



# Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 2. Investigación del macizo rocoso



## Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

**Creative Commons BY-NC-SA 4.0** 





# **TEMA 2: INVESTIGACIÓN DEL MACIZO ROCOSO**

- 2.1. Introducción.
- 2.2. Factores condicionantes.
- 2.3. Geología y Geotecnia del macizo rocoso.





## Introducción



## Rocas y suelos

## **ROCAS**

Agregados naturales de uno o varios minerales, duros y compactos. Dada la fuerte cohesión entre sus partículas, habitualmente se consideran sistemas continuos.



«High Island Reservoir: Hexagonal Rock Columns 04». https://www.flickr.com/photos/46990836@N03. https://flic.kr/p/9g5DYG. https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.

## **SUELOS**

Agregados naturales de partículas pequeñas, no cementadas, generalmente separables por medios de poca energía. Constituye un sistema bifase o multiFase, que podrá estar saturado o semisaturado de agua.



«Grietas de Desecación 2», Miguel Vera León. https://www.flickr.com/photos/miguelveraleon. https://flic.kr/p/5ubRb8. https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/.

En la actualidad se tiende a hablar de «Roca» como medio natural del desarrollo de los túneles, empleando en menor medida la clasificación tradicional de «roca» y «suelo» más allá de una simple descripción, dado que con frecuencia la frontera entre ambos desde un punto de vista del comportamiento tiende a desaparecer.



# Introducción



#### El macizo rocoso

Las masas rocosas suelen estar afectadas por discontinuidades (superficies de debilidad) que separan bloques de matriz rocosa, constituyendo como conjunto el macizo rocoso.

LA GEOLOGÍA CONDICIONA DE FORMA ESENCIAL LA DIFICULTAD Y EL COSTE DE LA EXCAVACIÓN



Al plantear la ejecución de una obra subterránea se busca dotar a la misma de unas características que permanezcan en el tiempo, debiendo afrontar problemas durante su ejecución o explotación, que pueden ir desde los de índole mecánica (inestabilidades), a otros de naturaleza química (interacción de los compuestos de las rocas con los elementos de sostenimiento, por ejemplo el ataque de sulfatos con el hormigón).

#### **FINALIDAD DE LOS ESTUDIOS**



«Once Crackling Hot», Mike Beauregard. https://www.flickr.com/photos/31856336@N03, https://flic.kr/p/5zEdMk. https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/.

Conocer las unidades a atravesar, detectar las zonas menos fracturadas/ meteorizadas para el trazado... Proporcionar información para el diseño, selección de excavación y dimensionamiento de los sostenimientos.

- Descripción geológica, geotécnicas e hidrogeológicas de de los materiales existentes.
- Localización de discontinuidades, fallas, juntas y estratos.
- Identificar las zonas menos fracturadas/meteorizadas (más adecuadas para la ejecución del túnel).
- Identificación de Tensiones.
- Propiedades geomecánicas.
- Identificar sectores críticos.
- Propuestas de excavación, sostenimiento y proceso constructivo (túnel y emboquilles).
- Niveles freáticos y potenciales caudales.



# **Factores condiconantes**



## Causas de inestabilidad y efectos inducidos en la ejecución de un túnel

#### **CAUSAS NATURALES**



#### **EFECTOS INDUCIDOS**

- Orientación desfavorable de las discontinuidades.
- Orientación desfavorable de las tensiones respecto al eje del túnel.
- Afluencia de agua.



- Pérdida de resistencia por la descompresión (discontinuidades, fisuración por voladura, modificación de los regímenes de circulación de agua.
- Reorientación de los campos de tensiones.
- Posible subsidencia superficial.

Estructura geológica.

- Resistencia de la roca matriz.
- Discontinuidades sistemáticas (diaclasas, planos de estratificación, esquistosidad. Presentes en casi todas las rocas, con mayor incidencia en las poco profundas) y singulares (fallas, de resistencia muy baja por su historial tenso-deformacional, presentando rellenos que pueden facilitar el acceso de agua).
- Condiciones hidrogeológicas.
- Estado tensional.

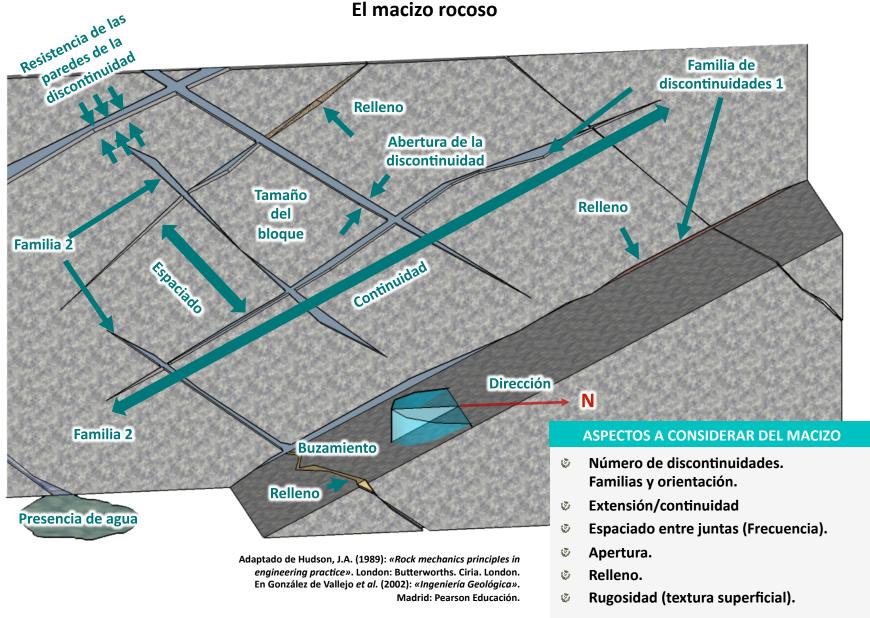
ASPECTOS CON LOS QUE SE RELACIONAN



# **Factores condiconantes**



#### El macizo rocoso







#### Estudio del macizo rocoso

**ESTUDIO GEOLÓGICO** 



**ESTUDIO GEOTÉCNICO** 

La información geológica (clasificación, tipo de material), se ve complementada y particularizada por la información geotécnica.

# Características de la roca

- Estructura geológica.
- Clasificación geológica.
- Mineralogía.
- Propiedades mecánicas.

# Descripción Geotécnica Evaluación de parámetros geotécnicos

Predecir el comportamiento mecánico del macizo rocoso al modificar el estado tensional de equilibrio

- Características de las rocas matrices.
- Evaluación de discontinuidades.
- Respuesta esperable de la roca matriz.
- Respuesta esperable del macizo.

«Diaclasas rellenas», Valdevaqueros (Tarifa, Cádiz, España). 01. Banco de Imágenes Geológicas.

https://www.flickr.com/photos/banco\_imagenes\_geologicas.https://flic.kr/p/8DTJpD.

https://creativecommons.org/licenses/bv-nc-sa/2.0/.





#### Estudio del macizo rocoso

**ESTUDIO GEOLÓGICO** 



**ESTUDIO GEOTÉCNICO** 

## CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE ROCA

**IGNEAS** 

Formadas por solidificación de un magma. Si el enfriamiento es en contacto con agua o aire, se considera extrusiva. Si es en profundidad, intrusiva (granos mayores). Si el porcentaje de sílice es mayor del 62% se considera ácida (mayor abrasividad y dureza), si es menor del 45%, ultrabásica (rica en ferromagnesianos, mayor resistencia al impacto y densidad). Valores intermedios, rocas básicas.





«Uplifted Columnar basalt Mount Rainier National Park». https://www.flickr.com/photos/brewbooks. https://flic.kr/p/29WDwb. https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/.



Formadas por acumulación de restos de otras rocas, precipitación de minerales en disolución o acumulación de restos orgánicos. La clasificación tiene en cuenta los procesos de formación, los tamaños de grano y la posible cementación entre ellos, además de los tipos de minerales y la cantidad en que se presentan.





«Turbidite», Kevin Walsh.

https://www.flickr.com/photos/86624586@N00.

https://flic.kr/p/UgSo.

https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/.

**METAMÓRFICAS** 

Originadas por la acción de presión y temperatura sobre rocas preexistentes, de características físicas y químicas comprendidas entre las propias de las rocas ígneas y de las sedimentarias.





«Metamorphic», Mike Beauregard.

https://www.flickr.com/photos/31856336@N03/5545176619/.

https://flic.kr/p/9s1tPr. https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/.





#### Estudio del macizo rocoso

ESTUDIO GEOLÓGICO



**ESTUDIO GEOTÉCNICO** 

Predecir el comportamiento mecánico del macizo rocoso al modificar el estado tensional de equilibrio

## **Descripción Geotécnica**

Evaluación de parámetros geotécnicos

- Características de las rocas matrices.
- Evaluación de discontinuidades.
- Respuesta esperable de la roca matriz.
- Respuesta esperable del macizo.

Observación de afloramientos y catas, Geofísica, observación de sondeos.



Ensayos de laboratorio + prospección geofísica + sondeos + ensayos in situ.

Los trabajos alcanzan un grado de concreción creciente a lo largo del desarrollo de los trabajos, desde una descripción inicial geomorfológica, al establecimiento de una clasificación y calificación de los diversos tramos del túnel o la obra subterránea a desarrollar, en base a sus condiciones geotécnicas.



«Geology at the Folsom auxiliary spillway».
US ARMY Corps of Engineers.
https://www.flickr.com/photos/usacehq/.
https://flic.kr/p/bk9zcN.
https://creativecommons.org/licenses/by/2,0/.





ENSAYOS DE LABORATORIO\*

**ENSAYOS** *IN SITU* 

Ensayos de Resistencia	Ensayos de Deformabilidad
Compresión simple	Compresión simple
Resistencia a compresión simple $\sigma_c$	Módulos de deformación estáticos, E y v
Compresión triaxial Cohesión (c), Ángulos de rozamiento de pico $(\phi_p)$ y residual $(\phi_r)$	
Tracción indirecta Resistencia a tracción	<u>Velocidad sónica</u>
$\sigma_{t}$	Módulos de deformación
Tracción directa	dinámicos, E <sub>d</sub> y v <sub>d</sub>
Resistencia a tracción σ <sub>t</sub>	

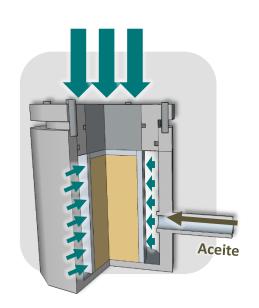
\* Los ENSAYOS DE LABORATORIO no proporcionan las propiedades de los macizos rocosos, aunque en ocasiones proporcionan valores extrapolables o corregibles. Limitaciones en representatividad (alusivos a puntos concretos del macizo), escala (probetas de tamaño limitado) y tiempo (la velocidad de deformación inducida supera la existente en la realidad). De ahí la necesidad de los ENSAYOS IN SITU.

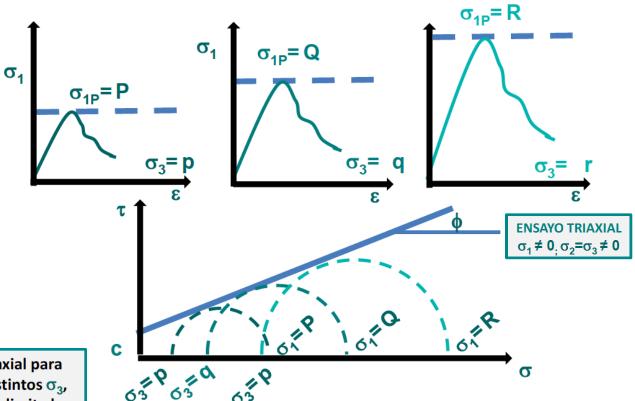






ENSAYOS *IN SITU* 





El planteamiento del ensayo triaxial para una roca matriz concreta, con distintos  $\sigma_3$ , permite definir la envolvente que limita los comportamientos elásticos (por debajo de ella), de los plásticos (por encima).







GEOFÍSICA

**ENSAYOS IN SITU** 

EJECUCIÓN DE SONDEOS

Ensayos de Resistencia	Ensayos de Deformabilidad
Compresión simple	Compresión simple
Resistencia a compresión simple $\sigma_c$	Módulos de deformación estáticos, E y v
Compresión triaxial Cohesión (c), Ángulos de rozamiento de pico $(\phi_p)$ y residual $(\phi_r)$	
Tracción indirecta	<u>Velocidad sónica</u>
Resistencia a tracción $\sigma_t$	Módulos de deformación
Tracción directa	dinámicos, E <sub>d</sub> y v <sub>d</sub>
Resistencia a tracción $\sigma_t$	

- Sísmica de refracción.
- Sísmica de reflexión.
- Ensayos eléctricos.
- Testificación geofísica (a lo largo de un sondeo).

## OTROS ENSAYOS IN SITU

- Ensayos hidrogeológicos.
- Ensayos geotécnicos in situ (presiómetros, dilatómetros, hidrofracturación).

- Deben ser representativos, cortar el máximo número de formaciones.
- Deben aportar información de la estructura en zonas de in-certidumbre.
- Sobreperforados con respecto a cota de la solera.
- Adecuados para múltiples pruebas de testificación geofísica, permeabilidad y geotecnia.
- Suficientes para identificar problemas en zonas de emboquille (mínimo 3 por boca).

<sup>\*</sup> Los ENSAYOS DE LABORATORIO no proporcionan las propiedades de los macizos rocosos, aunque en ocasiones proporcionan valores extrapolables o corregibles. Limitaciones en representatividad (alusivos a puntos concretos del macizo), escala (probetas de tamaño limitado) y tiempo (la velocidad de deformación inducida supera la existente en la realidad). De ahí la necesidad de los ENSAYOS IN SITU.





## Alternativas para la investigación en túneles

FOTOGEOLOGÍA/TELEDETECCIÓN

Escalas variables entre 1:25000 y 1:10000. Diversas posibilidades en función de la banda del espectro capturada (radar, térmicas, infrarrojo). Son rápidas pero presentan limitaciones en presencia de vegetación y requieren comprobación en campo.

**CATALOGACIÓN DE TÚNELES** 

Estudio de túneles locales similares su comportamiento, considerando datos geológicos, geomecánicos, de trazado, sostenimiento y sección. Se requiere que los datos estén disponibles, permite análisis posteriores y contribuir a la mejora de la técnica.

MAPAS GEOLÓGICOS/ GEOTÉCNICOS Escalas de 1:10000 - 1:2000 en estudios previos a 1:2000 - 1:500 en diseño. El corte geológico de la traza del túnel es esencial. Son técnicas imprescindibles, sujetas a incertidumbres y no excesivamente costosas.

**TÚNELES PILOTO** 

En túneles de gran complejidad. Permiten realizar ensayos in-situ, drenar el terreno o favorecer la migración de gas grisú. Son costosos, pero permiten ensayar instrumentación y sostenimiento.

**ESTACIONES GEOMECÁNICAS** 

Amplían el conocimiento del macizo (análisis estructural de las discontinuidades, meteorización, grado de fracturación, aportan datos hidrogeológicos y permiten clasificar debidamente los macizos). Se necesita que los datos sean representativos, y hay limitaciones si no es posible acceder a muestras por presencia de vegetación, suelos, o el grado de alteración es importante.





## Alternativas para la investigación en túneles

#### **GEOFÍSICA**

- Sísmica de reflexión: estudio de la estructura en profundidad (fallas, pliegues, contactos...).
- Sísmica de refracción: límites entre roca sana y meteorizada, determinación de módulos de deformación, volabilidad, grado de fracturación.
- Diagrafías: en el interior de un sondeo, aportan propiedades in situ (densidad, porosidad, transmisividad de las ondas, grado de fracturación...).
- Prospección eléctrica: útil para determinar contactos, fracturas y acuíferos.

#### **SONDEOS**

Proporcionan testigos para testificación geotécnica, permiten realizar ensayos en su interior, proporcionan información de zonas complejas o mal definidas.

Deben ubicarse en emboquilles, accesos, zonas complejas y de forma sistemática, a lo largo de la traza del túnel, con espaciados que podrán oscilar de 200-100 m en zonas uniformes a 100-50 en zonas complejas. Las longitudes totales de perforación recomendables oscilarán entre el 50% de la longitud del túnel para aquellos de más de 1000 metros de longitud, al 100% de la longitud del túnel si son de menos de 500.





## Geofísica

	N	MÉTODO MAGNITUD MEDIDA		APLICACIÓN	INSTRUMENTAL	TIPO DE PROSPECCIÓN	
	Gravimétrico		Prospección petrolífera y estructu (Fallas, diapiros, etc). Masas minerale diferencia de densidad, prospección aguas.		Gravímetros.	Terrestre y marina.	
	Magnético		Susceptibilidad magnética, magnetización remanente.	Petróleo (profundidad del basamento), Menas magnéticas (magnetita, ilmenita, pirrotina, hematites, etc.).	Menas magnéticas (magnetita, ilmenita, magnéticas.		
	Sísmica	Sísmica de reflexión  Velocidad de propagación de las ondas elásticas.		Petróleo (prospección estructural).	Geófonos, hidrófonos, registradores.	Terrestre y marina.	
	Eléctricos		Resistividad (Potenciales naturales, campos eléctricos inducidos, profundidad de capas y horizontes, acuíferos, Polarización inducida).	Petróleo, minerales y aguas. Estructuras, fallas, filones, sinclinales, presencia de agua/profundidad de acuíferos.	Potenciómetros, bobinas electromagnéticas, equipos de corriente alterna y frecuencia variable.	Terrestre y aérea.	
			Rayos a, b, g.	Filones y placeres, minerales radiactivos, granitos, fosfatos, yacimientos potásicos, diques pegmatíticos.	Detectores Geiger-Müller, escintillómetros, berilómetros, emanómetros	Terrestre y aérea.	





## Geofísica

MÉTODO	COMBUSTIBLES FÓSILES	MENAS METÁLICAS	MINERALES A GRANEL	PROSPECCIÓN DE ACUÍFEROS	INGENIERÍA/ CONSTRUCCIÓN	INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA
Gravimétrico	Р		S	S	S	
Magnético	Р	Р			S	Р
Sísmica	Р		Р	Р	Р	S
Eléctrico de resistividades		Р	S	Р	P	Р
Autopotencial		Р				
Polarización Inducida		Р				
Electromagnético	S	Р				Р
Radiométrico		Р				
Radar penetrante en el terreno				S	Р	Р





#### Geofísica

## **MÉTODOS SÍSMICOS**

Se basa en el estudio de ondas sísmicas generadas de forma controlada, y de su transmisión por el terreno. Algunas ondas retornarán a la superficie tras sufrir fenómenos de refracción o de reflexión en capas o estructuras geológicas dispuestas en profundidad. Para poder detectar los movimientos experimentados por el terreno a causa de dichas ondas, han de distribuirse a lo largo de la superficie del mismo instrumentos que registrarán su llegada (geófonos).

#### **TIPOS DE ONDAS**

## **P/PRIMARIAS**

Longitudinales, primeras ondas en registrarse. Caracterizadas por marcar el principio del terremoto y por presentar tanto amplitud como periodo pequeños.

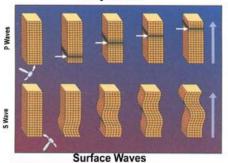
#### **S/SECUNDARIAS**

Cuentan con una amplitud algo mayor y periodo igual o ligeramente superior a las P.

#### **SUPERFICIALES**

Amplitud y periodo mayores.

#### **Body Waves**



Rayleigh Wave
Lore Wave

http://earthquake.usgs.gov/ [Public domain]. Vía Wikimedia Commons.

Capa meteorizada	300 a 900 m/s
Aluviones	
Modernos	350 a 1500 m/s
Arcillas	1000 a 2000 m/s
Margas	1800 a 3200 m/s
Areniscas	1400 a 4500 m/s
Conglomerados	2500 a 5000 m/s
Calizas	4000 a 6000 m/s
Dolomías	5000 a 6000 m/s
Sal	4500 a 6500 m/s
Yeso	3000 a 4000 m(s
Gneises	3100 a 5400 m/s
Cuarcitas	5100 a 6100 m/s
Granitos	4000 a 6000 m/s
Gabros	6700 a 7300 m/s

Velocidad de propagación de las ondas longitudinales en distintos materiales. Adaptado de Cantós Figuerola, J. (1987): «Tratado de Geofísica Aplicada». Ciencia 3 Distribución. Madrid. 535 Pp.





## Geofísica

## **MÉTODOS SÍSMICOS**

A partir de los sismogramas (izda) se obtienen curvas espacio frente a tiempo (dromocronas, dcha).



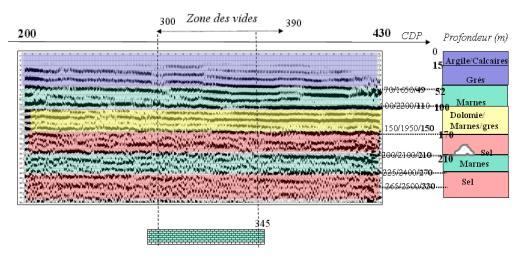
«Shaker Trucks».

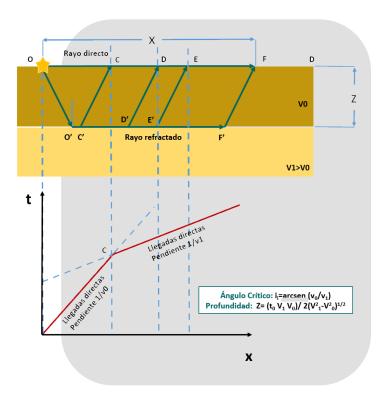
https://www.flickr.com/photos/wcn247/.

https://flic.kr/p/dciUPN

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/.

La vibración para el análisis puede generarse mediante explosivos o a un camión vibrante (en la imagen junto a geófono).









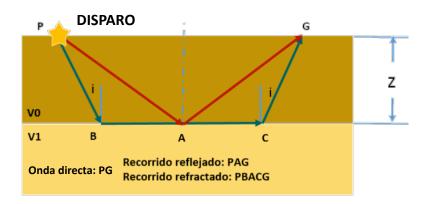
#### Geofísica

**MÉTODOS SÍSMICOS** 

#### SÍSMICA DE REFRACCIÓN

SÍSMICA DE REFLEXIÓN

Generación en superficie de ondas sísmicas, debiendo registrar aquellas que experimenten refracción total a lo largo de los contactos existentes entre capas caracterizadas por ofrecer distintas velocidades de transmisión. Dado que las ondas de refracción total son las que aportan recorridos de tiempos mínimos, quedan registradas como primeras llegadas en las sismogramas.



Recorridos reflejado y refractado. Adaptado de Cantós Figuerola, J. (1987): «Tratado de Geofísica Aplicada». Ciencia 3 Distribución. Madrid. 535 pp.

Registro de los tiempos de llegada de las ondas reflejadas en los contactos de las diversas capas. En base a los tiempos de llegada y las distancias superficiales de medida, es posible conocer la disposición en profundidad de los estratos.

Los impulsos reflejados pueden distinguirse con facilidad dada su amplitud, la forma de la onda y la alineación característica de las fases en las distintas trazas que compondrán el sismograma, cada una correspondiente a uno de los geófonos (dispositivos encargados de traducir los movimientos de la superficie del terreno en pequeñas fuerzas electromotrices, que a serán amplificadas y debidamente registradas) dispuestos en superficie a distancias variables con respecto del foco de generación de las ondas. Es posible recurrir a la ejecución de pozos de explosión que superen la capa de meteorización.

A profundidades escasas el método de reflexión no resulta útil, ya que las alteraciones asociadas a la propia detonación del explosivo enmascara la respuesta si ésta es muy superficial, pudiendo resultar más útil el de refracción en tales circunstancias, en el que se registran las primeras llegadas de los contactos.

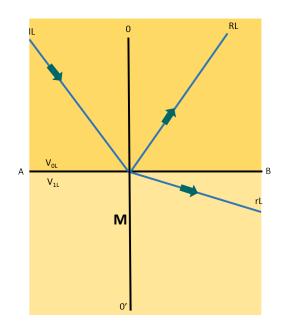




#### Geofísica

## **MÉTODOS SÍSMICOS**

## Leyes de reflexión y refracción



Rayos sísmicos longitudinales incidente, refractado y reflejado. Adaptado de Cantós Figuerola, J. (1987): «Tratado de Geofísica Aplicada». Ciencia 3 Distribución. Madrid. 535 pp.

Supóngase un rayo incidente longitudinal IL, que se propaga de un medio 0 a un medio 1, al llegar al contacto generará dos rayos transversales (reflejado y refractado, de menor energía, al ser en este caso generados generalmente por explosivos) y dos longitudinales (reflejado RL y refractado rL), todos ellos en un mismo plano.

En los rayos reflejados se cumplirá que el ángulo ILMO será igual a RLMO'.

En los refractados se cumple la Ley de Snell:

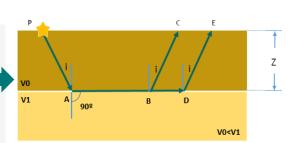
$$\frac{sen\ ILMO}{sen\ rLMO'} = \frac{V0L}{V1L}$$

## **REFRACCIÓN TOTAL**

Se produce cuando el ángulo de refracción es de 90°, sucediendo que el rayo se propaga por el contacto entre dos capas, de tal modo que:

$$\frac{sen i}{sen 90^{\circ}} = \frac{V0}{V1}$$

i en tal caso se denominará ángulo límite. En sísmica de refracción se estudian los rayos que experimentan refracción total, por ser los que proporcionan recorridos de tiempo mínimo.





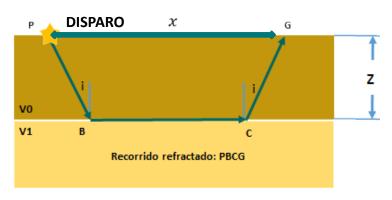


#### Geofísica

## **MÉTODOS SÍSMICOS**

#### SÍSMICA DE REFRACCIÓN

#### CASO DE SUPERFICIE DE CONTACTO PLANA



Recorrido refractado. Adaptado de Cantós Figuerola, J. (1987): «Tratado de Geofísica Aplicada». Ciencia 3 Distribución. Madrid. 535 pp.

Según la Ley de Snell:  $\frac{seni}{sen90^{\circ}} = \frac{V0}{V1}$ ;  $seni = \frac{V0}{V1}$ 

$$PB = \frac{Z}{cosi} = \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} = \frac{Z \cdot V_1}{\sqrt{V_1^2 - V_0^2}}$$

$$BC = X - 2 \cdot Z \cdot tgi = x - \frac{2h \cdot V_o}{\sqrt{V_1^2 - V_o^2}}$$

Si G está a una distancia x, y el tiempo registrado es t:

RECORRIDO: PB + BC + CG = BC + 2PB = 
$$x - (2z \cdot v_0) / (v_1^2 - v_0^2)^{1/2} + 2 \cdot z \cdot V_1 / (v_1^2 - v_0^2)^{1/2}$$
  
TIEMPO:  $t = [2z \cdot (v_1^2 - v_0^2)^{1/2} / (v_1 \cdot v_0)] + x/v_1$ 

REFRACTADA QUE LLEGARÁ SERÁ AQUELLA PARA LA QUE EL RECORRIDO EN BC ES NULO

LA PRIMERA ONDA



PROFUNDIDAD DEL PUNTO CRÍTICO:  $Z = (X / 2) \cdot [(v_1 - v_0) / \cdot (v_1 + v_0)]^{1/2}$ 



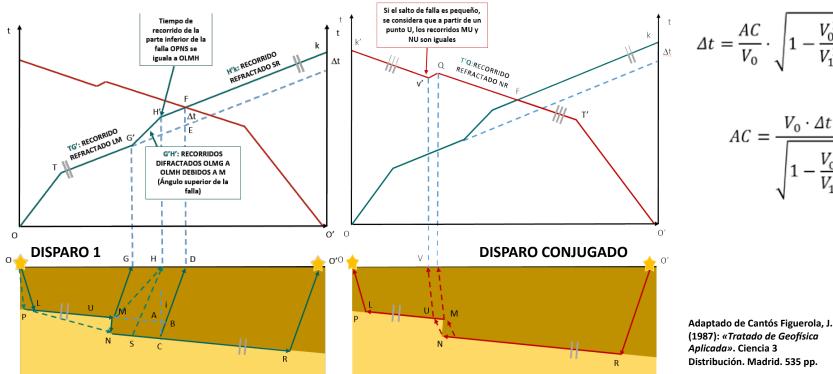


## Geofísica

**MÉTODOS SÍSMICOS** 

SÍSMICA DE REFRACCIÓN

#### EJEMPLO DE CONTACTO NO HORIZONTAL CON FALLA



$$\Delta t = \frac{AC}{V_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}};$$

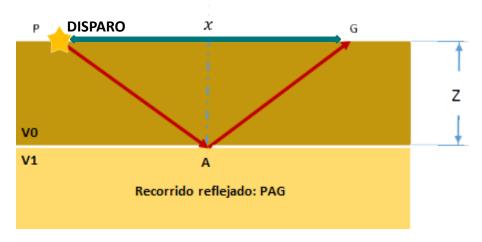
$$AC = \frac{V_0 \cdot \Delta t}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}}$$





## Geofísica

## **MÉTODOS SÍSMICOS**



Recorrido reflejado. Adaptado de Cantós Figuerola, J. (1987): «Tratado de Geofísica Aplicada». Ciencia 3 Distribución. Madrid. 535 pp.

#### SÍSMICA DE REFLEXIÓN

Si G está a una distancia x, y el tiempo registrado es T:

**RECORRIDO:** PAG = 
$$2PA = (x^2 + 4z^2)^{\frac{1}{2}}$$

TIEMPO: 
$$t = 2PA/V_0$$
;  $t = (x^2 + 4z^2)^{\frac{1}{2}}/V_0$ 

$$z = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{V_0^2 t^2 - x^2};$$





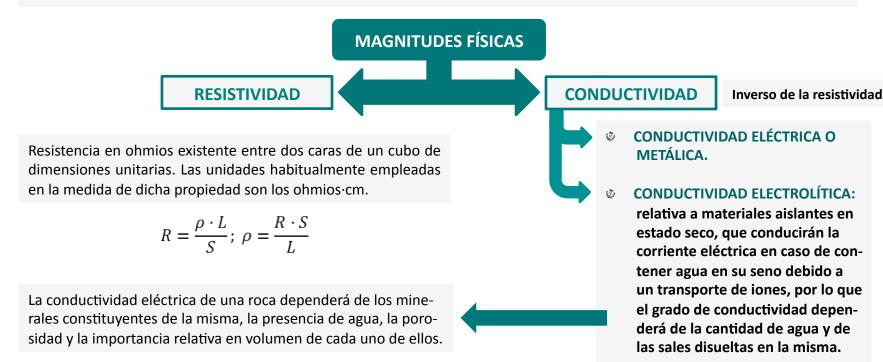
#### Geofísica

## **MÉTODOS ELÉCTRICOS**

Los métodos eléctricos se basan en el estudio de campos de potencial eléctrico, pudiendo emplearse tanto aquellos de carácter natural, como otros inducidos de forma artificial en el terreno.

En la aplicación de estos métodos puede emplearse tanto corriente continua como alterna, siendo esta última más simple de interpretar.

Permiten prospectar a diversas profundidades, y resultan más económicos que otras metodologías, como por ejemplo la sísmica, por lo que su uso está más extendido.







## Geofísica

## **MÉTODOS ELÉCTRICOS**

## **MAGNITUDES FÍSICAS**

Tipo de Material	Resistividad (Ohmios·cm)		
Cobre	1,7·10^-6		
Mica	10^10 a 10^15		
Sal gema seca	10^5 a 10^15		
Calcita	5 a 10^14		
Cuarzo	10^14		
Granito Seco	10^8 a 10^11		
Arenisca seca	10^6 a 10^10		
Limonita	10^7		
Caliza Seca	10^5 a 10^6		
Caliza húmeda	5·10^3 a 5·10^4		
Marga seca	5·10^3 a 10^4		
Marga húmeda	10^2 a 10^3		
Arcilla seca	8·10^3		
Arcilla húmeda	10 a 10^2		
Agua pura de montaña	10^4 a 3·10^5		
Agua con un 3% de sal	5 a 10		
Agua con 20% de sal	3		





## Geofísica

## **MÉTODOS ELÉCTRICOS**

**MAGNITUDES FÍSICAS** 

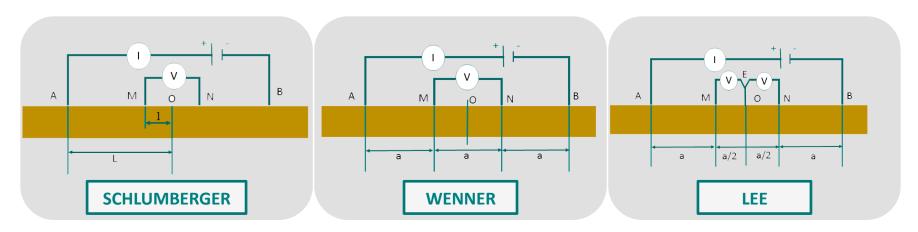
## **CON CORRIENTE ELÉCTRICA ARTIFICIAL**

- Método de resistividades.
- Método de cuerpo cargado.
- Método de polarización inducida.

CON CORRIENTE ELÉCTRICA NATURAL

De autopotencial o potencial natural.

#### **DISPOSITIVOS**







#### Geofísica

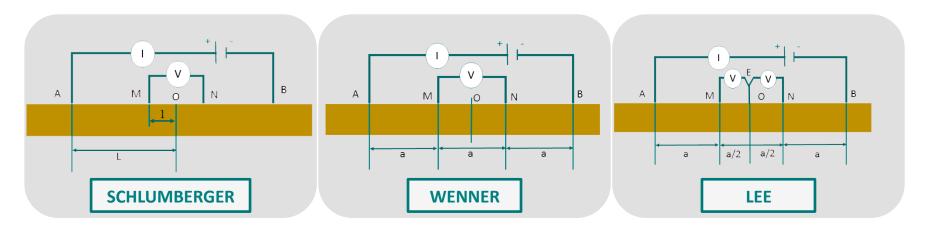
**MÉTODOS ELÉCTRICOS** 

#### MÉTODO DE RESISTIVIDADES

El método de resistividades se emplea en el estudio de discontinuidades horizontales y verticales de las propiedades eléctricas del terreno, la detección de cuerpos anómalos tridimensionales tales como masas de sulfuros, el seguimiento de filones no conductores, la localización de la roca madre o en la detección de aguas en formaciones geológicas de escasa profundidad.

Constituye sin duda la principal modalidad de la prospección eléctrica. En él se envía corriente al terreno mediante dos electrodos clavados en el suelo, y habiendo constituido de esta manera un campo eléctrico, se investigan sus principales características mediante otros dos electrodos de investigación.

A tal fin las distancias existentes entre estos dos últimos se irán variando de forma conveniente. De esta manera es posible determinar la **resistividad aparente del terreno**, dependiente del cociente de la diferencia de potencial medida entre los bornes de investigación y la corriente introducida en el terreno.







#### Geofísica

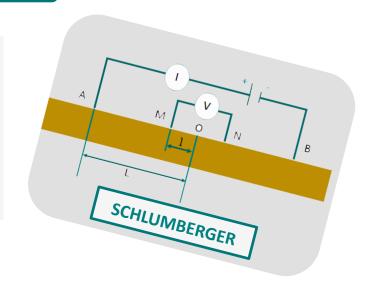
## **MÉTODOS ELÉCTRICOS**

## SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

El sondeo eléctrico vertical (S.E.V.) Es uno de los métodos más utilizados en la actualidad. A partir de punto central de estacionamiento (O), y mediante el empleo de un dispositivo Schlumberger se realizan una serie de lecturas cambiando el valor del parámetro L. Al modificar la distancia entre los electrodos de corriente, se incrementa la amplitud del dispositivo, alcanzándose mayores profundidades en la prospección.

La obtención de la **curva del S.E.V.** implica determinar la resistividad obtenida a diversas profundidades, mediante la aplicación de la fórmula siguiente:

$$\rho = \frac{\pi \cdot L^2 - l^2}{2 \cdot l} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$



El gráfico a representar sitúa en el eje de abcisas la semidistancia entre los electrodos de corriente, y en el eje de ordenadas el valor de la resistividad de este modo calculada. En el caso de prospectar una sola capa, caracterizada por una resistividad única, el resultado será una recta horizontal. Si se cuenta con dos estratos de resistividad diferenciada, se obtendrá una curva que tenderá asintóticamente a dichos valores. Las curvas de tres capas con frecuencia presentan un máximo, un mínimo, o tres puntos de inflexión cuyos valores en ordenadas determinarán las resistividades de las capas. Si se desea determinar las profundidades y las resistividades existentes a las mismas, se debe recurrir a ábacos: Orellana y Mooney en Cantós Figuerola, 1987) o Griffiths y King (Kearey et al., 2004).

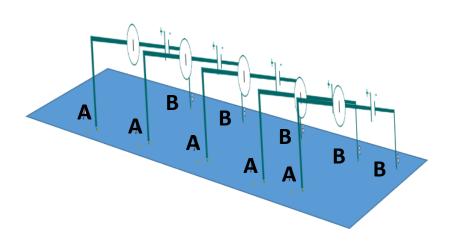


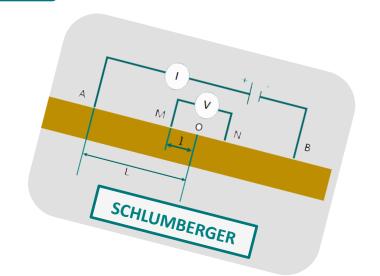


## Geofísica

## **MÉTODOS ELÉCTRICOS**

## CALICATA ELÉCTRICA





Es posible estudiar la resistividad a profundidad fija, o incluso a varias profundidades determinadas, pero a lo largo de un perfil establecido. Una de modalidades fundamentales se desarrolla en base una disposición Wenner, ha de practicarse una traslación paralela al propio dispositivo a lo largo del terreno, obteniéndose una calicata de campo fijo, que ofrecerá información relativa a una profundidad constante.

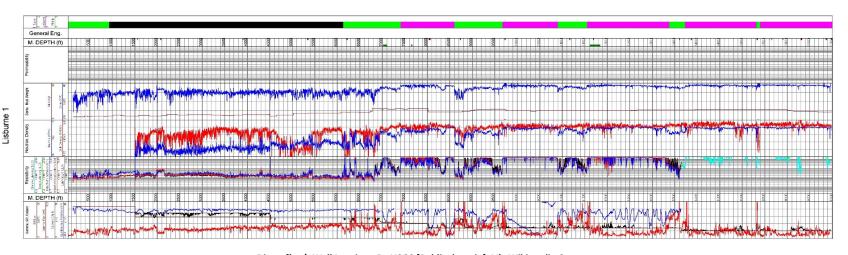




#### Geofísica

## **TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA**

Los métodos de testificación geofísica consisten en la ejecución de un sondeo NO NECESARIAMENTE CON recuperación de testigo, en cuyo seno se pueden realizar en cuestión de horas mediciones relativas a resistividad y polarización espontánea, radiaciones gamma, registros neutrónicos, determinación de dirección y buzamiento de capas, elasticidad y velocidad de transmisión de ondas, testificación inductiva y determinaciones sobre la densidad de las capas. Dichos datos estarán referenciados con respecto a la profundidad en la que fueron adquiridos con una precisión mayor de la que puede ofrecer un testigo físico, presentando ventajas tales como la mayor simplicidad en las técnicas a aplicar para la perforación, lo que contribuye a economizar el proceso.



«Diagrafía»/«Well Logging» By USGS [Public domain]. Vía Wikimedia Commons.





## Geofísica

## **TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA**

TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA			
Valores medidos	Resistividad. Potencial espontáneo. Rayos gamma. Velocidad sísmica. Porosidad, inducción magnética. Registro de neutrones. Densidades. Inclinación y dirección de las capas. Temperaturas.		
Instrumentos empleados	Testificadores eléctricos y radiactivos. Rayos gamma. Registrador de neutrones. Inclinómetro y fotoclinómetro. Sonda sónica.		
Tipo de prospección	Terrestre.		
Resultados obtenidos	Características físicas y potenciales de los terrenos perforados. Espesores y profundidades. Diagrafías.		





## Sondeos con recuperación de testigo

La perforación con recuperación de testigo presenta ventajas tales como la continuidad de la muestra, el volumen constante de muestra por unidad de longitud, la facilidad del manejo y estudio que ofrece el testigo, así como la calidad de la información que ofrece.

Entre los problemas asociados a esta sistemática están los de la propia recuperación en determinadas formaciones, debida a aspectos tales como la fracturación, una escasa dureza o friabilidad alta. En este caso la ejecución de los sondeos se fundamenta principalmente en la aplicación de coronas de diamante, técnica de gran versatilidad por la variabilidad en el ángulo de perforación que ofrece, si bien en ocasiones se recurre a bocas de metal duro o con insertos de carburo de tungsteno, montados en el extremo de un tubo que es accionado mediante el varillaje, conectado a su vez a la maquinaria de perforación. Los esfuerzos de empuje y rotación motivan el corte de la roca, formándose el testigo cilíndrico, que posteriormente debe cortarse y extraerse del macizo rocoso. Para ello se emplean los tubos sacatestigos. Como fluido de perforación se emplea fundamentalmente agua. La operación de perforación y recuperación del testigo se considera lenta y costosa, pudiendo considerar que avances de entre 12 y 16 metros por relevo son adecuados.

Fuente: López Jimeno, C., López Jimeno, E., Ramírez Ortega, A. & Toledo Santos, J.M. (2000): «Manual de Sondeos». U.D. Proyectos. Madrid. 699 pp.









## Sondeos con recuperación de testigo

Existen varias modalidades de tubo sacatestigos, destacando fundamentalmente el convencional, y el del denominado sistema "wireline". En el primer caso, el portatestigos convencional va roscado a la última varilla mediante la llamada cabeza giratoria, que sea poya sobre éste y distribuye el fluido de perforación al espacio comprendido entre los tubos interior y exterior del mismo (inicialmente se fabricaban de tubo único, pero el fluido contaminaba el testigo, en la actualidad existen también dobles simples y giratorios, y triples). Para extraer el tubo sacatestigos ha de sacarse el varillaje, y una vez sacado el testigo se debe limpiar el tubo sacatestigos y volverlo a introducir.

El tubo portatestigo utilizado en el caso del sistema wireline es independiente del varillaje, y permanece anclado a él únicamente mientras la corona corta la roca. En este caso la sarta de perforación está constituida por una tubería de diámetro casi igual al del tubo sacatestigos, en lugar de las varillas, por lo que a través de ella se introduce, quitada la giratoria de inyección, un cable provisto de un sistema de enganche que permite extraer la cabeza del tubo sacatestigos al exterior, implicando una importante reducción de costes e incrementando los rendimientos a partir de 100 metros de perforación.

#### Fuentes:

López Jimeno, C., López Jimeno, E., Ramírez Ortega, A. & Toledo Santos, J.M. (2000): «Manual de Sondeos». U.D. Proyectos. Madrid. 699 pp.

Toraño Álvarez, J., Torno Lougedo Si. & Richard Gent, M. (2009): «Perforaciones y Sondeos con Triconos y Productos Diamantados». Textos Universitarios ediuno. 196 pp.



«Cabezas de corte diamantadas» («Diamondcorebits»).

Licensed under CC BY-SA 3.0. Vía Wikipedia:

http://en.wikipedia.org/wiki/.

File:Diamondcorebits.jpg#mediaviewer/.

File:Diamondcorebits.ipg.





## Sondeos con recuperación de testigo

## **VÍDEOS**



«Layne Rig57». Licensed under CC BY-SA 3.0. Vía Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/. File:Layne\_Rig57.jpg#mediaviewer/. File:Layne\_Rig57.jpg.

- «Corpro Quickcore Animation». ALS Oil and Gas Group. <a href="https://www.youtube.com/watch?v=v\_oROa6\_t7k">https://www.youtube.com/watch?v=v\_oROa6\_t7k</a>.

  (Sistema mixto sin/con testigo).
- «Core Barrel assembling Animation» <a href="https://www.youtube.com/watch?v=G9k6ikfqFMs">https://www.youtube.com/watch?v=G9k6ikfqFMs</a>.
- «Core Barrel». Atlas Copco. <a href="https://www.youtube.com/watch?v=U5TpDxA-KIU">https://www.youtube.com/watch?v=U5TpDxA-KIU</a>.
- «Multi power hydraulic diamond drill "Simba diamond Drilling"». Michael Graham. https://www.youtube.com/watch?v=eJgjK4CdPMA.
- «Sandvik multifunctional wireline core barrel system». SandvikMining1 https://www.youtube.com/watch?v=YwI9kThccYs.





## Estaciones geomecánicas

Se define como tal aquel punto seleccionado para la observación del macizo rocoso, en un afloramiento o, en el caso de labores subterráneas, en un frente de avance. En este último caso, sirviendo como ejemplo el control de túneles, las observaciones han de realizarse sobre el frente, con pocas mediciones y en tiempo limitado. Se busca establecer una clasificación cuantitativa de la calidad del macizo, con el fin de adecuar los avances de excavación y el sostenimiento, como se verá en el tema siguiente. Por ello se recurre a estadillos normalizados que permita hacer una toma rápida de los datos de campo, debiendo recoger aspectos tales como:

Fuente: Romana Ruiz, M. & Serón Gáñez, J.B.: «Formatos normalizados para la toma de datos de campo a usar en las clasificaciones geomecánicas RMR, Q Y SMR». Recurso online: http://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR\_Art\_FormatosNormalizados.pdf

- Resistencia de la roca matriz a compresión simple.
- RQD.
- Presiones intersticiales/Condiciones de flujo.

#### PARA CADA FAMILIA DE DIACLASAS

- Direction.
- Buzamiento.
- Espaciamiento.
- Continuidad.
- Rugosidad.
- Meteorización de los bordes.
- Abertura y relleno.
- Flujo de agua por la diaclasa.

#### PARA POSIBLES VERIFICACIONES

- Situación del estacionamiento (coordenadas / p.k.).
- Descripción del afloramiento/excavación.
- Croquis (situación y acceso).
- Fotografía.

#### PARA REFERENCIA

- Proyecto.
- Quién realiza la clasificación.
- Fecha.





## Metodología para el desarrollo de los estudios

Adaptado de González de Vallejo et al. (2002): «Ingeniería Geológica». **DATOS DEL TRAZADO** Madrid: Pearson Educación. La investigación debe ir acorde a los objetivos y alcance de las diversas fases del provecto **ESTUDIOS GEOLÓGICOS DATOS GEOLÓGICOS REGIONALES Y LOCALES CONDICIONES CONDICIONES GEOLÓGICAS HIDROGEOLÓGICAS MODELO GEOLÓGICO ESTUDIOS PRINCIPALMENTE** INVESTIGACIÓN GEOMECÁNICA **MEDIDAS HIDROGEOLÓGICAS TENSIONES IN SITU** GEOTÉCNICOS PARÁMETROS DE DISEÑO SECTORIZACIÓN GEOMECÁNICA **GEOMECÁNICO ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y PRESIONES SOBRE LA EXCAVACIÓN DEFORMABILIDAD** RECOMENDACIONES DE PROYECTO





## Los estudios a lo largo de las etapas del proyecto

## DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN EN LAS DIVERSAS FASES DEL PROYECTO

Establecimiento de la viabilidad y adquisición de conocimiento sobre la característica del emplazamiento.

Quiralte López (1998): En López Jimeno (Ed). Ingeotúneles I.

Adaptado de González
de Vallejo et al. (2002):
«Ingeniería Geológica».
Madrid: Pearson
Educación.

de Vallejo et al. (2002): «Ingeniería Geológica».	FASE		CONTENIDOS			
Madrid: Pearson Educación.	ESTUDIOS PREVIO	S	Análisis bibliográfico	Topografía, Hidrogeología e hidrología, mapas geológicos, relación de túneles e indicios mineros próximos, sismicidad.		
Reconocimiento geológico general, identificación de riesgos geológicos, clasificación básica geológico/ geotécnica, planificación de los estudios en la fase siguiente, análisis de alternativas.			Fotointerpretación	Análisis de fotogramas, técnicas especiales en zonas con vegetación, teledetección.		
			Reconocimientos geológicos	Geomorfología, estabilidad de laderas, litologías, estructuras tectónicas, cotejo de datos hidrogeológicos.		
			Investigación in situ	Geofísica, sondeos.		
ANTEPROYECTO Y PROYECTO			Interpretación Geológico- Geotécnica	Cartografía y cortes geológicos (E: 1:10000 - 1:2000).		
		Cartografía geológica	Estratigrafía, estructura, estaciones geomecánicas, geomorfología, Cartografía (1:2000-1:500).			
	Selección de trazado y emboquilles, estudio		Hidrogeología e hidrología	Datos regionales y locales, estimación de caudales y presiones.		
detallado, problemas e incidencia en la excavación, características geomecánicas de los materiales, aplicación de los criterios al diseño,			Investigaciones geotécnicas	Ensayos de laboratorio, geofísica, calicatas, sondeos, ensayos in situ.		
recomendaciones para soste tratamientos.	nimiento, excavación y		Interpretación Geológico- Geotécnica	Propiedades y clasificaciones geomecánicas, recomendaciones de excavación, sostenimiento y tratamientos del terreno.		
		Control geológico-geotécnico	Cartografía del interior del túnel, sondeos en avance (galería de piloto de exploración, geofísica, ensayos).			
	EJECUCIÓN		Auscultación			
Control geológico-geotécnico			Control de calidad			
adecuación del proyecto a las en el terreno, control de ines y tratamiento del terreno.	s condiciones existentes		Asistencia técnica	Control de ejecución, soluciones particulares constructivas y de tratamiento del terreno.		