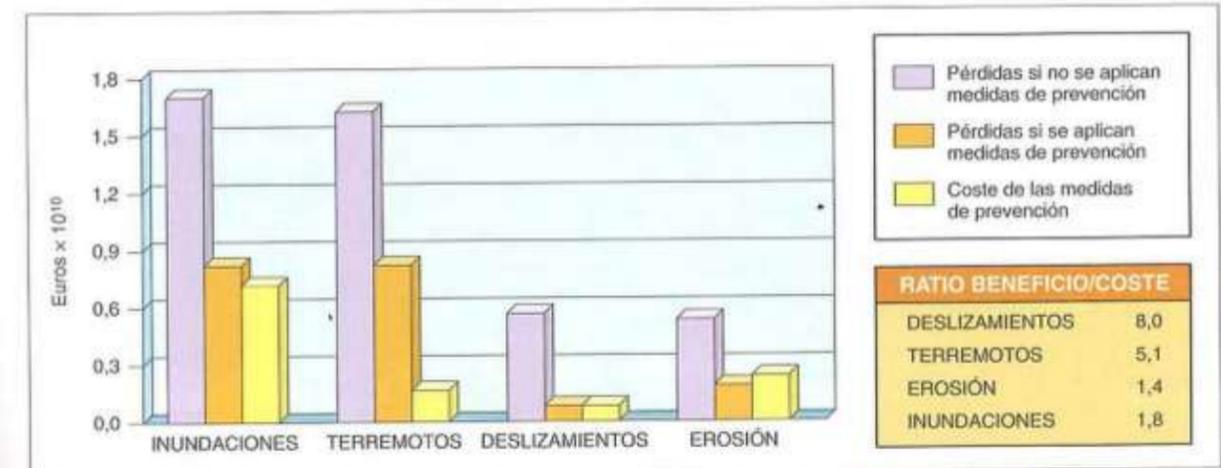
La importancia de la ingeniería geológica se manifiesta en dos grandes campos de actuación. El primero corresponde a los proyectos y obras de ingeniería donde el terreno constituye el soporte, el material de excavación, de almacenamiento o de construcción. Dentro de este ámbito se incluyen las principales obras de infraestructura, edificación, obras hidráulicas, marítimas, plantas industriales, explotaciones mineras, centrales de energía, etc. La participación de la ingeniería geológica en estas actividades es fundamental al contribuir a su seguridad y economía. El segundo campo de actuación se refiere a la prevención, mitigación y control de los riesgos geológicos, así como de los impactos ambientales de las obras públicas, actividades industriales, mineras o urbanas.

Ambos campos tienen un peso importante en el producto interior bruto de un país, al estar directamente relacionados con los sectores de las infraestructuras, construcción, minería y edificación. En el segundo ámbito de actuación la importancia económica y las repercusiones sociales y ambientales son difíciles de valorar, y pueden llegar a ser muy altas o incalculables, dependiendo de los daños y de la reducción de pérdidas si se aplican medidas de prevención (Figura 1.2).

LA INGENIERÍA GEOLÓGICA: UNA VISIÓN DESDE LA GEOLOGÍA HACIA LA INGENIERÍA



Figura 1.1 Ingeniería geológica, geología e ingeniería civil.



Proyección a 30 años e hipótesis de riesgo máximo. Ratio beneficio / coste: pérdidas por riesgos geológicos menos las pérdidas si se aplican medidas preventivas, divididas por el coste de las medidas de prevención.

Figura 1.2 Pérdidas económicas por riesgos geológicos en España. Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España (IGME, 1987).



Recuadro 1.1

El deslizamiento de El Berrinche, Tegucigalpa (Honduras)

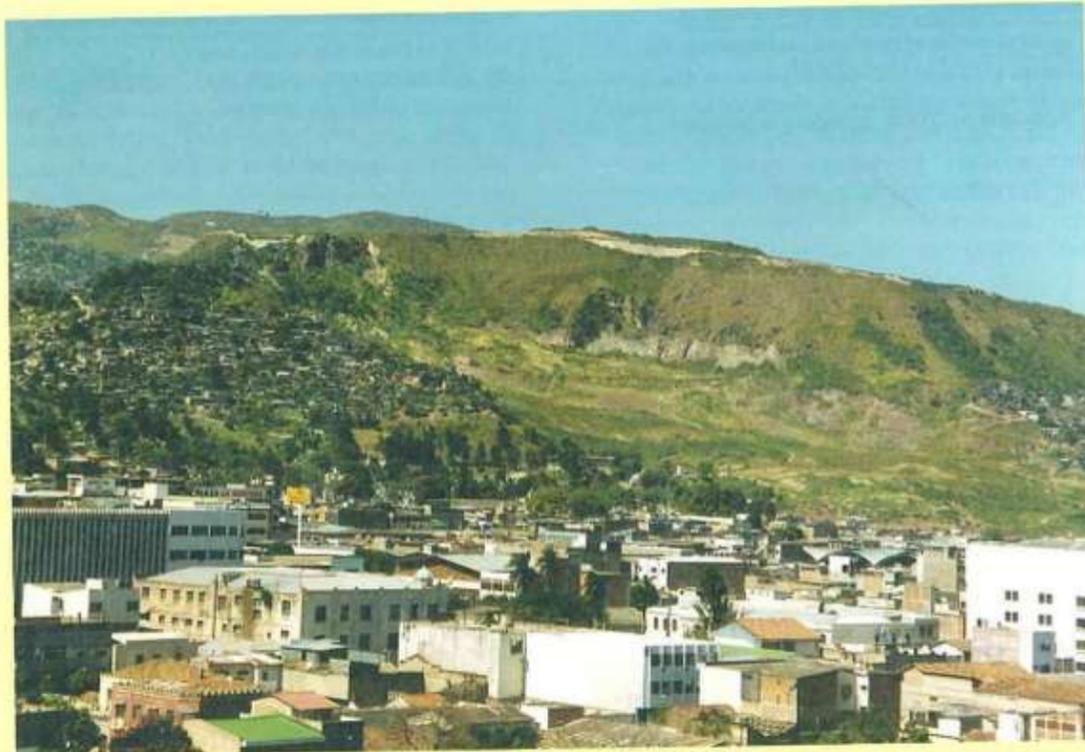
Este deslizamiento se produjo como consecuencia del huracán Mitch el 30 de octubre de 1998. El huracán, que asoló Centroamérica, ocasionó más de 25.000 muertos y una cifra incalculable de pérdidas. Las consecuencias fueron muy agravadas por la intensa deforestación y ocupación urbana de laderas inestables. Los deslizamientos ocurridos en algunas de las laderas populosas colonizadas por infraviviendas que rodean la ciudad de Tegucigalpa causaron daños muy elevados, quizás el mayor número de viviendas destruidas y personas afectadas por deslizamientos en la capital de un país que ninguna otra catástrofe haya producido hasta entonces, con pérdidas de vidas humanas y económicas irreversibles que afectaron a centenares de familias.

El deslizamiento de El Berrinche, que destruyó el barrio del mismo nombre y afectó parcialmente a otros, provocó el represamiento del río Choluteca y, consecuentemente, la inundación destructiva de las zonas más bajas de la ciudad, con gran número de víctimas, tras cambiar el río su curso e internarse en el interior de zonas urbanizadas. La corriente de lodo arrastró gran cantidad de vegetación, vehículos y fragmentos de viviendas,

alcanzó una altura de varios metros sobre las calles, dañando infraestructuras básicas de la ciudad.

En Tegucigalpa esas zonas de riesgo eran ya conocidas, y existían algunos mapas de riesgo. Como antecedente, en 1958 un gran número de casas fueron destruidas en las laderas situadas frente al cerro de El Berrinche.

Las intensas lluvias asociadas al huracán Mitch en Tegucigalpa han sido una verdadera prueba para la evaluación del comportamiento del terreno y su susceptibilidad ante los deslizamientos, denotándose un claro comportamiento diferencial de unas zonas a otras en función del tipo de materiales geológicos presentes, quedando demostrado el control litológico de los procesos de inestabilidad de ladera. De hecho los mayores deslizamientos tuvieron lugar en materiales lutíticos y limolíticos con intercalaciones de grauvacas y areniscas arcillosas del Grupo Valle de Ángeles, materiales muy evolutivos frente a la meteorización, mientras que en el otro grupo litológico que aflora en la zona, constituido por tobas volcánicas masivas (Grupo volcánico Padre Miguel), se produjeron algunos desprendimientos rocosos aislados.



Vista del deslizamiento afectando parte de la ciudad de Tegucigalpa (foto M. Ferrer).

1.2

El medio geológico y su relación con la ingeniería

El medio geológico está en continua evolución y los procesos afectan tanto a los materiales rocosos y a los suelos como al medio natural en su conjunto. El antrópico, representado por las ciudades, las infraestructuras, obras públicas, etc., irrumpe con frecuencia en regiones geológicamente inestables modificando, e incluso desencadenando, los procesos geológicos. La búsqueda de soluciones armónicas entre el medio geológico y el antrópico precisa de la consideración previa de ciertos factores diferenciadores entre ambos, cuyo desconocimiento es causa de interpretaciones erróneas. Entre estos factores destacan:

- La escala geológica y la ingenieril.
- El tiempo geológico y el antrópico.
- El lenguaje geológico y el ingenieril.

En geología se parte de una visión espacial de los fenómenos físicos de la Tierra, con escalas que van desde lo cósmico hasta lo microscópico, y el tiempo se mide en cientos de millones de años. En ingeniería las escalas espaciales y temporales se adaptan a la medida de las actividades humanas. Gran parte de los procesos geológicos, como la orogénesis, litogénesis, etc., tienen lugar a lo largo de millones de años, y condicionan factores tan diferentes como las propiedades y características de los materiales y la ocurrencia de procesos sísmicos o volcánicos. El hombre como especie irrumpe en el Cuaternario, con una antigüedad del orden de 2 millones de años, frente a los 4.600 millones de años de vida del planeta. Sin embargo la acción antrópica interviene de forma extraordinaria en determinados procesos naturales como la erosión, sedimentación, e incluso en el clima. La posibilidad de acelerar o modificar los procesos naturales es uno de los aspectos fundamentales a considerar en ingeniería geológica. Muchas propiedades de los materiales geológicos de interés geotécnico como la permeabilidad, alterabilidad, resistencia, deformabilidad, etc., o procesos como la disolución, subsidencia, expansividad, etc., pueden ser sustancialmente modificados por la acción humana.

La comparación entre el tiempo geológico y el humano es fundamental para apreciar las posibles consecuencias de los factores y riesgos geológicos. Puede considerarse que la mayoría de las obras se proyectan para ser operativas entre 50 y 100 años; sin embargo es habitual exigir garantías de seguridad

geológica y ambiental para periodos entre 500 y 1.000 años, como sucede frente al riesgo de inundaciones, terremotos, etc.; hay circunstancias en las que la estabilidad geológica se debe asegurar para periodos más largos, como en el almacenamiento de residuos radiactivos, donde se contemplan periodos de más de 10.000 años.

Considerando la escala humana, muchos procesos geológicos, como los riesgos naturales de gran magnitud, tienen en general una probabilidad muy baja de ocurrencia. El amplio rango de velocidades con que se desarrollan los procesos geológicos, desde casi instantáneos como los terremotos, hasta muy lentos como la disolución y la erosión, es otro factor que debe ser considerado.

Las escalas cartográficas, como medio de representación espacial, son otro de los aspectos diferenciales a tener en cuenta. En geología las escalas vienen condicionadas por la dimensión de los fenómenos o de las unidades geológicas, formaciones, estructuras, etc., a representar. La mayoría de los mapas geológicos tienen escalas comprendidas entre 1/1.000.000 y 1/50.000, mientras que en ingeniería las escalas más frecuentes se encuentran entre 1/10.000 y 1/500. Los mapas geológicos regionales permiten identificar factores que, no estando dentro del área específica del proyecto, podrían ser importantes para apreciar aspectos geológicos regionales, o la presencia de riesgos cuyo alcance podría afectar a la zona de estudio. Los mapas geológicos a escalas de detalle constituyen la práctica habitual en las cartografías geotécnicas, litológicas o temáticas, donde se representan discontinuidades, datos hidrogeológicos, materiales, etc., a escalas iguales a las del proyecto.

Otro de los problemas que se presenta con frecuencia al integrar datos geológicos en proyectos de ingeniería es la falta de comunicación entre ambos campos. Con independencia de la propia terminología geológica o ingenieril, suelen existir diferencias en los enfoques y en la valoración de resultados, según se trate un mismo problema desde una u otra óptica. En ingeniería se trabaja con materiales cuyas propiedades varían dentro de estrechos márgenes y pueden ser ensayados en el laboratorio, como los hormigones, aceros, etc., no cambiando sus propiedades sustancialmente con el tiempo. Sin embargo en geología la mayoría de los materiales son anisótropos y heterogé-



Recuadro 1.2

La ingeniería geológica: formación y profesión

La formación en ingeniería geológica se basa en un sólido conocimiento de la geología y del comportamiento mecánico de los suelos y las rocas y su respuesta ante los cambios de condiciones impuestos por las obras de ingeniería. La investigación del terreno mediante métodos y técnicas de reconocimiento y ensayos, así como el análisis y la modelización, tanto de los materiales como de los procesos geológicos, forman parte esencial de esta disciplina.

El profesional de la ingeniería geológica tiene formación científica y técnica aplicada a la solución de los problemas geológicos y ambientales que afectan a la ingeniería, dando respuesta a las siguientes cuestiones:

1. Dónde situar una obra pública o instalación industrial para que su emplazamiento sea geológicamente seguro y constructivamente económico.
2. Por dónde trazar una vía de comunicación o una conducción para que las condiciones geológicas sean favorables.
3. En qué condiciones geológico-geotécnicas debe cimentarse un edificio.
4. Cómo excavar un talud para que sea estable y constructivamente económico.
5. Cómo excavar un túnel o instalación subterránea para que sea estable.
6. Con qué tipo de materiales geológicos puede construirse una presa, terraplén, carretera, etc.
7. A qué tratamientos debe someterse el terreno para evitar o corregir filtraciones, hundimientos, asientos, desprendimientos, etc.
8. En qué tipo de materiales geológicos pueden almacenarse residuos tóxicos, urbanos o radiactivos.

9. Cómo evitar, controlar o prevenir los riesgos geológicos (terremotos, deslizamientos, etc.).
10. Qué criterios geológicos-geotécnicos deben tenerse en cuenta en la ordenación territorial y urbana y en la mitigación de los impactos ambientales.

Geología aplicada e ingeniería geológica*

- La geología aplicada, o geología para ingenieros, *geology for engineers*, es la geología utilizada en la práctica por los ingenieros civiles. Es una rama de la geología que trata de su aplicación a las necesidades de la ingeniería civil. No implica necesariamente el uso de los métodos de ingeniería geológica para el estudio y resolución de los problemas geológicos en ingeniería.
- La ingeniería geológica, *engineering geology* y *geological engineering*, se diferencia de la geología aplicada en que además del fundamento geológico, es necesario conocer los problemas del terreno que presentan las obras de ingeniería, los métodos de investigaciones *in situ* y la clasificación y el comportamiento de los suelos y rocas en relación con la ingeniería civil; incluye además el conocimiento práctico de la mecánica del suelo, mecánica de rocas e hidrogeología.

* Fookes, P. G. (1997). The First Glossop Lecture. Geological Society of London. *Geology for Engineers: The Geological Model; Prediction and Performance*. Q1. J1. Engineering Geology. Vol. 3, Part 4.

neos, presentan propiedades muy variables y sufren alteraciones y cambios con el tiempo.

En un proyecto de ingeniería se precisan datos cuantificables y susceptibles de ser modelizados. En geología la cuantificación numérica y la simplificación de los amplios rangos de variación de las propiedades a cifras comprendidas dentro de estrechos márgenes es difícil, o a veces imposible al nivel requerido en un proyecto. Por otro lado, es habitual disponer en ingeniería de un grado de conocimiento muy preciso sobre los materiales de construcción, mientras que la información geológico-geotécnica suele basarse en un limitado número de reconocimientos, ocasionando un factor de incertidumbre presente en los estudios geo-

técnicos, circunstancia que afecta a la mayoría de los proyectos. La apreciación de estas diferencias y la utilización de un lenguaje común adecuado a los fines del proyecto es parte de la ingeniería geológica, que dispone de métodos para cuantificar o expresar datos geológicos de forma que se puedan integrar en la modelización numérica, o en la toma de decisiones a nivel de proyecto y construcción.

La estadística es una herramienta importante para analizar datos muy variables, e incluso aleatorios. El estudio de ciertos fenómenos de periodicidad insuficientemente conocida puede ser abordado a partir de análisis probabilísticos con resultados aceptables, como es el caso de determinados riesgos geológicos. La

cuantificación de un conjunto de propiedades geológico-geotécnicas para aplicaciones constructivas es posible mediante los sistemas de clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos. La utilización del concepto de **coeficiente de seguridad**, habitualmente empleado en ingeniería para expresar el grado de estabilidad de la obra, es igualmente incorporado a la

práctica de la ingeniería geológica. La incorporación de estos y otros procedimientos, sobre todo mediante el conocimiento del medio geológico y su interacción con las actividades constructivas, hace que se puedan llegar a definir, evaluar e integrar los factores geológicos que inciden y deben ser considerados en la ingeniería.

1.3

Factores geológicos y problemas geotécnicos

La diversidad del medio geológico y la complejidad de sus procesos hacen que en las obras de ingeniería se deban resolver situaciones donde los factores geológicos son condicionantes de un proyecto.

En primer lugar, por su mayor importancia, están los riesgos geológicos, cuya incidencia puede afectar a la seguridad o la viabilidad del proyecto. En segundo lugar están todos aquellos factores geológicos cuya presencia condicione técnica o económicamente la obra. Estos factores y su influencia en los problemas geotécnicos se muestran en los Cuadros 1.1 a 1.4.

En los Cuadros 1.1 y 1.2 se presentan las posibles influencias de la litología y la estructura geológica sobre el comportamiento geotécnico de los materiales rocosos y suelos, mientras que en los Cuadros 1.3 y 1.4 se indica cómo el agua y los materiales son afectados por los diferentes procesos geológicos, dando lugar a problemas geotécnicos. En resumen, se deducen las siguientes conclusiones:

- Los factores geológicos son la causa de la mayoría de los problemas geotécnicos.
- El agua es uno de los factores de mayor incidencia en el comportamiento geotécnico de los materiales.
- Los procesos geológicos pueden modificar el comportamiento de los materiales, incidiendo sobre el medio físico, y ocasionar problemas geotécnicos.

Por otro lado, la presencia de problemas geotécnicos implica la adopción de soluciones en general más costosas, como por ejemplo cimentar a mayor profundidad por insuficiencia de capacidad portante del

terreno en cotas superficiales, e incluso la modificación del proyecto o el cambio de emplazamiento, según el alcance de los citados problemas. Por el contrario, unas condiciones geotécnicas favorables proporcionan no sólo una mayor seguridad a las obras, sino un desarrollo de las mismas sin imprevistos, lo que influye significativamente en los costes y plazos de la obra.

En términos generales las condiciones que debe reunir un emplazamiento para que sea geológica y geotécnicamente favorable son las siguientes.

- Ausencia de procesos geológicos activos que representen riesgos inaceptables al proyecto.
- Adecuada capacidad portante del terreno para la cimentación de estructuras.
- Suficiente resistencia de los materiales para mantener su estabilidad en excavaciones superficiales o subterráneas.
- Disponibilidad de materiales para la construcción de obras de tierra.
- Estanqueidad de las formaciones geológicas para almacenar agua o residuos sólidos o líquidos.
- Facilidad de extracción de materiales para su excavación.

Establecida la relación entre los factores geológicos y los problemas geotécnicos, y las diferencias entre condiciones geotécnicas favorables y desfavorables, resulta evidente que en todo estudio geotécnico es necesario partir del conocimiento geológico, interpretando la geología desde la ingeniería geológica, para determinar y predecir el comportamiento del terreno.

Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno

Litología	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Rocas duras	— Minerales duros y abrasivos.	— Abrasividad (Fotografía A). — Dificultad de arranque.
Rocas blandas	— Resistencia media a baja. — Minerales alterables.	— Roturas en taludes (Fotografía B). — Deformabilidad en túneles. — Cambio de propiedades con el tiempo.
Suelos duros	— Resistencia media a alta.	— Problemas en cimentaciones con arcillas expansivas y estructuras colapsables.
Suelos blandos	— Resistencia baja a muy baja.	— Asientos en cimentaciones (Fotografía C). — Roturas en taludes.
Suelos orgánicos y biogénicos	— Alta compresibilidad. — Estructuras metaestables.	— Subsistencia (Fotografía D) y colapsos.

(Fotos L. G. de Vallejo)



Fotografía A. Granitos con cuarzo, plagioclasa y micas



Fotografía B. Roturas en taludes mineros (Peñarroya, Córdoba)



Fotografía C. La Torre Inclinada de Pisa



Fotografía D. Subsistencia en suelos lacustres afectando a la Basílica de N.ª S.ª de Guadalupe (México D.F.)

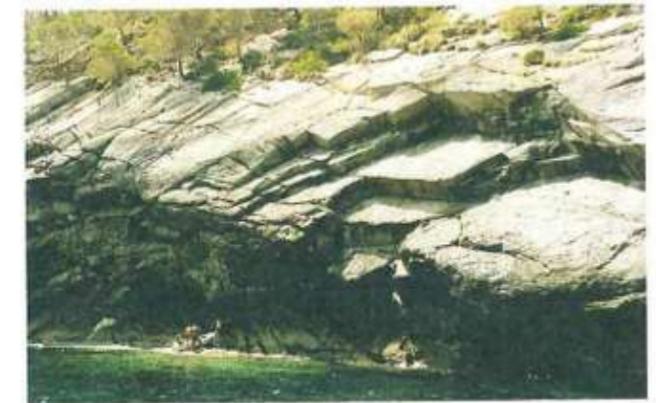
Estructuras geológicas y problemas geotécnicos

Estructuras geológicas	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Fallas y fracturas (Fotografía A)	— Superficies muy continuas; espesor variable.	Roturas, inestabilidades, acumulación de tensiones, filtraciones y alteraciones.
Planos de estratificación (Fotografía B)	— Superficies continuas; poca separación.	Roturas, inestabilidades y filtraciones.
Discontinuidades (Fotografía B)	— Superficies poco continuas, cerradas o poco separadas.	Roturas, inestabilidades, filtraciones y alteraciones.
Pliegues (Fotografía C)	— Superficies de gran continuidad.	Inestabilidad, filtraciones y tensiones condicionadas a la orientación.
Foliación, esquistosidad (Fotografía D)	— Superficies poco continuas y cerradas.	Anisotropía en función de la orientación.

(Fotos L. G. de Vallejo)



Fotografía A. Falla normal (Huesca)



Fotografía B. Estratos y diaclasas (norte de Mallorca)



Fotografía C. Pliegues en cuarcitas (sur de Inglaterra)



Fotografía D. Esquistos replegados (sur de Inglaterra)

Efectos de los procesos geológicos relacionados con el agua y su incidencia geotécnica

Procesos geológicos en relación al agua	Efectos sobre materiales	Problemas geotécnicos
Disolución (Fotografía A)	— Pérdida de material en rocas y suelos solubles. — Karstificación.	— Cavidades. — Hundimientos. — Colapsos.
Erosión-arrastre (Fotografía B)	— Pérdida de material y lavado. — Erosión interna. — Acarcavamientos.	— Hundimientos y colapsos. — Asientos. — Sifonamientos y socavaciones. — Aterramientos.
Reacciones químicas (Fotografía C)	— Cambios en la composición química.	— Ataque a cementos, áridos, metales y rocas.
Alteraciones (Fotografía D)	— Cambio de propiedades físicas y químicas.	— Pérdida de resistencia. — Aumento de la deformabilidad y permeabilidad.



Fotografía A. Karst yesífero (Sorbas, Almería) (foto M. Ferrer)



Fotografía B. Erosión y acarcavamiento en piroclastos (Guatemala) (foto M. Ferrer)



Fotografía C. Ataque al hormigón por sulfatos: formación de ettringita en forma de fibras muy finas y cristales de carbonato (cortesía de Prospección y Geotecnia)



Fotografía D. Alteraciones en materiales terciarios (Ateca, Zaragoza) (foto R. Capote)

Influencia de los procesos geológicos en la ingeniería y en el medio ambiente

Procesos geológicos	Efectos sobre el medio físico	Problemas geoambientales y actuaciones
Sismicidad (Fotografía A)	— Terremotos, tsunamis. — Movimientos del suelo, roturas, deslizamientos, licuefacción.	— Daños a poblaciones e infraestructuras. — Diseño antisísmico. — Medidas de prevención. — Planes de emergencia.
Vulcanismo (Fotografía B)	— Erupciones volcánicas. — Cambios en el relieve. — Tsunamis y terremotos. — Colapsos y grandes movimientos en laderas.	— Daños a poblaciones e infraestructuras. — Sistemas de vigilancia. — Medidas de prevención. — Planes de evacuación.
Levantamientos, subsidencias (Fotografía C)	— Cambios morfológicos a largo plazo. — Alteraciones en dinámica litoral y en el nivel del mar a largo plazo.	— Medidas de control y vigilancia.
Erosión-sedimentación (Fotografía D)	— Cambios geomorfológicos a medio plazo. — Arrastres y aumento de la escorrentía. — Colmatación.	— Aumento del riesgo de inundaciones y deslizamientos. — Medidas de protección en cauces y costas.

(continúa)



Fotografía A. Edificio destruido en el terremoto de México de 1985 (cortesía del IGME)



Fotografía B. Coladas de lava en la erupción del Teneguía en 1971, La Palma (cortesía del IGME)



Fotografía C. Subsidencia del Palacio de Bellas Artes, México D.F. (foto L. G. de Vallejo)



Fotografía D. Colmatación de cauce que rebasa la carretera y obliga a abrir un cauce artificial, Quebrada de Purmamarca, Argentina (foto M. Ferrer)

Influencia de los procesos geológicos en la ingeniería y en el medio ambiente (continuación)

Procesos geológicos	Efectos sobre el medio físico	Problemas geoambientales y actuaciones
Movimientos de ladera (Fotografía E)	<ul style="list-style-type: none"> — Deslizamientos, desprendimientos, hundimientos. — Cambios morfológicos a corto y medio plazo, desvío de cauces. 	<ul style="list-style-type: none"> — Daños en poblaciones e infraestructuras. — Obstrucción de cauces. — Medidas de estabilización, control y prevención.
Cambios del nivel freático (Fotografía F)	<ul style="list-style-type: none"> — Cambios en los acuíferos. — Cambios de propiedades del suelo. — Desecación y encharcamientos. — Subsidiencias e inestabilidad de laderas. 	<ul style="list-style-type: none"> — Problemas en cimentaciones. — Afección a cultivos y regadíos. — Medidas de drenaje.
Procesos tectónicos	<ul style="list-style-type: none"> — Tensiones naturales. — Sismicidad. — Inestabilidades. 	<ul style="list-style-type: none"> — Explosiones de roca en minas y túneles profundos. — Deformaciones a largo plazo en obras subterráneas. — Medidas de diseño en túneles y minas.
Procesos geoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> — Altas temperaturas. — Anomalías térmicas. — Presencia de gases. 	<ul style="list-style-type: none"> — Riesgo de explosión. — Dificultad de ejecución en obras subterráneas.

(fotos L. G. de Vallejo)



Fotografía E. Daños en autovías por deslizamientos (Granada)



Fotografía F. Subsistencia por extracción de agua de pozos y a favor de fallas activas (Celaya, México)



Recuadro 1.3

La rotura de la presa de Aznalcóllar: un ejemplo de fallo geológico-geotécnico de graves consecuencias ecológicas

La presa de residuos mineros de Aznalcóllar (Sevilla), propiedad de la empresa Boliden-Apirsa, tenía 28 metros de altura cuando se produjo su rotura el 25 de abril de 1998. Tres años antes se comprobó su estado de seguridad, y tanto la propiedad como los responsables del proyecto confirmaron que cumplía todos los requisitos, conclusión que fue reafirmada 5 días antes del desastre.

La rotura del dique de contención produjo un vertido de 4,5 Hm³ de líquidos y lodos hacia el río Agrio, y de ahí al Guadamar, afluente del Guadalquivir, que anegó las tierras circundantes, ocasionando una contaminación por aguas ácidas con diversos contenidos en metales pesados, afectando a todo el ecosistema circundante, incluso el Parque Nacional de Doñana.

La presa estaba apoyada sobre la formación miocena conocida como margas azules, constituidas por arcillas

de plasticidad alta, muy sobreconsolidadas, y con abundantes superficies de corte o *slickensides* en su interior.

Las margas azules han sido muy bien estudiadas y se conocen los problemas de inestabilidad que ocasionan, sobre todo en taludes de carreteras y ferrocarriles. Cuando entran en contacto con el agua y se generan altas presiones intersticiales a lo largo de las citadas superficies, su resistencia puede ser muy baja. Según los informes periciales la rotura del dique se debió a un fallo del sustrato de margas, deslizando la cimentación de la presa (ver Recuadro 11.3, Capítulo 11).

Es evidente que los factores geológico-geotécnicos que ocasionaron la rotura no se tuvieron en cuenta adecuadamente y que tampoco los sistemas de control del sistema presa-terreno fueron operativos, cuestiones fundamentales en ingeniería geológica.



La presa de Aznalcóllar tras la rotura (cortesía de C. Olalla)

Métodos y aplicaciones en ingeniería geológica

La ingeniería geológica tiene sus fundamentos en la geología y en el comportamiento mecánico de los suelos y las rocas. Incluye el conocimiento de las técnicas de investigación del subsuelo, tanto mecánicas como instrumentales y geofísicas, así como los métodos de análisis y modelización del terreno. La metodología de estudio responde en términos generales a la secuencia descrita en el Cuadro 1.5.

Para el desarrollo completo de dicha secuencia metodológica deben definirse tres tipos de modelos (Figura 1.3):

- Modelo geológico.
- Modelo geomecánico.
- Modelo geotécnico de comportamiento.

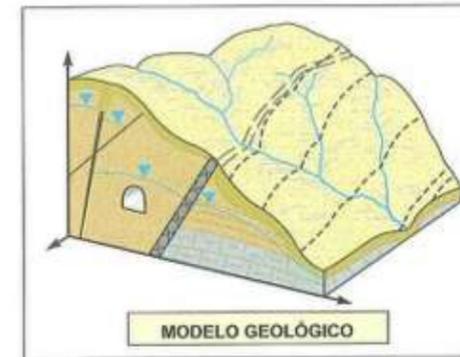
El **modelo geológico** representa la distribución espacial de los materiales, estructuras tectónicas, datos geomorfológicos e hidrogeológicos, entre otros, presentes en el área de estudio y su entorno de influencia. El **modelo geomecánico** representa la caracterización geotécnica e hidrogeológica de los materiales y su clasificación geomecánica. El **modelo geotécnico de comportamiento** representa la respuesta del terreno durante la construcción y después de la misma.

Esta metodología constituye la base de las siguientes aplicaciones de la ingeniería geológica a la ingeniería civil y al medio ambiente:

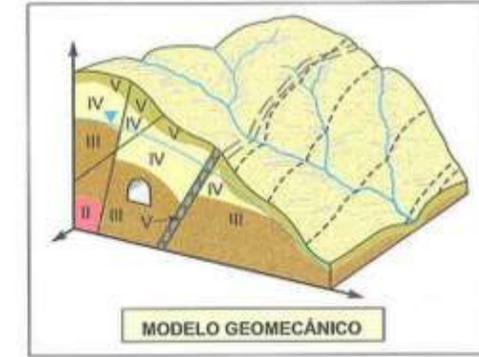
- Infraestructuras para el transporte.
- Obras hidráulicas, marítimas y portuarias.
- Edificación urbana, industrial y de servicios.
- Centrales de energía.
- Minería y canteras.
- Almacenamientos para residuos urbanos, industriales y radiactivos.
- Ordenación del territorio y planificación urbana.
- Protección civil y planes de emergencia.

Proceso metodológico en ingeniería geológica

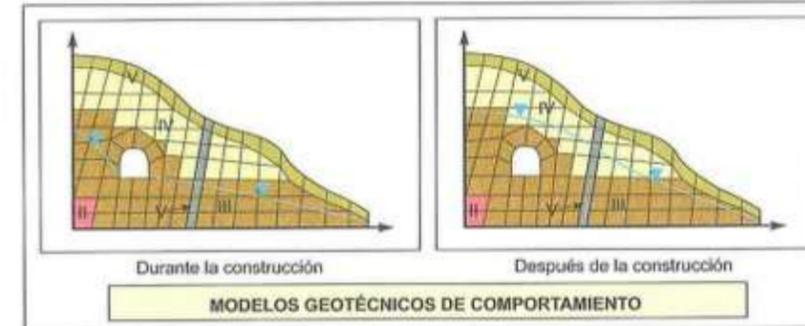
1. Identificación de materiales y procesos. Definición de la geomorfología, estructura, litología y condiciones del agua subterránea.
2. Investigación geológica-geotécnica del subsuelo.
3. Distribución espacial de materiales, estructuras y discontinuidades.
4. Condiciones hidrogeológicas, tensionales y ambientales.
5. Caracterización de propiedades geomecánicas, hidrogeológicas y químicas.
6. Caracterización de los materiales geológicos utilizados en la construcción, extracción de recursos naturales y trabajos de protección medioambiental.
7. Comportamiento geológico-geotécnico bajo las condiciones del proyecto.
8. Evaluación del comportamiento mecánico e hidráulico de suelos y macizos rocosos. Predicción de los cambios de las anteriores propiedades con el tiempo.
9. Determinación de los parámetros que deben ser utilizados en los análisis de estabilidad para excavaciones, estructuras de tierras y cimentaciones.
10. Evaluación de los tratamientos del terreno para su mejora frente a filtraciones, asentamientos, inestabilidad de taludes, desprendimientos, hundimientos, etc.
11. Consideraciones frente a riesgos geológicos e impactos ambientales.
12. Verificación y adaptación de los resultados del proyecto a las condiciones geológico-geotécnicas encontradas en obra. Instrumentación y auscultación.



MODELO GEOLÓGICO



MODELO GEOMECÁNICO



Durante la construcción

Después de la construcción

MODELOS GEOTÉCNICOS DE COMPORTAMIENTO

Figura 1.3 Ejemplos de modelización en ingeniería geológica.

Fuentes de información en ingeniería geológica

Las principales publicaciones de carácter periódico en ingeniería geológica se deben a las asociaciones internacionales y nacionales, que de forma regular celebran congresos y simposios, además de publicar revistas o boletines. Las más importantes son:

- *International Association of Engineering Geology and Environment* (IAEG).
- *Association of Engineering Geologists* (AEG).
- *International Society of Rock Mechanics* (ISRM).
- *International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ISMFE).

Entre las publicaciones periódicas destacan:

- *Boletín de la IAEG*.
- *Boletín de la AEG*.

- *Quarterly Journal of Engineering Geology* (*Geological Society of London*).
- *Engineering Geology* (*Elsevier*).
- *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (*Elsevier*).
- *Géotechnique*.

En España se publican artículos y trabajos de interés geológico-geotécnico en boletines, congresos y simposios de las sociedades nacionales correspondientes a las citadas internacionales, así como en centros de investigación, como el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y las universidades, principalmente.

1.6

Estructura del libro

Este libro es una introducción a la ingeniería geológica a través de sus fundamentos y conceptos básicos, así como a las metodologías y principales aplicaciones. Para el estudio de la ingeniería geológica es necesario partir del conocimiento de la geología. Se ha tratado de destacar a lo largo del texto la estrecha relación entre la geología y los problemas derivados del terreno en ingeniería, al ser este aspecto uno de los principales objetivos de la ingeniería geológica, ilustrando con ejemplos la abundante casuística al respecto. Sin embargo, en este libro **no se incluyen descripciones básicas sobre materias geológicas.**

El texto consta de 15 capítulos divididos en tres partes. La **Parte I** se dedica a los fundamentos de la ingeniería geológica y a los métodos de investigación del terreno. Se presta especial atención a los conceptos básicos de la mecánica del suelo y de las rocas,

junto a la hidrogeología, materia en la que se supone al lector un mayor conocimiento (Capítulos 2 al 5). El Capítulo 6 se dedica a las investigaciones *in situ* y reconocimientos geotécnicos, describiéndose los distintos métodos y procedimientos para identificar propiedades y características geomecánicas de los materiales. La cartografía geotécnica se incluye en el Capítulo 7.

En la **Parte II** se describen las distintas aplicaciones de la ingeniería geológica, centrándose en las más habituales: cimentaciones, taludes, túneles, presas y estructuras de tierras, incluidas en los Capítulos 8 al 12.

La **Parte III** trata de los riesgos geológicos en ingeniería geológica. La prevención, mitigación y control son los aspectos más destacados. A los deslizamientos se dedica el Capítulo 14 y al riesgo sísmico el Capítulo 15.

Bibliografía recomendada

- Fookes, P. G. (1997). Geology for engineers. Q1. JI. Engineering Geology. Vol 3, Part 4.
Johnson, R. B. and DeGraff, J. V. (1988). Principles of engineering geology. Ed. J. Wiley & Sons. N.Y.
López Marinas, J. M. (2000). Geología aplicada a la ingeniería civil. Ed. Ciedossat 2000. Madrid.

- Rahn, P. H. (1986). Engineering geology. An environmental approach. Ed. Elsevier.
Waltham, A. C. (1994). Foundations of engineering geology. Ed. E. y F.N. Spon.

CAPÍTULO 2

MECÁNICA DEL SUELO

CONTENIDO

1. Introducción
2. Descripción y clasificación de suelos
3. Permeabilidad. Filtraciones y redes de flujo
4. Tensiones efectivas
5. La consolidación
6. Resistencia al corte
7. Influencia de la mineralogía y la fábrica en las propiedades geotécnicas de los suelos
8. Características geotécnicas de los sedimentos
9. Problemas planteados por los suelos en ingeniería