# Geotecnia y Prospección Geofísica

## Tema 9. Métodos de prospección geofísica de detalle

**Jorge Cañizal Berini**
**Gema Fernández Maroto**
**Marina Miranda Manzanares**

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

# ÍNDICE

**9.1.** Métodos eléctricos.

**9.2.** Métodos electromagnéticos.

**9.3.** Métodos sísmicos.

**9.4.** Testificación geofísica.

# MÉTODOS ELÉCTRICOS

# MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

- Los métodos eléctricos aplicados en prospección geofísica, se basan en el estudio de campos de potencial eléctrico:
  1. Los campos eléctricos naturales existentes en la corteza terrestre, clasificados como **métodos pasivos de prospección geofísica**.
  2. Los artificialmente provocados, clasificados como **método activos**.

- En el primero se miden los **potenciales eléctricos espontáneos** existentes en el subsuelo producto de corrientes naturales provocadas por reacciones electroquímicas, gradientes de temperatura o fenómenos relacionados al movimiento de aguas subterráneas.

- El segundo, tipo **método activo**, consiste en **inyectar corriente en el subsuelo** y medir luego la respuesta de éste a ese estímulo externo que estará condicionado por las propiedades geoeléctricas de las rocas investigadas.

# MÉTODOS ELÉCTRICOS

- Los **métodos geoeléctricos** se basan en la **conductividad** o la **resistividad eléctrica** de las rocas.
- Los **sulfuros** son de alta conductividad/baja resistividad eléctrica.
- Las **micas** son de conductividad muy baja.
- Las **rocas porosas** saturadas con agua son de alta conductividad.
- Las **mediciones** se realizan con **configuraciones de electrodos**.
- En los **métodos activos como en la polarización inducida** se generan una corriente eléctrica y se detecta la repuesta de las rocas a esta corriente penetrante por medio de otros electrodos. Su alcance con respecto a la profundidad depende de la longitud de la configuración.
- Los **métodos eléctricos** son útiles para determinar la **potencia de estratos** de una secuencia de **rocas sedimentarias +/– horizontales**.
- Se aplican en la **búsqueda de acuíferos**.

# MÉTODOS ELÉCTRICOS

- Los métodos eléctricos activos, tienen como ventaja frente a los **gravimétricos** y **magnéticos**, que pueden **controlar la profundidad de penetración en el terreno**.

- En alguna de las modalidades se llega a hacer de un modo bastante concreto, como es el caso del método de resistividades donde los **sondeos eléctricos obtienen resultados comparables con los sondeos mecánicos**.

- Desde el punto de vista económico la principal ventaja es el **reducido coste**, tanto en aparatos como en trabajo de campo. Se pueden cubrir **grandes extensiones de terreno** en un tiempo relativamente reducido y por un costo muy bajo.

# MÉTODOS ELÉCTRICOS

- **Aplicaciones principales:**
  - **Minería**.
  - **Aguas subterráneas**.
  - **Ingeniería Civil**.
  - **Prospecciones petrolíferas**.

- El principio básico para la utilización de estos métodos en prospección geofísica, es la medida del comportamiento de las rocas, sedimentos y concentraciones minerales al paso de una corriente eléctrica.

# LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS ASOCIADAS CON LAS ROCAS

- Los **métodos eléctricos** se basan en tres fenómenos y propiedades asociadas con rocas:
  1. La **resistividad** o el recíproco de la **conductividad, con la que se determina la "cantidad" de corriente** que pasa por una roca al aplicar una diferencia potencial específica.
  2. La **actividad electroquímica** causada por los **electrolitos**, que circulan en el subsuelo.
  3. La **constante dieléctrica**, que indica la capacidad del material rocoso de **guardar carga eléctrica**, determinando parcialmente la repuesta de formaciones rocosas a las corrientes alternas de alta frecuencia introducida en el subsuelo.

# PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS: RESISTIVIDAD

- **La Ley de Ohm** establece que *"la caída de potencial entre dos puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I, es proporcional a esta y a la resistencia que ofrece el medio al paso de la corriente"*.

$$\Delta V = I \times R$$

**ΔV** = caída de potencial.

**I** = intensidad de la corriente que circula entre dos puntos.

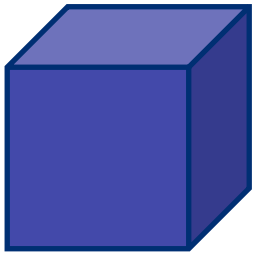
**R** = resistencia que ofrece el medio al paso de la corriente.

# PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS: RESISTIVIDAD

## RESISTIVIDAD

- **RESISTIVIDAD:** $\rho$ resistencia en Ohmios medida entre dos caras opuestas de un cubo de materia con dimensiones unitarias.

$$\rho = R\frac{S}{l}$$



Donde $R$ es la resistencia en Ohms, $S$ la sección transversal en $m^2$ y $l$ la longitud en **m**.

- La resistencia depende de la naturaleza y geometría del cuerpo conductor.
- Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica: **un valor alto de resistividad** indica que el material es **mal conductor** mientras que **un valor bajo** indica que es un **buen conductor**.

# RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

- $\rho$ : representa la naturaleza conductora o no conductora de un materia, se denomina RESISTIVIDAD. En prospección geofísica es la resistividad de los materiales del subsuelo (suelo, rocas, sedimentos, concentraciones de minerales, agua…).

$$\Delta V = I \times R \qquad \rho = R\frac{S}{l}$$

Sustituyendo **R**:

$$\Delta V = I \cdot \frac{\rho \cdot L}{S}$$

- La resistividad es una propiedad inversa a la conductividad eléctrica y generalmente se expresa en ohm por metro (Ω.m).

# RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

- Las formaciones rocosas tienen diferentes comportamientos al paso de la electricidad. Así, la resistividad en **arenas** puede variar mucho, dependiendo fundamentalmente de la **cantidad de agua** que contienen y la calidad de la misma.

- Entre una **arena con agua y una arcilla hay diferencias considerables de resistividad**, lo que permite detectar con cierta claridad una formación acuífera arenoso situada entre capas de arcilla.

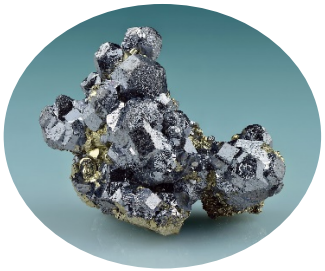
- La mayoría de las rocas, por sus componentes minerales, **serían aislantes** (como lo son las rocas ígneas), con excepción de aquellas compuestas principalmente por semiconductores cuya proporción en la corteza es muy baja.

- Normalmente, si el terreno es un **conductor moderado**, se debe a que las rocas que lo constituyen son porosas con poros parcial o totalmente ocupados por electrolitos, comportándose como conductores iónicos de resistividad muy variable.

# RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

- La aplicación de los métodos de prospección eléctrica es posible siempre que haya contrastes en las resistividades de los materiales geológicos medidos, a los que se les ha aplicado la inyección de corrientes continuas.

- En minerales, la resistividad varía de $10^{-8}$ en los metales nativos a $10^{15}$ en micas (medido perpendicularmente a su exfoliación). Minerales que presentan **alta conductividad y baja resistividad son:**
  - Calcopirita.
  - Pirita.
  - Magnetita.
  - Galena.
  - Pirrotina.



- Por su parte el grafito también presenta alta conductividad eléctrica, pero de forma general la mayoría de los minerales no metálicos, así como las rocas, tienen resistividades mayores, en general entre 2 y 6 órdenes de magnitud superiores.

# RESISTIVIDAD DE MATERIALES NATURALES

- La resistividad en las rocas está determinada por el agua existente en los poros, más que por su composición mineralógica. Además, influye la salinidad del agua: más salinidad, más conductividad.

- Por eso, la resistividad de cada tipo de roca presenta una gran variabilidad. En medidas de campo, los valores de resistividad de las rocas varían así:
  - Rocas ígneas y metamórficas inalteradas: > 1000 Ω.m
  - Rocas ígneas y metamórficas alteradas o fuertemente diaclasadas: 100 a 1000 Ω.m
  - Calizas y areniscas: 100 a más de 1000 Ω.m
  - Arcillas: 1 a 10 Ω.m
  - Limos: 10 a 100 Ω.m
  - Arenas: 100 a 1000 Ω.m
  - Gravas: 200 a más de 1000 Ω.m

# CONDUCTIVIDAD

- Se denomina **Conductividad** al valor inverso de la resistividad.

- Se distinguen en los minerales y rocas **dos clases** de conductividad:
  - **Metálica o electrónica:** aquella que poseen ciertos minerales que conducen la electricidad como los llamados metálicos y que se verifica por el transporte de electrones: *Mispiquel, Galena, Magnetita, Pirolusita*. Esta conductividad puede desaparecer en estos minerales por la interposición de una ganga aislante como el cuarzo.
  - **Electrolítica:** minerales y rocas aislantes en estado de sequedad como las arenas cuarzosas o las areniscas, pero que conducen la corriente en función del agua que contienen. En este caso existe transporte de iones al paso de la corriente y **la conductividad es función de la cantidad de agua y de la cantidad de sales ionizadas disuelta en ella**.

# ACTIVIDAD ELECTROQUÍMICA

- La actividad electroquímica, depende de la **composición química de las rocas**, especialmente de la composición y concentración de los **electrolitos** que contengan.

- Se denomina ***Constante dieléctrica*** al valor que expresa la manera de polarizarse un material cuando es sometido a un campo eléctrico.

# EFECTOS DEL AGUA DE IMPREGNACIÓN DE LAS ROCAS

- Las soluciones acuosas salinas son conductores electrolíticos naturales.
- El **agua pura** y la **sal seca** son extremadamente **pobres conductores** en su estado natural.
- Las **rocas secas son muy poco conductoras** de la electricidad. Sin embargo, el grafito y la mayoría de sulfuros sí lo son.
- **Factores que influyen en la conductividad de las rocas:**
  - La porosidad.
  - Disposición geométrica de los poros.
  - Proporción de poros rellenos de agua.
  - Resistividad del agua que contienen los poros.
- **El agua pura es muy poco conductora**.

# CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS

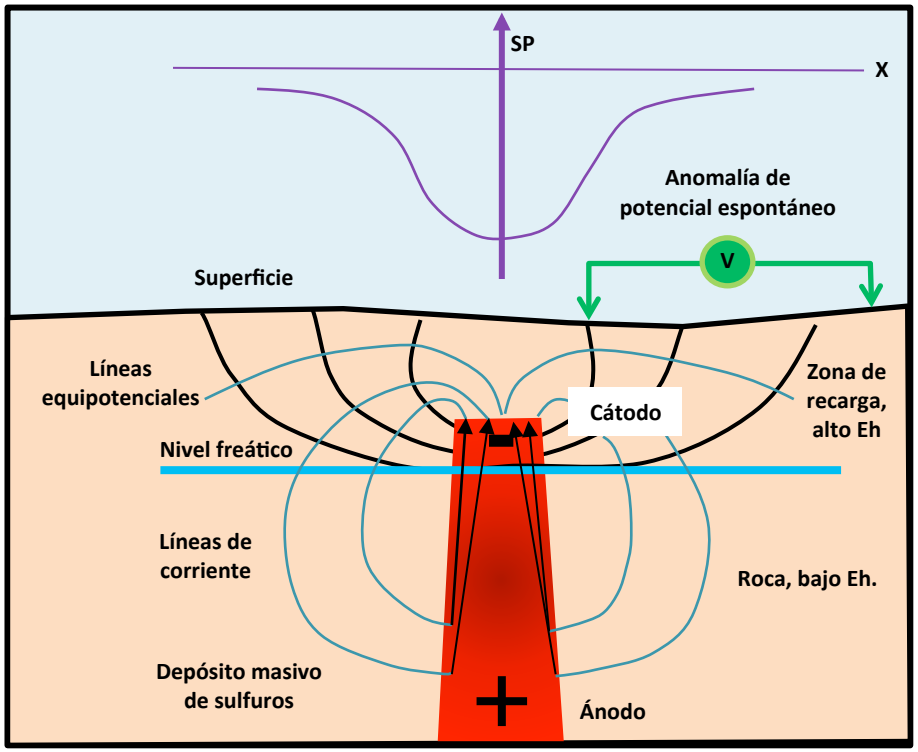
- **Los métodos eléctricos se clasifican en tres grandes grupos principales:**
  - Métodos de polarización espontánea o autopotencial.
  - Métodos de potencial.
  - Métodos electromagnéticos.

# MÉTODO DE POLARIZACIÓN ESPONTÁNEA O AUTOPOTENCIAL

- Este método mide campos potenciales originados por el propio yacimiento, debido a un fenómeno de polarización electroquímica originada por el ataque de la **montera del mineral por las aguas subterráneas**.

- La polarización espontánea se produce como consecuencia de las **acciones químicas y efectos de contacto que se producen entre dos cuerpos o terrenos de distinta naturaleza y resistividad diferente**.

- Método empleado principalmente en sulfuros.



# MÉTODO DE POLARIZACIÓN ESPONTÁNEA O AUTOPOTENCIAL

- La aparición de estas **anomalías eléctricas** puede deberse a distintos fenómenos físicos:
  1. La existencia de **menas metálicas** en el subsuelo (efecto electroquímico).
  2. La existencia de **anomalías térmicas** (efecto termoeléctrico).
  3. La **circulación de fluidos**, como agua cargada de minerales disueltos a través de los poros y fisuras del terreno (efecto electrocinético).

# LOS MÉTODOS DE POTENCIAL

- También denominados **Métodos Conductivos**, son métodos en los que los electrodos que se emplean para enviar corriente al terreno (electrodos de corriente) así como los que sirven para determinar las variaciones en el campo de potencial originado (electrodos de medida), se establecen en **contacto directo con el terreno**.

- **Los métodos de potencial** consisten en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos (A y B), para determinar, mediante otro par de electrodo (M y N) la diferencia de potencial resultante.

# LOS MÉTODOS DE POTENCIAL

- **La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de:**
  - La **distribución de resistividades en el subsuelo**.
  - La presencia de **minerales polarizables**.
  - Las **distancias entre los electrodos**.
  - La **corriente inyectada**.
- Se utiliza corriente continua para evitar problemas de inducción y capacidad.
- **Métodos de este tipo son:**
  - Tomografía eléctrica.
  - SEVs (sondeos eléctricos verticales).
  - Calicatas eléctricas.

# LOS MÉTODOS DE POTENCIAL

- **Comprenden las modalidades:**
  - Métodos de **líneas y perfiles equipotenciales**.
  - Métodos de **resistividades**.

# MÉTODO DE LAS LÍNEAS EQUIPOTENCIALES

- Las líneas equipotenciales, son la representación del potencial eléctrico a modo de isolíneas de valores de este parámetro.

- El método de líneas equipotenciales estudia el trazado de estas líneas sobre la superficie del terreno.

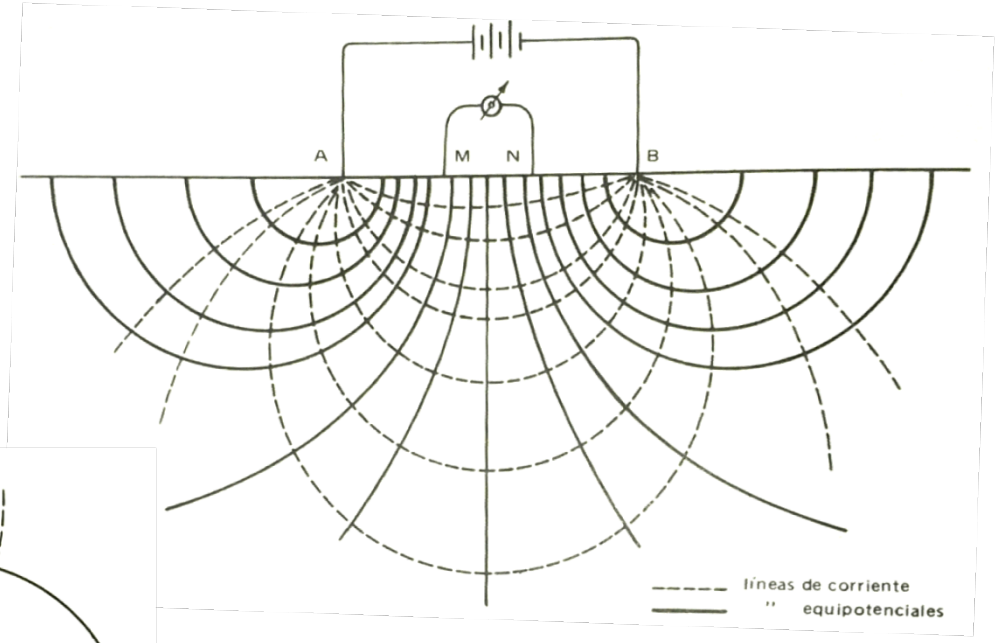
- **Desventajas de este método:** gran sensibilidad a la topografía, baja penetración en el terreno y dificultad en el cálculo de profundidades.

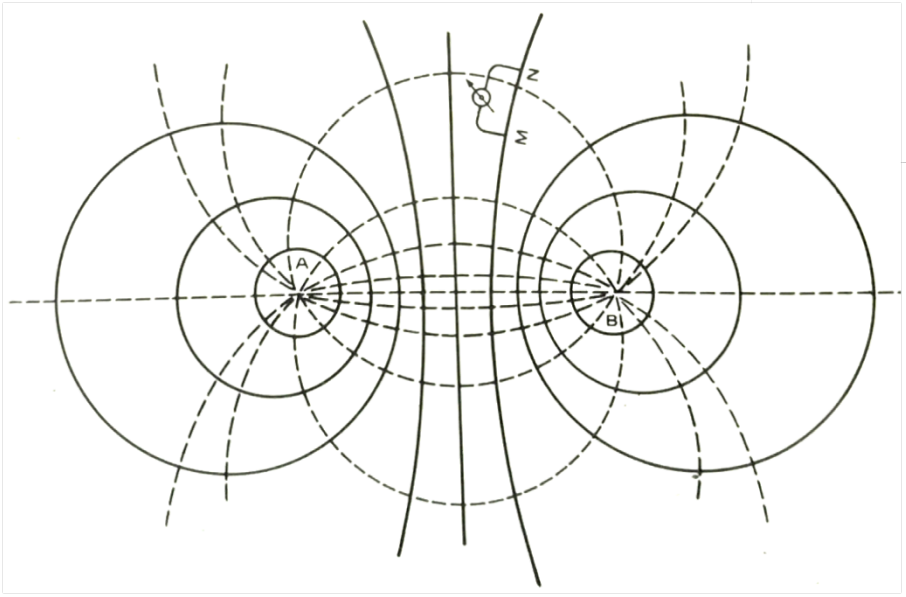
- **Trazado de las líneas del campo eléctrico:** las líneas de campo eléctrico son líneas perpendiculares a las líneas equipotenciales y a la superficie de los electrodos.

# LOS MÉTODOS DE POTENCIAL

## MÉTODO DE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES

- Hay que introducir un **campo artificial de corriente en el terreno**.




- Se puede utilizar corriente alterna o continua y los **electrodos se ponen en contacto con el suelo**, creando así un campo eléctrico.

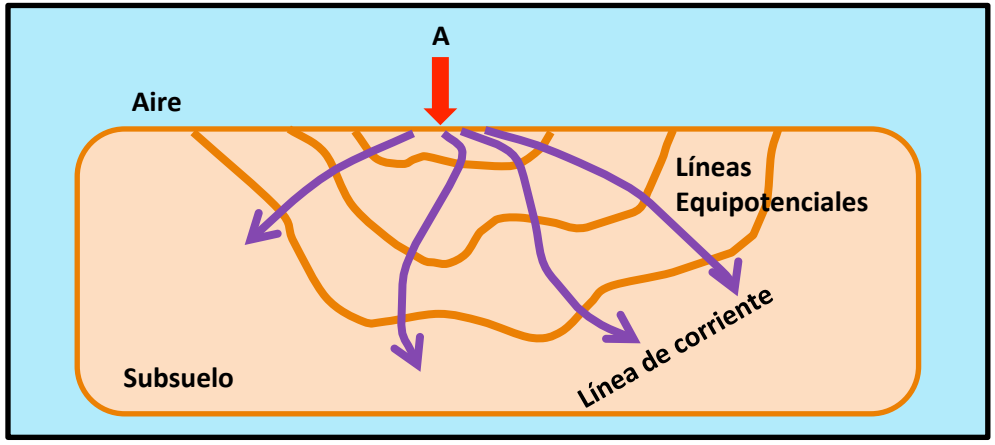
# LOS MÉTODOS DE POTENCIAL

## MÉTODO DE LÍNEAS EQUIPOTENCIALES

- **Modo de operar:**
  - Consiste en **clavar dos electrodos A y B unidos a un circuito de pilas o generador de corriente** con lo que se creará un **campo eléctrico**.
  - El circuito de medida comprende otros dos **electrodos M y N** unidos a un potenciómetro y un galvanómetro con objeto de medir diferencias de potencial de diversos puntos.
  - Con el potenciómetro se miden milivoltios y está combinado con un galvanómetro de forma que permita la medición de **ΔV** y la intensidad **I**.
  - **El electrodo M queda fijo y el N se va clavando en sucesivos puntos del suelo** hasta que el galvanómetro queda en cero y entonces el potencial en ambos será el mismo.
  - Así se mide una **línea equipotencial en el terreno**, pasando a medir otra a la distancia convenida.

# FLUJO ELÉCTRICO EN MEDIO NATURAL

- Los materiales del subsuelo no son isótropos ni homogéneos, por lo que las superficies equipotenciales y las líneas de corriente no son regulares y rectas. La resistividad obtenida, corresponderá a una integración de los valores medios, en los que inciden la anisotropía y la heterogeneidad del terreno y la posición relativa de los electrodos. A esta resistividad se la denomina **Resistividad aparente** ($\rho_a$).

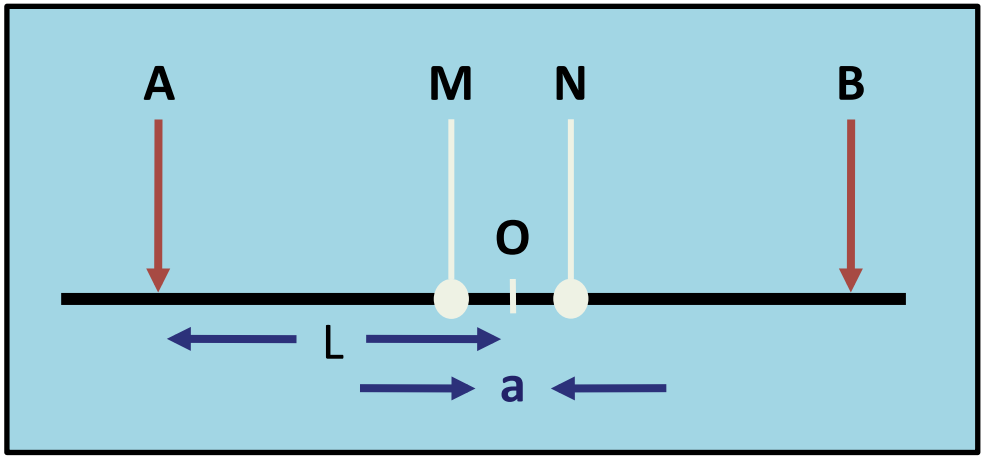



Distribución teórica en el terreno de las líneas equipotenciales y las líneas de corriente (modificado de: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGeoelec.pdf).

- En la práctica, lo que se mide es la resistividad aparente para lo cual se emplean dos tipos de dispositivos (**lineales** y **dipolares**).

# DISPOSITIVO SCHLUMBERGER

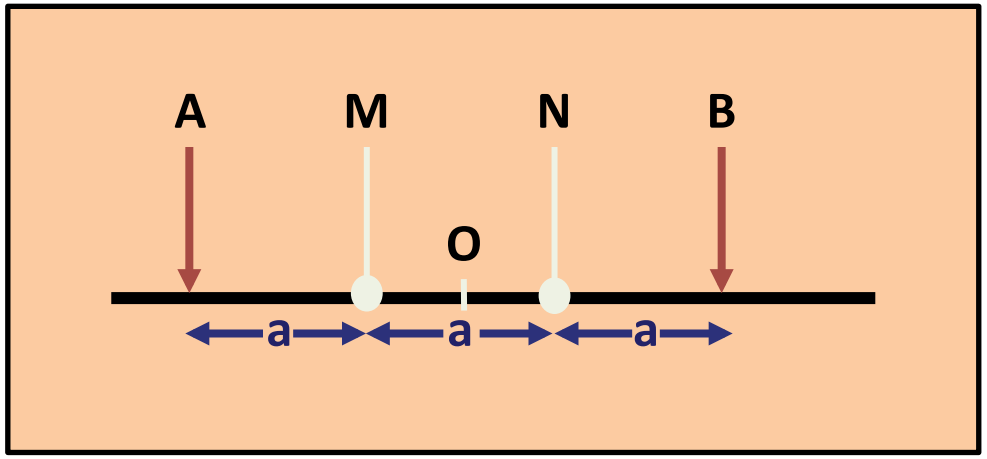
- **Configuración Schlumberger:**
  - Dispositivo simétrico que cumple que la distancia que separa a **AB** es mayor o igual que 5 veces la distancia **MN**.




  - Los valores de resistividad aparente se representan en función de AB/2.

# DISPOSITIVO SCHLUMBERGER

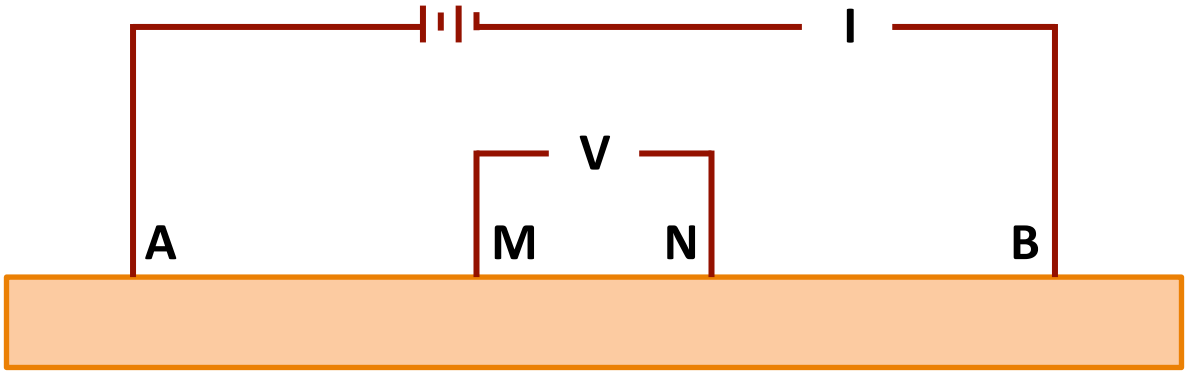
- **Configuración Wenner**:
  - Dispositivo simétrico en el que los elementos se mantienen equiespaciados.



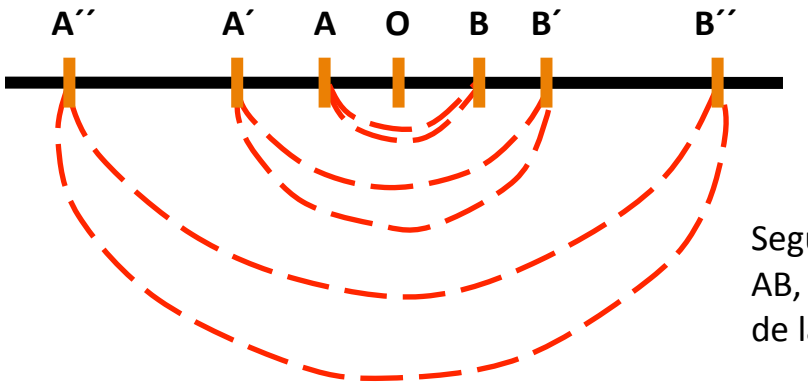
# SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV)

- Los SEV, consisten en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente. Estas mediciones, se realizan con dispositivos de electrodos dispuestos linealmente y una separación progresiva y creciente entre los electrodos de emisión y recepción.

- Para su realización se considera el dispositivo Schlumberger.



# FUNCIONAMIENTO DE LOS SEV




Según aumenta la distancia AB, aumenta la profundidad de la investigación.

- Un SEV consiste en mantener un punto central (**O**) fijo, e ir abriendo la distancia **A** y **B** (**A´- B´**; **A´´- B´´**), de manera que la corriente profundiza progresivamente más, obteniendo así valores de resistividad aparente que son respuestas de paso de la corriente cada vez a mayor profundidad. A partir de mediciones realizadas en la superficie, los SEV consiguen obtener un **modelo de variación de resistividad** aparente en **función de la profundidad**.
- Según crece la distancia AB, la profundidad alcanzada por la corriente aumenta.
- Para generar y registrar un SEV se requiere:
  - **Circuito de emisión integrado**.
  - **Circuito de recepción**.

# FUNCIONAMIENTO DE LOS SEV

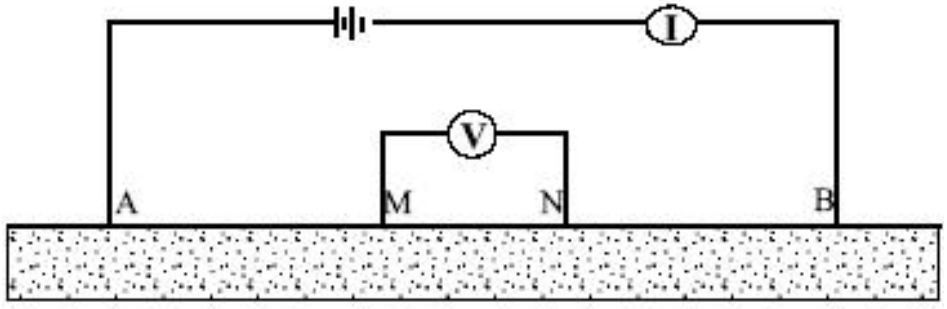
- **Circuito de emisión integrado por:**
  - Una fuente de energía.
  - Un amperímetro para medir la intensidad de la corriente.
  - Puntos de emisión (A y B) consistentes en clavos metálicos de 0.5 a 1 m de largo y 20 mm de diámetro y cables de transmisión.
  - En sondeos normales se utiliza una batería de 12 voltios en serie con un convertidor de unos 250 W de potencia.
  - El amperímetro permite registrar hasta 10 A, con una precisión del 1% y resolución de 0.1 mA.
  - El cable de transmisión tiene una sección de 1 $mm^2$ y para transportarlo y extenderlo se arrolla a un carrete de unos 500 m de capacidad.

- **Circuito de recepción compuesto por:**
  - Un milivotímetro electrónico de alta impedancia.
  - Dos electrodos para la medición del potencial (M y N) impolarizables constituidos por vasos con fondo poroso que contienen una solución saturada de sulfato de cobre, en los que se sumerge una varilla de cobre que está conectada al cable de medición del circuito.

# TRABAJO DE CAMPO

- El equipo que requiere la realización de un SEV normal (distancia entre A y B de 250 a 2.500 m) es 1 operador y 3 a 4 ayudantes para mover los electrodos.
- Se pueden realizar de 3 a 6 SEV por día, en función de la longitud final, la distancia entre uno y otro y las características topográficas.
- Primero hay que situar el sondeo, colocar la dirección de las alas e instalar el instrumental de medición en el centro.
- Para ello, se colocan los 4 electrodos (A M N B) de acuerdo al dispositivo a utilizar.
- Se compensa el potencial natural del terreno.
- Se inyecta una corriente continua de intensidad I en mA (electrodos AB) y se lee la diferencia de potencial $\Delta V$ en mV (electrodos MN).
- Los valores se vuelcan en una tabla y se calcula la resistividad aparente (a en $\Omega$.m).
- La finalidad del SEV es establecer la distribución vertical de la resistividad debajo del sondeo, tomando como base la curva de resistividad aparente (CRA).

# SEV




Dispositivo eléctrico tipo Schlumberger.

Esquema general del dispositivo Schlumberger.

# EQUIPO

- Resistivímetro.
- Baterías.
- Electrodos.

https://www.monitoriza-panama.com/sondeos-electricos-verticales-darien/

# CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE

- Las **distancias** a las que se sitúan los electrodos son función del objetivo de la investigación.
- En una investigación en la que se necesite alcanzar una profundidad de 150 m, AB/2 puede empezar siendo igual a 2 m y alcanzar los 300 m, realizando unas 15 a 25 medidas de resistividad.
- Los resultados se representan en un gráfico logarítmico donde las distancia AB/2 se encuentra en abscisas y en ordenadas los valores de resistividad aparente en cada punto.
- Estas curvas de resistividades son las que se interpretan para conocer los espesores y las formaciones geológicas de la zona donde se ha llevado a cabo el SEV.

# SEV

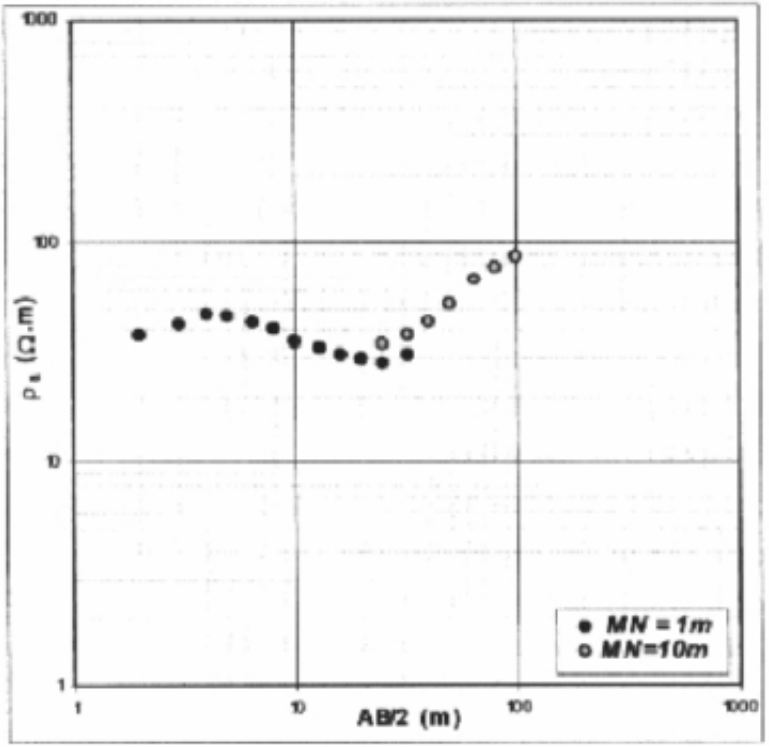
Tabla III

VARIABLES PARA EL CALCULO DE $\rho_a$

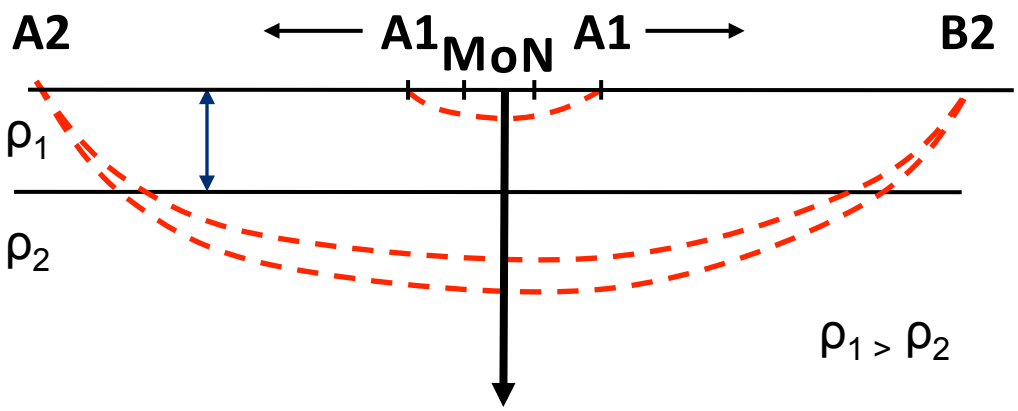
| AB/2 (m) | MN (m) | I (mA) | Δv (mV) | $\rho_a$ (Ω.m) |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 1 | 4,2 | 13,5 | 37,9 |
| 3 | 1 | 8,1 | 12,4 | 42,1 |
| 4 | 1 | 6,3 | 5,9 | 46,3 |
| 5 | 1 | 16,6 | 9,8 | 45,9 |
| 6,5 | 1 | 30,3 | 9,8 | 42,7 |
| 8 | 1 | 35,5 | 7,1 | 40,1 |
| 10 | 1 | 50,8 | 5,7 | 35,2 |
| 13 | 1 | 115 | 7,2 | 33,2 |
| 16 | 1 | 149 | 5,7 | 30,7 |
| 20 | 1 | 136 | 3,2 | 29,5 |
| 25 | 1/10 | 185/60 | 2,7/11 | 28,7/34,6 |
| 32 | 1/10 | 176/69 | 1,7/8,3 | 31,1/37,7 |
| 40 | 10 | 142 | 12,2 | 42,5 |
| 50 | 10 | 111 | 7,4 | 51,8 |
| 65 | 10 | 156 | 7,9 | 66,8 |
| 80 | 10 | 187 | 7,1 | 76,0 |
| 100 | 10 | 199 | 5,4 | 85,0 |

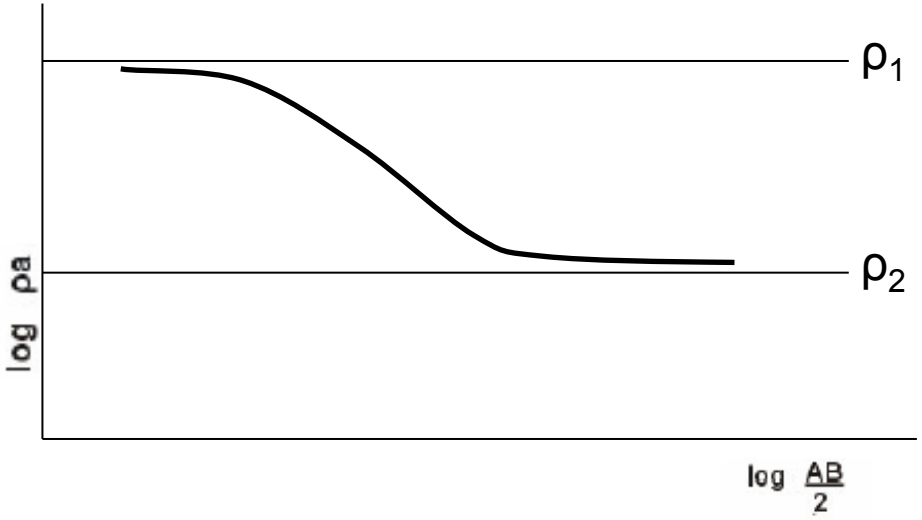
Figura 14

VARIACIÓN DE $\rho_a$ EN FUNCIÓN DE AB/2



# DISPOSICIÓN DE UN SEV Y REPRESENTACIÓN DE LOS REGISTROS




- Separación inicial AB corta.
- Sólo circula por la capa $\rho_1$ y espesor h.
- Al incrementar la distancia A2-B2, la corriente va a circular por las capas de resistividades $\rho_1$ y $\rho_2$.

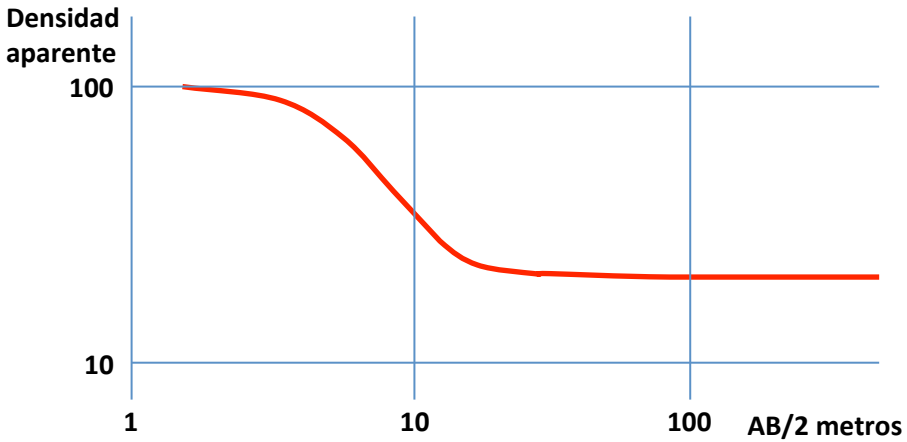
- Relación logarítmica entre la resistividad aparente (eje y) y AB/” (eje x), apreciándose una disminución de la resistividad en profundidad.

# CORTES GEOLÉCTRICOS

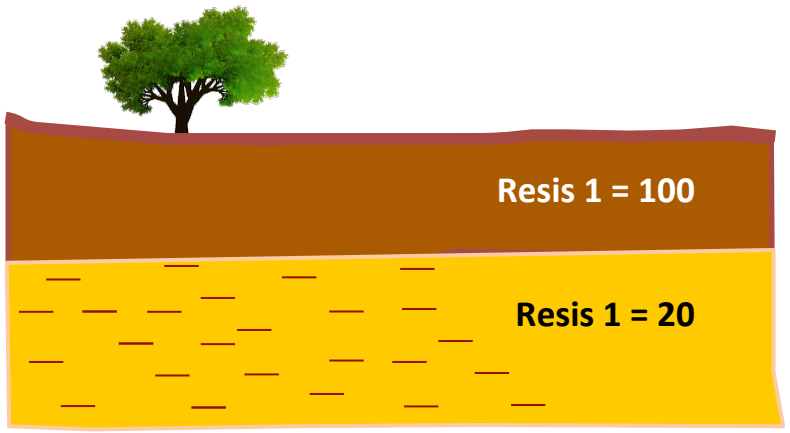
## CORTES DE DOS CAPAS

- Con los SEV se pueden identificar capas del subsuelo.

- Por ejemplo: cortes de dos capas.
- Conociendo que las arenas presentan una resistividad aparente de 100 Ω.m y los limos de 20 Ω.m.
- Se obtiene:
  - **1°** Resistividades de 100 Ω.m.
  - **2°** Resistividades de 96 Ω.m.
  - **3°** Según aumenta la distancia A-B, la resistividad llega a 20 Ω.m.

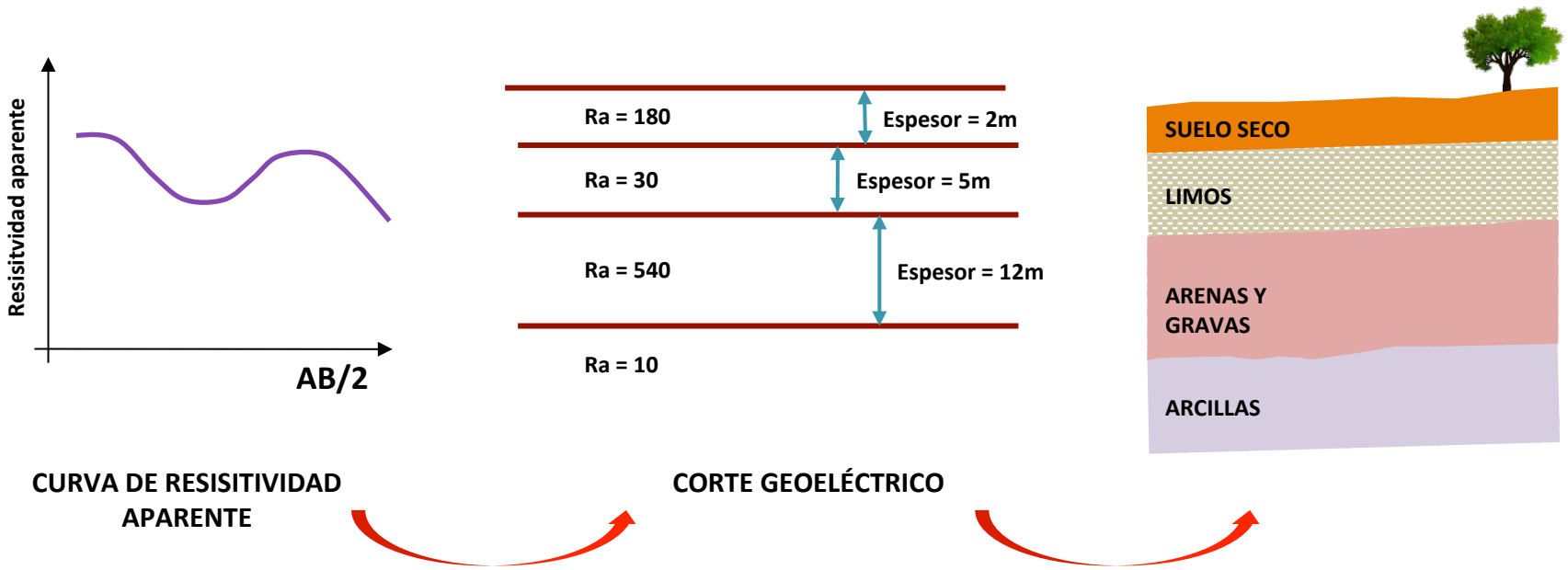



Se obtiene un corte geológico:



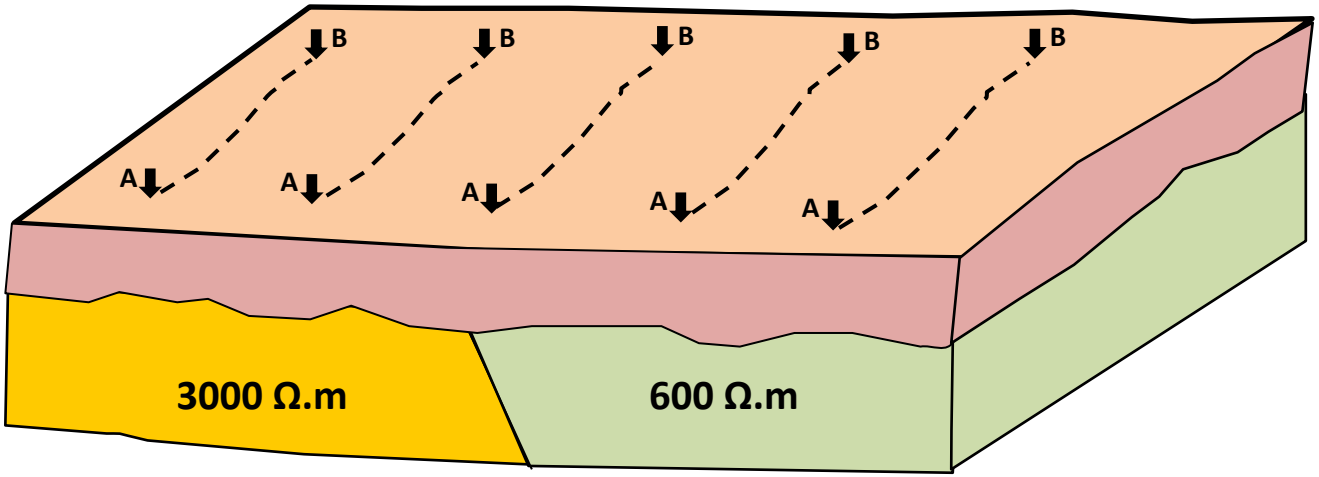
# INTERPRETACIÓN DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE

- **Primera fase:** obtención a partir de la curva de resistividades superpuesta a gráficos patrón o mediante software, de lo que sería un **corte geoeléctrico**.
- **Segunda fase:** pasar el corte geoléctrico a un **corte geológico**. Para ello, previamente hay que conocer el comportamiento de las litologías de la zona de estudio para conocer la equivalencia entre litología y resistividades.



# CALICATAS ELÉCTRICAS

- En las calicatas eléctricas, se mantiene la apertura AB y se desplaza lateralmente todo el dispositivo, de manera que la profundidad de la investigación es siempre la misma por lo que se obtienen las variaciones laterales del terreno.




Esquema de una calicata eléctrica.

# APLICACIONES DE LOS ME

- Litología.
- Cambios horizontales asociados a fallas o fracturas.
- Acuíferos.
- Capas conductoras para diseño de tierras físicas.
- Anomalías asociadas a cavernas u oquedades.
- Polarización de materiales.

# VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS SEV

- **Entre las ventajas destacan:**
  - Equipo sencillo.
  - Menores tiempos de adquisición y procesamiento.
  - Menores tiempos de proceso.
  - Más económico.

- **Entre las limitaciones:**
  - No es aplicable a todos los suelos indistintamente.
  - Los resultados no siempre coinciden con la estratigrafía del subsuelo.
  - No se puede corregir los efectos de la topografía.

# VENTAJAS DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

- Buena resolución horizontal y vertical.
- Permite la corrección topográfica.
- Mayor cobertura areal.
- Imagen fácilmente interpretable.
- Permite realizar el levantamiento de resistividades aún en suelos de geología compleja.
- Entre las limitaciones, se encuentra que requieren equipos más sofisticados, con un software más especializado y costoso.
- Mayor tiempo de adquisición y procesamiento.

http://sg.cier.org.uy/

# MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

# MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

- Los **métodos electromagnéticos, también llamados** *métodos eléctricos en corriente alterna,* estudian el subsuelo a través de los cambios en las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales que lo componen.

- **Se dividen en:**
  - **Electromagnéticos ligeros**.
  - **Electromagnéticos profundos**.

Prospección electromagnética.

# MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

- **Métodos electromagnéticos ligeros:**
  - Emplean aparatos relativamente sencillos que permiten realizar **calicatas electromagnéticas de zonas grandes en relativamente poco tiempo**.
  - Proporcionan información **en planta de conductividad eléctrica** que permite definir **cambios laterales de materiales** hasta unas pocas decenas de metros de profundidad. Se aplican principalmente en arqueología y **geotecnia**.

- **Métodos electromagnéticos profundos:**
  - **Se clasifican a su vez en el dominio del tiempo o en el de frecuencias**.
  - **Emplean bucles o dipolos de gran tamaño junto con antenas receptoras de campo magnético**.
  - Pueden utilizarse en estudios geológicos profundos, en **hidrogeología y en minería metálica**.

# MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

## VENTAJAS

- Son **métodos de gran versatilidad**.
- Toman datos a **gran velocidad**, permitiendo el reconocimiento de **extensas áreas de terreno** en un corto espacio de tiempo.
- No precisan electrodos, por lo que **no necesitan contacto físico con el terreno**. Se pueden aplicar utilizando barco o avión.

# MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

## CLASIFICACIÓN

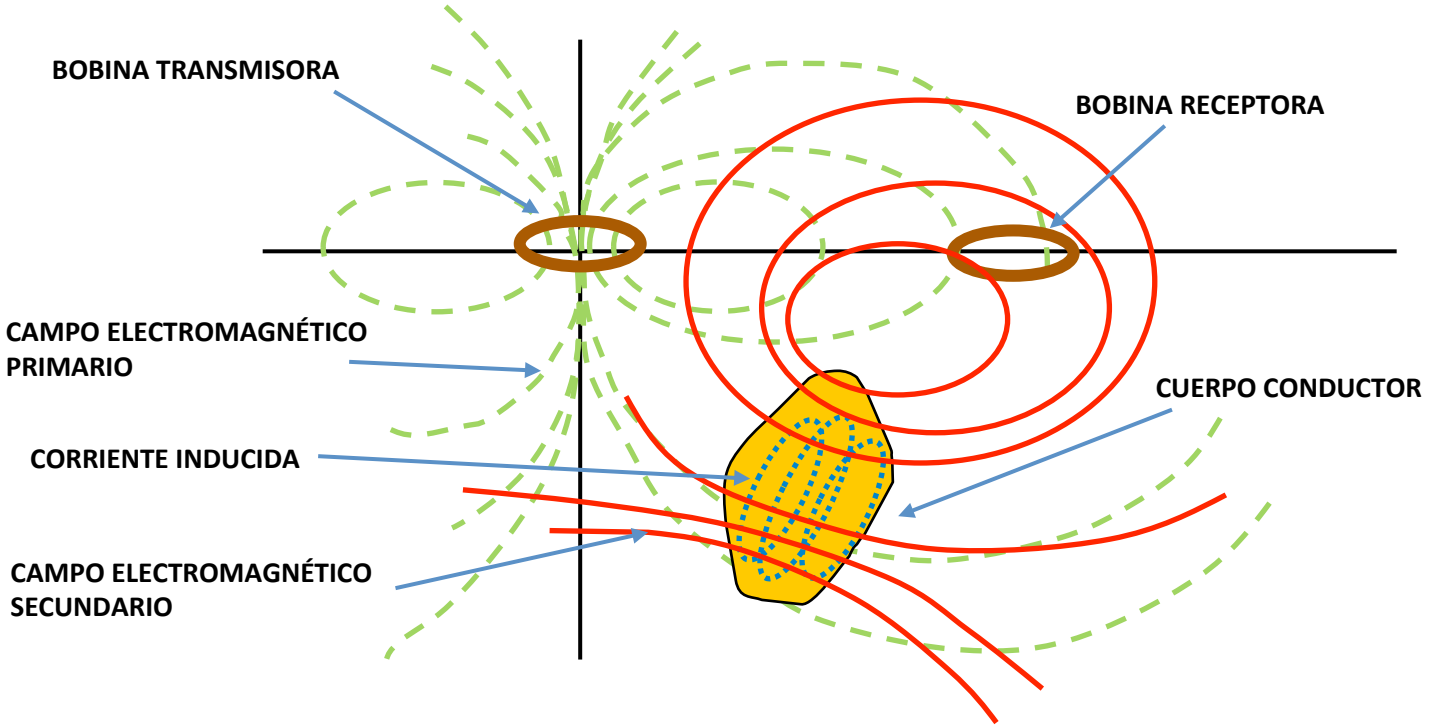
- **Pueden ser:**
  - **Método electromagnético en el dominio de frecuencias (FDEM).**
  - **Método electromagnético en dominio de tiempo (TDEM).**

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS (FEDM)

- Este método se caracteriza porque la **profundidad de investigación** es función de la **frecuencia**.
- El objetivo de este método es medir la **conductividad eléctrica del terreno**.
- Este método necesita un **transmisor** y un **receptor** de ondas electromagnéticas, que sean móviles.
- **Transmisor:** bobina por la que circula una corriente alterna sinusoidal de frecuencia f (Hertz). A través de ella, se genera un campo electromagnético primario H. Este campo, se propagará tanto por la superficie como en profundidad.
- **Composición del campo electromagnético:** está formado por una componente magnética y otra eléctrica perpendiculares entre si y a la dirección de propagación de la onda.

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS (FEDM)

- Cuando existe en el terreno un **cuerpo conductor**, la **componente magnética del campo primario provoca** la aparición de unas corrientes inducidas, estas generan un **campo magnético secundario** *H´*, que es medido por la bobina receptora.



# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS (FEDM)

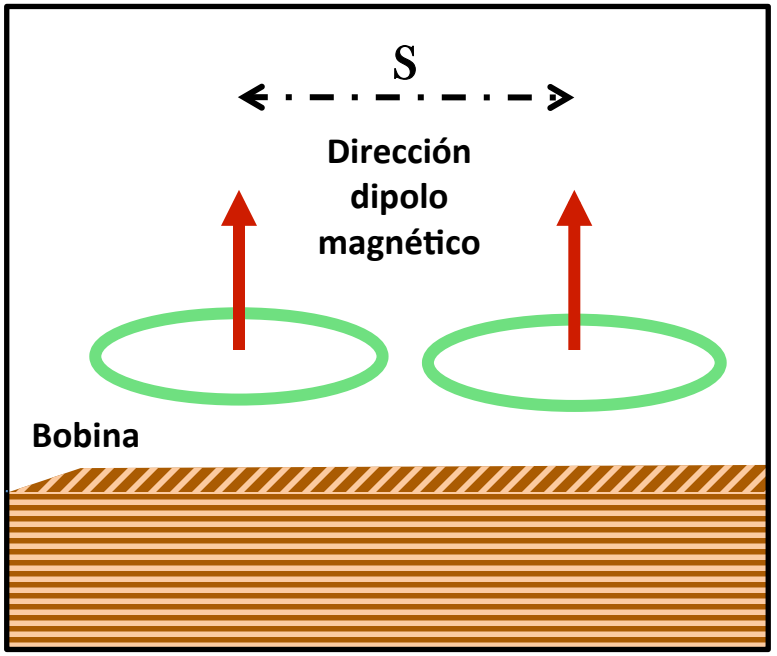
- El **campo resultante**, difiere tanto en fase como en amplitud con respecto al campo primario, lo que **proporciona información acerca del tamaño y conductividad eléctrica del cuerpo conductor**.

- **Funcionamiento y profundidad de investigación:** la conductividad del terreno puede ser medida de dos formas, dependiendo de la orientación de las bobinas con respecto a la superficie:
  - **Modo dipolo vertical**.
  - **Modo dipolo horizontal**.

- El modo dipolo vertical (fig. 22) consiste en disponer horizontalmente con respecto a la superficie del terreno, tanto la **bobina transmisora como la receptora** (el momento del dipolo magnético será vertical), mientras que para el dipolo horizontal (fig. 23) dispondremos **ambas bobinas de forma vertical, con lo que el momento del dipolo magnético será horizontal**.

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS (FEDM)

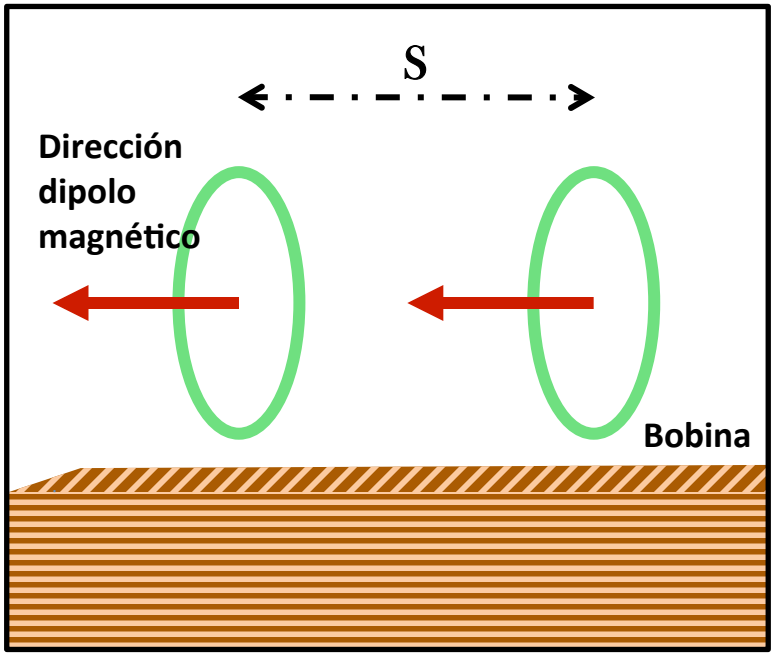
- **Modo dipolo vertical**:
  - Tanto la bobina transmisora como la receptora, se sitúan horizontalmente con respecto a la superficie del terreno, por lo que el momento del dipolo magnético será vertical.




Bobina transmisora y receptora horizontal.
Dipolo magnético vertical.

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS (FEDM)

- **Modelo dipolo horizontal:**
  - Ambas bobinas se situan de forma vertical, siendo entonces el momento del dipolo magnético horizontal.




Ambas bobinas de forma vertical.
Dipolo magnético horizontal.

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS (FEDM)

- Ambos modos de operar presentan diferentes sensibilidades para captar la respuesta de un cuerpo conductor.

- **La profundidad efectiva de investigación del dipolo vertical es superior al del dipolo horizontal:**
  - Dipolo vertical: aproximadamente una profundidad efectiva de investigación de **1.5 veces la separación entre bobinas**.
  - Dipolo horizontal: **0.75 veces la separación entre bobinas**.

- Ocurre que en caso de usar **bobinas grandes**, el **dipolo horizontal es más susceptible a presentar problemas por mal alineamiento de las bobinas que el dipolo vertical**.

# EQUIPO

- **Equipamiento básico del FDEM:**
  - Una **bobina emisora:** encargada de emitir el campo electromagnético primario.
  - Una **bobina receptora: encargada de captar** el campo electromagnético secundario.
  - Una o varias consolas (según modelo), para almacenamiento digital de los datos.

- El parámetro que determina la profundidad de investigación, es la separación entre bobinas. Esta variable puede ser fija durante la campaña de toma de datos, o puede ser modificada durante la misma. Los niveles de profundización pueden variar.

# EQUIPO

- **Modelos de instrumentos de medida:**
  - GEONICS EM-31: constituido por una barra en la que se encuentran las dos bobinas (una en cada extremo). La distancia entre bobinas es fija (3.66 m.). Sólo necesita un operario.

DATALOGGER
Enter

# EQUIPO

- **Modelos de instrumentos de medida:**
  - GEONICS EM-34: constituído por dos bobinas gigantes, por lo que se necesitan 2 operarios. Este modelo, permite trabajar con distintas separaciones entre bobinas (10, 20 y 30 m).

# EQUIPO

# EQUIPO

- El Geonics EM34-3, permite utilizar tres distancias entre las bobinas lo que permite explorar hasta 60 metros de profundidad y a tres frecuencias distintas.

- De esta forma, se tienen 3 espaciamientos entre bobina receptora y transmisora, tres frecuencias y dos orientaciones de dipolos (horizontal y vertical), lo que hace posible explorar con efectividad agua subterránea en fracturas, cuerpos mineralizados conductores tipo veta, zonas de intemperismo y fracturamiento en la roca base, etc.

- Además, el EM34-3 tiene integrado sistema de adquisición de datos digital con conexión a ordenador.

# EQUIPO

# METODOLOGÍA DE CAMPO

- **Los aspectos a tener en cuenta en la planificación son:**
  - **Delimitar objetivos:** cartografiar posibles trayectorias, monitorizar el comportamiento del flujo, etc.
  - **Número y ubicación de los perfiles**, así como el espaciado entre medidas.
  - **Profundidad** de investigación requerida.
  - Recopilar toda la **información acerca del contexto geológico** de la zona.
  - Escoger **el equipo de medida adecuado**.
  - Adoptar las medidas oportunas a fin de garantizar la **calidad de los datos**.

# METODOLOGÍA DE CAMPO

- **La elección del equipo de medida, condicionará la profundidad de la investigación:**
  - El Geonics EM-31 , con distancia fija, puede realizar solo dos medidas sobre la vertical de cada punto de muestreo(dipolo vertical y dipolo horizontal).
  - El Geonics EM-34, por su parte, permite trabajar con distintas separaciones, utilizándose generalmente 10, 20 y 30 m, de forma que se pueden obtener 6 lecturas por punto de medida.

https://www.georeva.eu/en/produit/em34-3-rt/

# ASPECTOS QUE CARACTERIZAN A LOS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS

- Los FEDM presentan una limitada resolución vertical, función del instrumento de medida, pero a su vez pueden tomar gran cantidad de datos y poco tiempo. Por otro lado, presentan una gran resolución horizontal.

- Esto hace que el uso de los FDEM sea mejor para estudios iniciales de una investigación a gran escala. Con ellos, y el análisis de mapas de isovalores de conductividad se pueden detectar áreas con aguas subterráneas.

# VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MÉTODO

- **A favor este método presenta:**
  - Método **que no requiere contacto con el terreno**, por lo que puede ser empleado en zonas donde no se pueden llevar a cabo SEV.
  - Como presenta **gran resolución horizontal**, es una técnica ideal para **estudios a gran escala**.

- **En contra:**
  - Un baja resolución vertical, no profundiza.
  - Es una técnica muy sensible a las presencia de campos electromagnéticos externos que originan "ruidos" que interfieren en la interpretación de los resultados.

https://www.youtube.com/watch?v=nDKDl1ScZrA

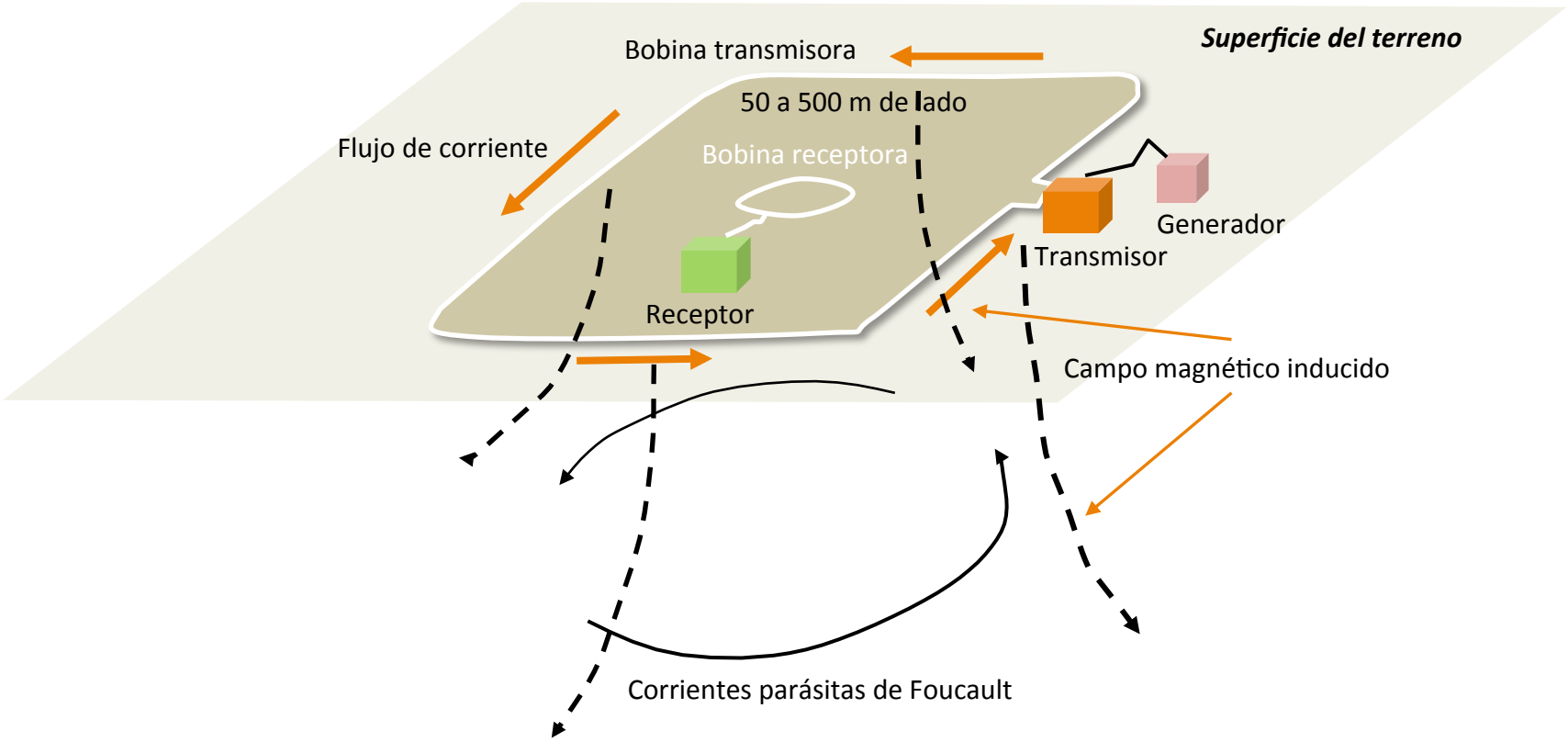
https://www.youtube.com/watch?v=ytsqUGbr7-o

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN DOMINIO DE TIEMPO (TDEM)

- En el método **TDEM** se hace **circular cíclicamente**, en cortos periodos de tiempo, **un campo eléctrico alterno alrededor de una bobina transmisora**.

- Esto origina un **campo magnético primario estable en el subsuelo**. Cuando **se corta de forma instantánea la corriente** que circula por la bobina transmisora (y por tanto cesa el campo magnético primario) el **campo EM inducido en el subsuelo causa corrientes parásitas** que se propagan tanto a través del terreno como en los conductores próximos.

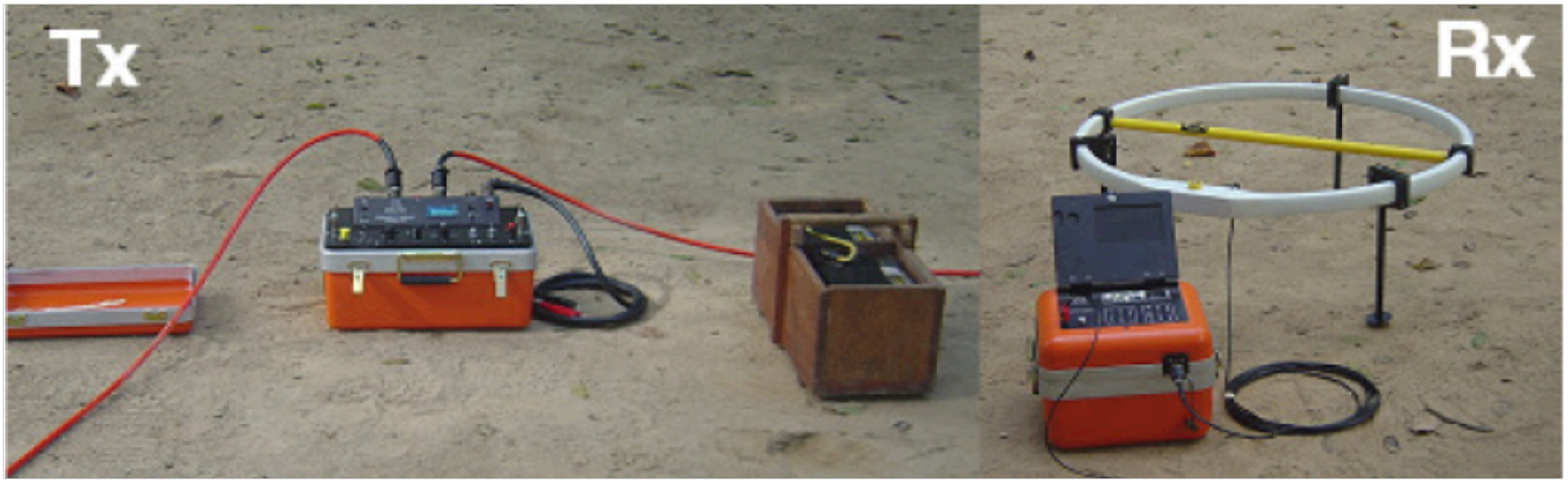
- Como consecuencia de pérdidas de resistencia calórica **estas corrientes disminuyen con el tiempo**, provocando un **campo magnético secundario decreciente en la superficie**.




- Al cortar la corriente de la bobina transmisora, se produce una inducción electromagnética de corrientes parásitas en el subsuelo. Estas corrientes decrecen con el tiempo generando a su vez un campo magnético secundario.

# MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO EN DOMINIO DE TIEMPO (TDEM)

- El campo magnético secundario se genera cuando el campo primario está desconectado, si existen cuerpos de conductividad eléctrica elevada **la atenuación de las corrientes parásitas es significativamente menor que en los malos conductores**.
- Así, medir **la relación de decrecimiento del campo secundario proporciona una forma de detectar la presencia de cuerpos conductores en el subsuelo y estimar su conductividad**.




Equipo de TRX. Transmisor TEM 57-2K & Receptor Protem (Rx) de Geonics.

# DISPOSITIVO DE MEDIDA

- La configuración es situar la **bobina receptora en el centro de la bobina emisora**.
- En esta configuración, **la medida del campo decreciente en el centro de la bobina es equivalente a la medida de la resistividad en función de la profundidad**.
- **La profundidad de investigación depende del retardo del campo decreciente siendo independiente de la separación entre las bobinas emisora y receptora**.
- Al aumentar el tiempo, la intensidad de corriente se propaga a mayores profundidades.
- El **método es rápido** (pocos minutos de medida por cada sondeo).
- Permite alcanzar, en función de las dimensiones/geometría de las bobinas usadas y de la potencia del transmisor, desde pocas decenas de metros a algunos km de profundidad.

# VENTAJAS DE TDEM

- **Las principales ventajas del TDEM son:**
  - **Gran sensibilidad a los terrenos conductores**.
  - Un **excelente poder de resolución vertical**.
  - Una **buena detección de las anomalías de baja resistividad en un terreno conductor**.
  - Una **ejecución práctica** debida a la ausencia de contacto con el suelo y, por lo tanto, rápida en un terreno despejado.

# APLICACIONES DE TDEM

- **Este método tiene aplicaciones superficiales y profundas:**
  - Hasta 50 m de profundidad, sirve para:
    - Estudios ambientales.
    - Geotecnia – Ingeniería civil.
    - Near Surface Geophysics.
  - Hasta 1000 m de profundidad, sirve para:
    - Hidrología.
    - Exploración minera.
    - Exploración geotérmica.
  - Puede alcanzar hasta 5-10 km de profundidad, utilizándose para:
    - Exploración geológica.
    - Exploración geotérmica profunda.
    - Exploración petrolera profunda en áreas complejas en tierra.

# MÉTODOS TDEM

- Este método presenta ciertas ventajas sobre los métodos EM en el **dominio de frecuencias y sobre los métodos eléctricos galvánicos**, destacando:
  - **Respecto al FDEM:**
    - Usar más frecuencias (respecto al FDEM) y por lo tanto proveer mayor resolución vertical.
    - Capacidad de un mayor poder de penetración.
    - Mayor resolución en definición de estructuras estratificadas.
  - **El efecto negativo con respecto a los métodos FDEM es la menor resolución lateral**.
  - **Respecto a los métodos eléctricos (corriente contínua):**
    - No necesita contactos electródicos.
    - Mayores profundidades de investigación con relativo menor esfuerzos logístico.
    - Mayor rapidez y productividad en la adquisición de datos.

# MÉTODOS SÍSMICOS

# MÉTODOS SÍSMICOS

- Los métodos de prospección sísmica se basan en la generación de ondas elásticas u ondas sísmicas y su propagación en el terreno.
- A través de los diferentes terrenos, las ondas sísmicas sufrirán fenómenos de refracción o de reflexión en los contactos geológicos.
- En la superficie, estas ondas son recibidas por instrumentos que permiten medir los tiempos de llegada en relación al instante de la generación de las ondas.
- La producción de ondas sísmicas se realiza mediante la detonación de una carga y/o la generación de una vibración produciendo una perturbación.
- El recorrido de estas ondas por el subsuelo proporciona información de la geología existente en profundidad, obteniendo una imagen de las variaciones estructurales.

# MÉTODOS SÍSMICOS

- Estos métodos, pueden alcanzar profundidades de decenas de kilómetros (en el caso de la sísmica de reflexión).

- Se usan para definir cuencas sedimentarias, en las que la estratigrafía se presenta en capas. Estas cuencas son zonas de posible existencia de yacimientos importantes de hidrocarburos.

- Se emplean también en estudios someros, con el objetivo de caracterizar estratos superficiales, localización de niveles freáticos, caracterización geológica del terreno para ingeniería civil…

# MÉTODOS SÍSMICOS

- **Los métodos sísmicos se dividen en dos clases:**
  - El método **sísmico de reflexión** es el más empleado en prospección de hidrocarburos obteniéndose información de capas muy profundas. Permite también localizar la presencia de fallas.
  - El método **sísmico de refracción** es un método de reconocimiento general especialmente adaptado para trabajos de ingeniería civil, y estudios hidrogeológicos.

# TIPOS DE ONDAS

- Cuando se produce un movimiento rápido del terreno (**terremoto**), las ondas producidas se transmiten desde el foco a través de la Tierra a velocidades que dependerán de la naturaleza de los materiales que atraviesan y según trayectorias que produzcan el tiempo mínimo.

- Las ondas sísmicas utilizadas en prospección geofísica, son trenes de ondas de corta duración, paquetes de energía de deformación elástica que se propagan en todas direcciones a partir de la fuente generadora y que presentan un amplio espectro de frecuencias.

- **Hay dos tipos generales de ondas sísmicas:**
  - **Ondas volumétricas**.
  - **Ondas superficiales**.

# ONDAS VOLUMÉTRICAS

- Se propagan por un material en estado sólido.
- **Son de dos tipos:**
  - **Ondas de compresión:** ondas longitudinales, ondas primarias u ondas P.
  - **Ondas de cizalladura:** ondas transversales, ondas secundarias u ondas S.

# ONDAS DE COMPRESIÓN/LONGITUDINALES

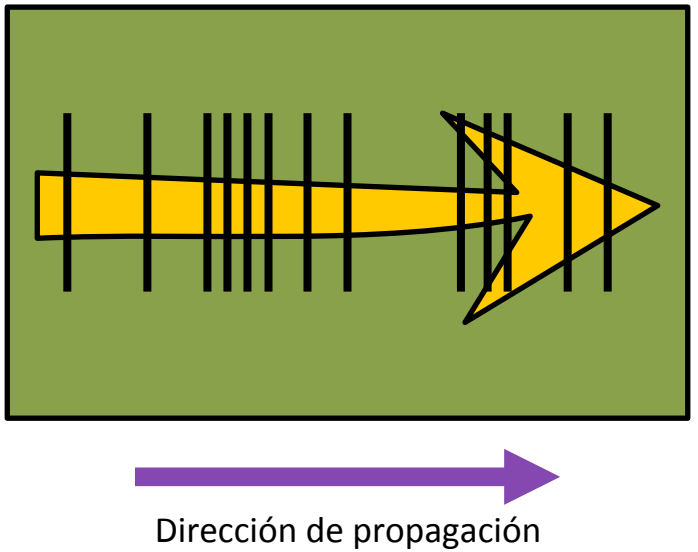
- Cuando las **ondas longitudinales** viajan a través de un cuerpo, sus partículas vibran hacia delante y hacia atrás en la dirección de la propagación de las ondas y el cuerpo se comprime en algunas partes, pero se dilata en otras al mismo tiempo.

- Estas ondas son semejantes a las **ondas sonoras** ordinarias.

- En una generación y transmisión de ondas a través de un terreno, las ondas que llegan en primer lugar son las ondas P:

**Vp = 8 a 14 Km/s**

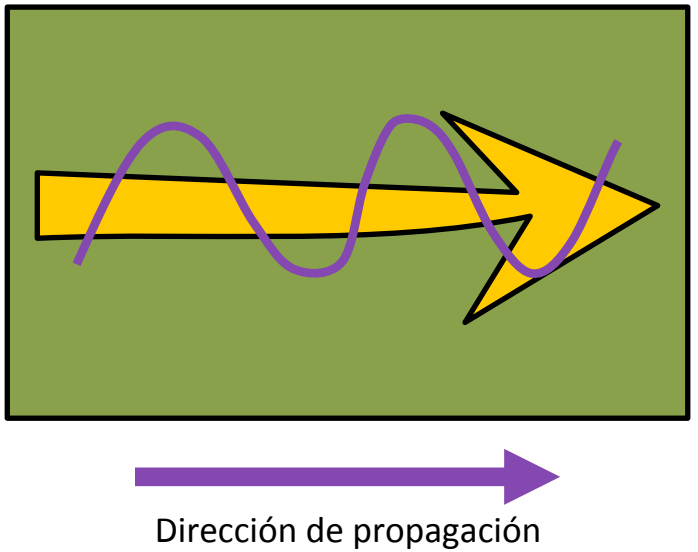
- Son las que marcan el comienzo del terremoto, tienen amplitud relativamente pequeña y período corto.



# ONDAS TRANSVERSALES

- La dirección de vibración de las partículas del material por el que se propagan las ondas, es **perpendicular** a la dirección de propagación de dichas ondas.
- Estas ondas son más lentas que las ondas P, y solo se propagan en sólidos.
- Estas ondas presentan un movimiento de amplitud algo mayor que las P y período semejante o algo mayor.
- La velocidad de estas ondas es:

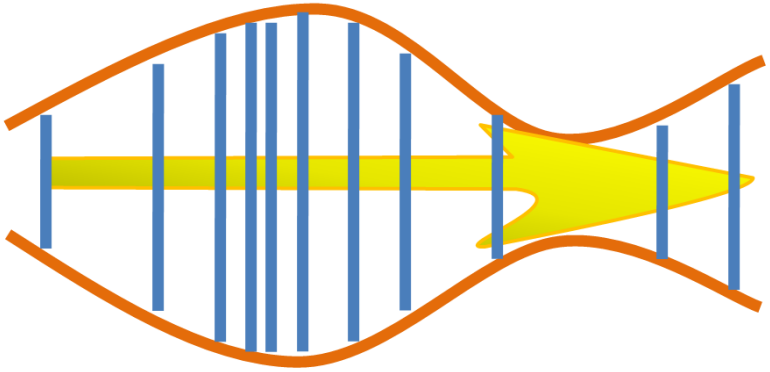
**Vs = 4 a 7 Km/s**



# ONDAS SUPERFICIALES

- Son ondas que no penetran a cierta profundidad en el terreno.
- Viajan solo por la superficie de un sólido elástico.
- Las partículas se mueven solo en un plano vertical.
- La amplitud del movimiento decrece exponencialmente con la profundidad.
- La velocidad de las ondas **R** son las más bajas en un cuerpo.

**Ondas Rayleigh**



**Ondas Superficiales**

**R , L**

# ONDAS LOVE

- **Estas ondas reciben su nombre de su descubridor, A.E.H. Love (1911)** que estudió el efecto producido por vibraciones elásticas en una capa superficial.
- Se trata de **ondas de cizalla**, oscilando solo solo en el **plano horizontal**.
- Su velocidad de transmisión es menor que la de las ondas P y las S, pero mayor que las Rayleigh.
- Son las causantes de los desplazamientos del terreno superficial, cuando se produce un terremodo.
- Debido a que su **movimiento** de partículas es siempre **horizontal**, las ondas Love **no han podido ser grabadas** en el transcurso de una prospección sísmica, donde **los geófonos** están diseñados para responder a **movimientos verticales** en el terreno.

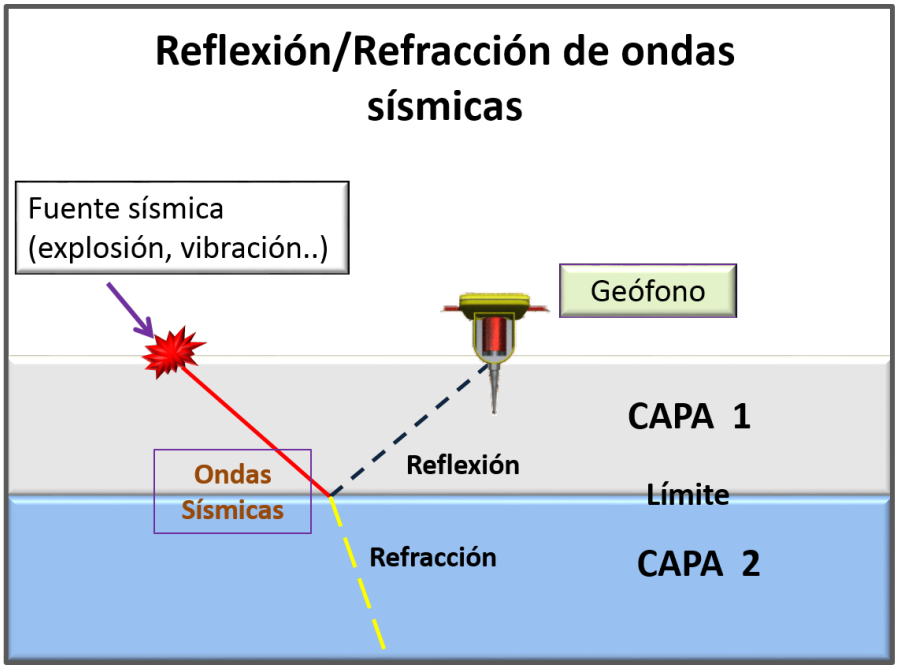
# VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS EN LOS MATERIALES

- En las rocas, la velocidad de las ondas sísmicas varía en función de sus módulos elásticos y de su densidad.

| Tipo de material | Vp (m/s) |
|---|---|
| Arena (seca) | 200-100 |
| Arena (saturada) | 1500-2000 |
| Areniscas | 2000-6000 |
| Calizas | 2000-6000 |
| Dolomías | 2500-6500 |
| Sal | 4500-5000 |
| Granito | 5500-6000 |
| Rocas ultramáficas | 7500-8500 |

# PRINCIPIOS BÁSICOS

- A partir de la generación de la onda sísmica, esta viaja hacia el interior del terreno y cuando encuentra un cambio de materiales o contacto geológico en el que las propiedades elásticas del material cambian, parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración.



# PRINCIPIOS BÁSICOS

- **La Sismología:** es la ciencia que trata de los terremotos y de los fenómenos relacionados con ellos, incluyendo las causas de los terremotos, la localización de los mismos, el estudio de las ondas que se reciben de ellos y los instrumentos de registro que se emplean.

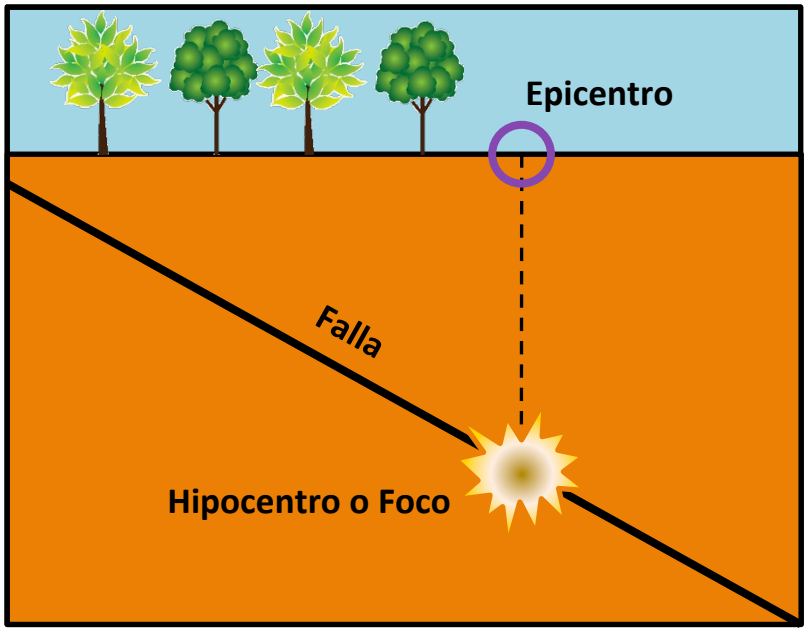
- **Los estudios de sismología** han formado la base de los métodos sísmicos de prospección.

- **Terremoto:** es un movimiento o serie de movimientos transitorios y repentinos del terreno, originados en una región limitada de la corteza terrestre que se propagan desde su origen en todas direcciones.

# PRINCIPIOS BÁSICOS

## LOS TERREMOTOS

- **Los terremotos están formados por:**
  - Foco o Hipocentro: lugar o punto donde se produce el terremoto. En general, el hipocentro se encuentra a pocas decenas de km de profundidad dentro de la corteza terrestre, o en la base de la misma.
  - Epicentro: proyección del hipocentro sobre la superficie terrestre.



# CAUSAS DE LOS TERREMOTOS

- Movimientos de reajuste originados por la producción repentina de esfuerzos dentro de la Tierra.

- **Se distinguen:**
  - Causas de origen tectónico: fractura y fallas, plegamientos.
  - Causas de origen ígneo: explosiones debidas a presión acumulada (origen volcánico), intrusiones magmáticas.
  - Causas producidas por impacto: explosiones superficiales, caídas de meteoritos, caída de rocas.

- Los del **Tipo a** son los denominados **"terremotos tectónicos"** y son los más frecuentes.

- El registro de la propagación de las ondas de un terremoto proporciona **información sobre el interior de la Tierra**.

## PRINCIPIOS BÁSICOS

# IMPEDANCIA ACÚSTICA

- Para que exista reflexión en los materiales que atraviesan las ondas en su propagación, es necesario que las *impedancias acústicas* de los medios adyacentes sean diferentes.
- **Impedancia acústica:** es la resistencia que opone un medio a las ondas sonoras que se propagan sobre este (una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio).
- Las ondas sísmicas son perturbaciones mecánicas que viajan por la Tierra a una velocidad determinada que viene definida por la ***impedancia acústica*** del medio por el que se propagan.
- La Impedancia acústica (o sísmica) viene definida por: **Z = pV**, donde:

  **p** = densidad de la roca; **V** = velocidad de la onda.
- Del **estudio de los tiempos** de llegada de las ondas sísmicas a un cierto número de puntos escogidos, es posible deducir las **posiciones de los contactos en los que las ondas se reflejan o refractan**.

# PRINCIPIOS BÁSICOS

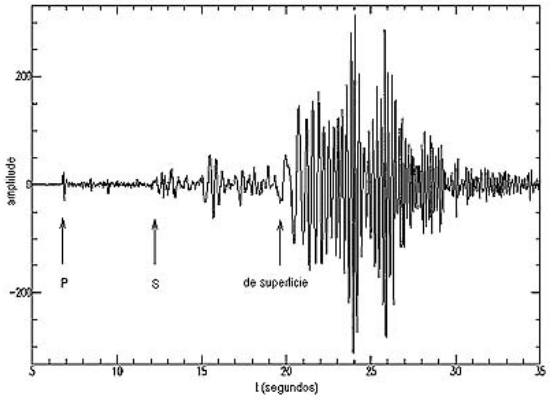
- Los reconocimientos sísmicos son muy efectivos en la **investigación de la estratigrafía de la zona**, por ello son el pilar de la **industria petrolera** pero no así en la industria de los minerales.

- La **prospección sísmica** es una herramienta de investigación poderosa, ya que con ella se puede inspeccionar con buena resolución desde los **primeros metros del terreno (sísmica de alta resolución o sísmica superficial; shallow seismic) hasta varios kilómetros de profundidad (sísmica profunda; deep seismic)**.

# SISMÓGRAFO

- Un sismógrafo registra las vibraciones del terreno porque tiene una masa suspendida independientemente de los movimientos del suelo.
- El registro se denomina **Sismograma**.

Primer sismógrafo **Zhang Heng en el año 132:** dispositivo en forma de jarrón con varias **cabezas en bronce de dragones**, cada una con una **bola** de bronce en su boca; alrededor del pie tenía varios **sapos** de bronce con las bocas abiertas. Si la máquina detectaba un temblor de tierra las **bolas de bronce se soltaban y caían en la boca de los sapos**, provocando un ruido a modo de alarma.



# SISMOGRAMA

- Un **sismograma** es un registro del movimiento del suelo llevado a cabo por un sismógrafo.
- La **energía medida** en un sismograma resulta de **fuentes naturales** como son los **terremotos**, o de **fuentes artificiales** como son los **explosivos**.
- Dado que las **ondas P** se propagan a mayor velocidad que otros tipos de ondas, **son las primeras en ser registradas en un sismograma**. Después llegan las **ondas S** y por fin las **ondas superficiales** (ondas Rayleigh y ondas Love).
- Los primeros sismógrafos hacían sus registros en papel. Actualmente, todos los sismógrafos registran la **información de forma digital**.

## PRINCIPIOS BÁSICOS

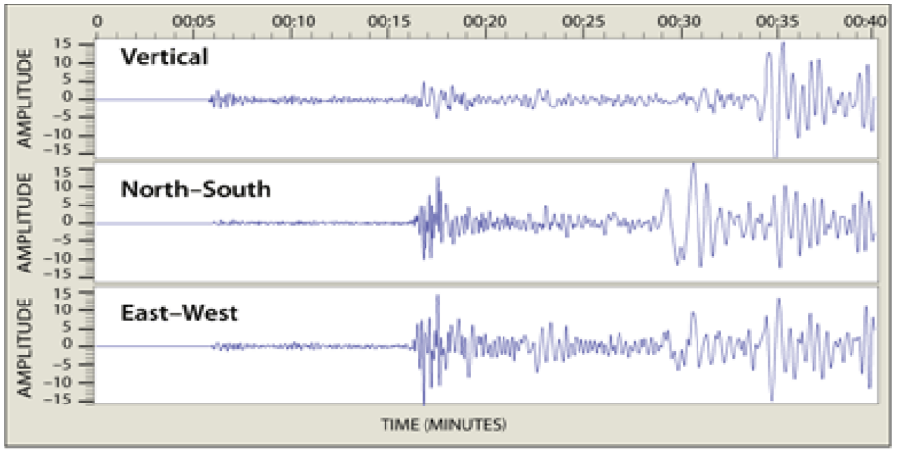
- Para la **sísmica profunda** se utilizan fuentes de energía muy potentes (explosivos o camiones vibradores) capaces de generar ondas elásticas que llegan a las capas profundas del subsuelo, mientras que para la **sísmica superficial** se utilizan martillos de impacto, rifles sísmicos y explosivos de baja energía. De manera que el diseño de una campaña sísmica (equipo y material a utilizar) está en función del objetivo del estudio. Según esto, la **sísmica profunda** se emplea en la detección de reservorios petrolíferos (ya sea terrestre o marítima), grandes estructuras geológicas (plegamientos montañosos, zonas de subducción, etc.), yacimientos minerales, domos salinos, etc.

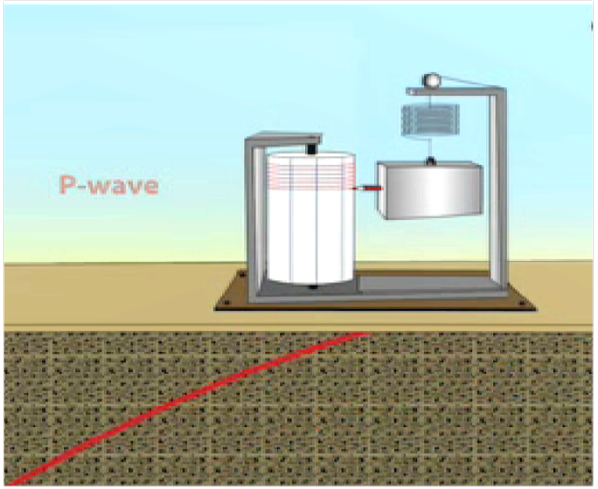
- Mientras que la **sísmica superficial** tiene mucha aplicación en la obra pública y la ingeniería civil.

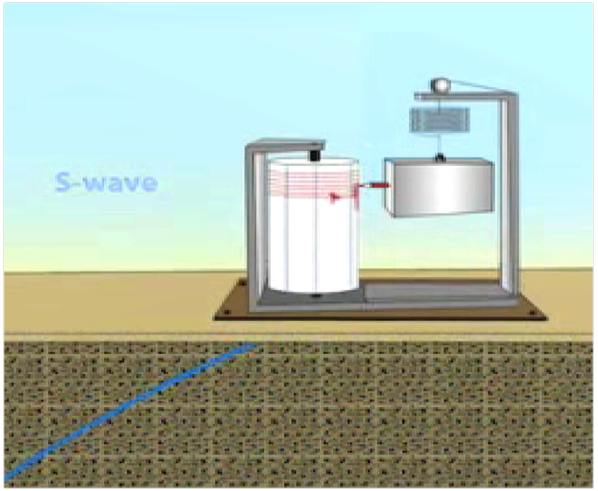
# SISMÓGRAFO

- En los sismogramas quedan registradas las **vibraciones del terreno** en las diferentes direcciones.

- El registro de un terremoto **varía según transcurre el tiempo**. Esto se debe a que en un terremoto se producen diferentes tipos de ondas.



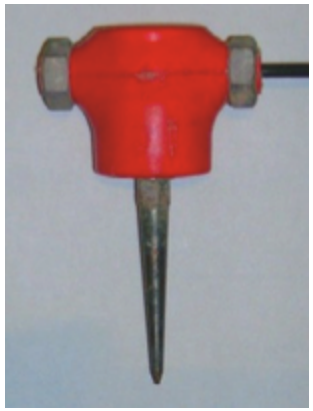



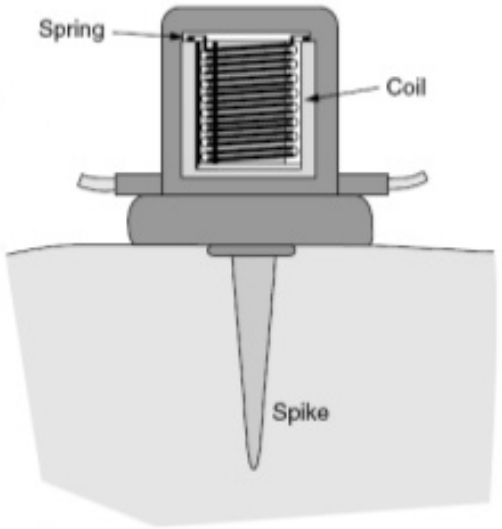
# GEÓFONOS

- Los **geófonos** son transductores de desplazamiento, velocidad o aceleración que convierten el movimiento del suelo en una señal eléctrica.

- Casi todos los geófonos empleados para la prospección sísmica en la superficie terrestre son del tipo electromagnético.

- **Geófonos electromagnéticos:** un geófono electromagnético es un **transductor de velocidad**. Está formado por una bobina suspendida de un sistema de resortes que se mueve en un campo magnético generado por un imán permanente.





# GEÓFONOS

- **Geófonos piezoeléctricos:**
  - Los geófonos piezoeléctricos son **transductores de aceleración**.
  - En este tipo de geófonos la masa del sistema descansa sobre un conjunto de placas hechas de algún material **piezoeléctrico** sensible a la presión tal como el **cuarzo** o la **turmalina**.
  - Una aceleración del suelo **hacia arriba** aumentará el peso aparente de la masa y en consecuencia subirá la presión que actúa en los cristales piezoeléctricos.
  - Una aceleración del suelo hacia abajo disminuirá el peso aparente de la masa y en consecuencia la presión ejercida sobre las placas.
  - La variación de la presión induce variaciones de voltaje entre los extremos de las placas.

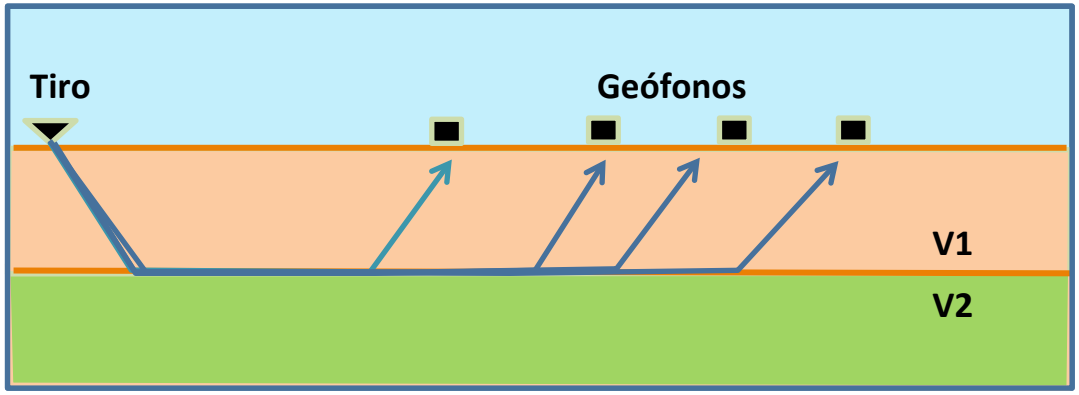
# SÍSMICA DE REFRACCIÓN

- El método está basado en el principio físico de la **refracción**.
- Cuando una onda incide en una superficie que separa dos medios con velocidades de propagación diferentes se produce un cambio en la trayectoria de dicha onda, este efecto se denomina refracción y puede cuantificarse a partir de la Ley de Snell.
- **Ley de Snell:**

  $V1/sen(i) = V2/sen(i2)$.
- Cuando el ángulo de incidencia aumenta lo suficiente alcanza un valor denominado ángulo crítico a partir del cual toda la energía que se transmite al segundo medio se propaga a lo largo del contacto entre ambos medios.
- Esta onda se denomina onda refractada crítica, se propaga con la velocidad del medio inferior y vuelve a la superficie con gran amplitud.

# SÍSMICA DE REFRACCIÓN

- El método consiste en medir el tiempo de viaje de las ondas refractadas críticamente en el contacto entre capas de propiedades físicas distintas, especialmente el contraste entre impedancias acústicas.
- Para ello, en superficie o a poca profundidad, se realiza un impacto controlado.
- Las vibraciones se propagan en forma de onda elástica a través del subsuelo interaccionando con las distintas capas, una parte de la energía se refleja y permanece en el mismo medio que la energía incidente y el resto se transmite al otro medio con un fuerte cambio en la dirección.



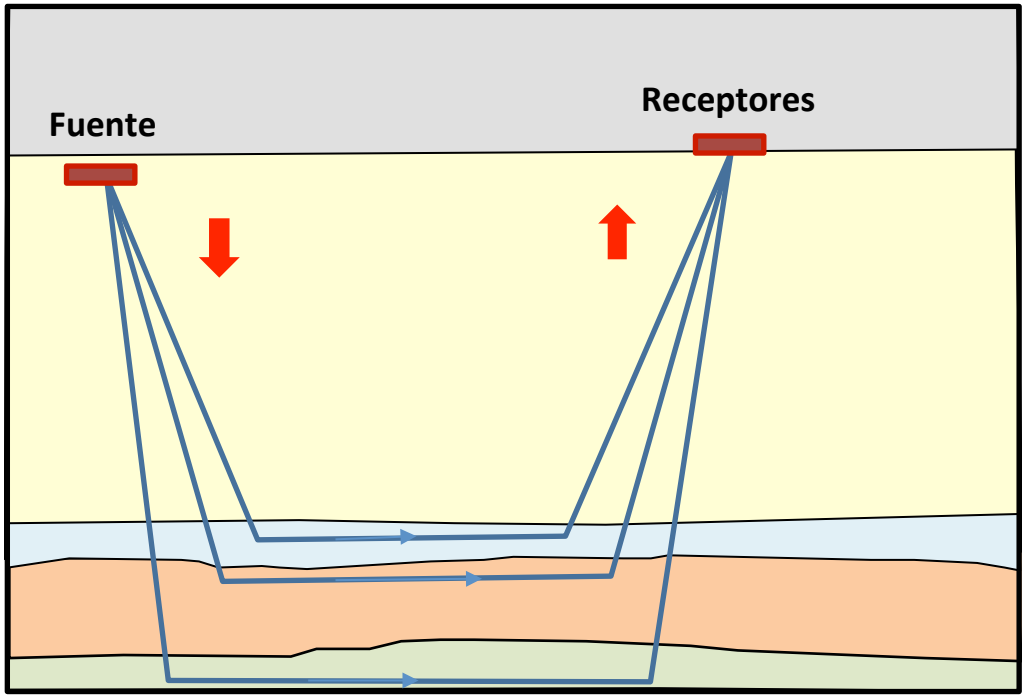

Dependiendo de las velocidades de los materiales, hay un ángulo de incidencia crítica para el cual el ángulo de refracción es de 90°, en ese caso la onda viaja en el contacto entre las dos capas y vuelve a subir con el mismo ángulo que ha incidido. Es el rayo crítico, el único que se registra en superficie.

# SÍSMICA DE REFRACCIÓN

- La sísmica de refracción, se llama también **"sísmica de gran ángulo"**, debido a que las ondas viajan grandes distancias horizontales antes de ser refractadas críticamente hacia la superficie.
- Hay que situar el punto de tiro, a una distancia grande de los receptores, comparada con la profundidad de los horizontes que se desean detectar.
- Utilizada para la exploración de cuencas sedimentarias, este método posibilita el estudio de áreas grandes de forma rápida y económica, mejor que en el método de reflexión, pero con menos detalle.
- Con esta técnica, se descubrieron grandes campos petrolíferos, pero el avance en la utilización de la sísmica de reflexión hizo que quedara relegada a esta.
- En la actualidad se utiliza por su menor corte en estudios de estructuras profundas o en el subsuelo.

# SÍSMICA DE REFRACCIÓN

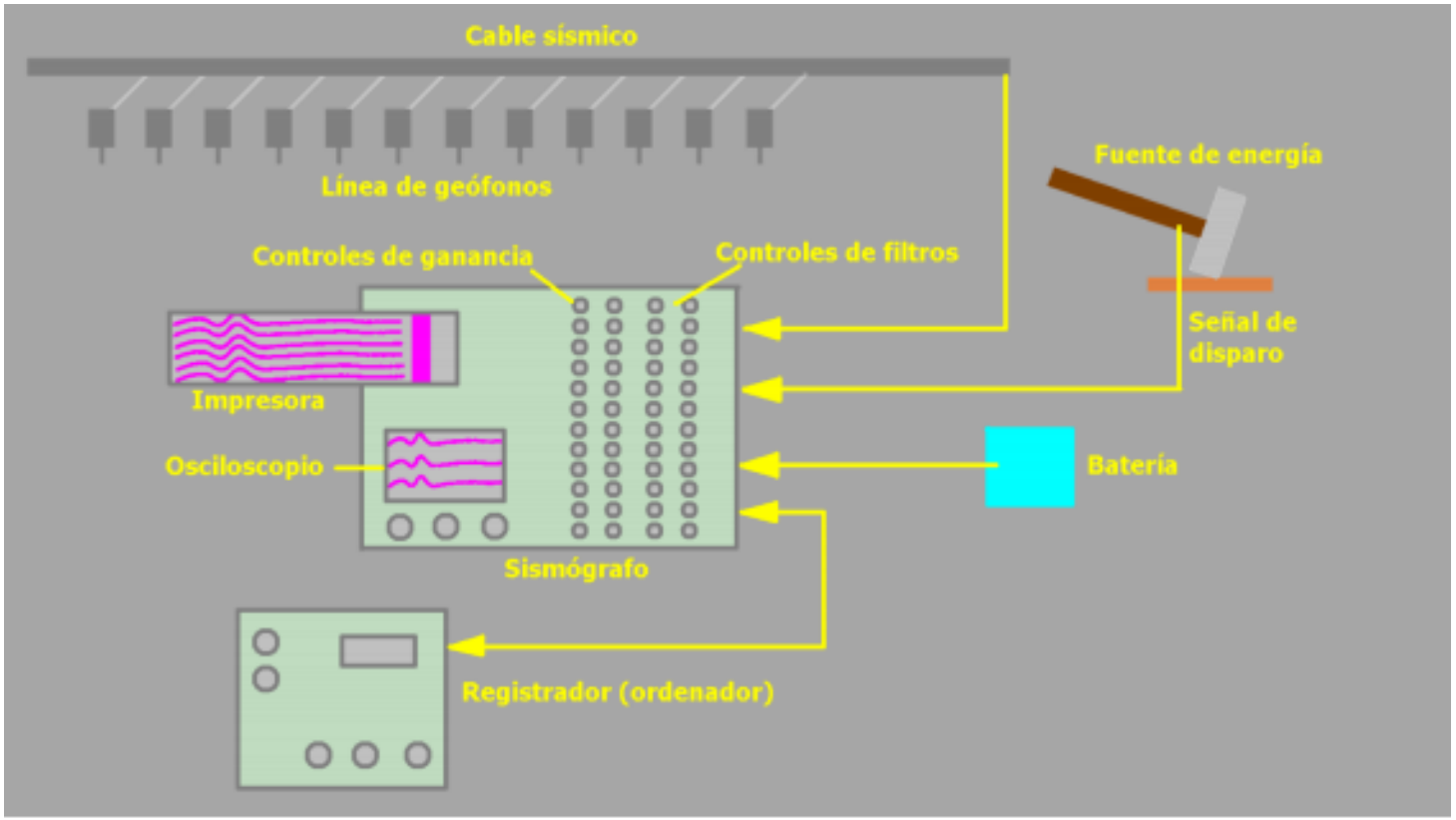
- La sísmica de refracción utiliza los tiempos de llegadas del sismograma correspondientes con las ondas refractadas críticamente en las distintas capas del subsuelo.
- Cada una de las capas tiene su impedancia acústica.



# EQUIPO DE SÍSMICA DE REFRACCIÓN

- **Fuente sísmica:** puede ser desde una maza que golpea el terreno, hasta una carga explosiva o una masa en caída libre o cualquier otro elemento que produzca un impulso mecánico en el terreno.
- **Geófonos:** para registrar el movimiento del terreno (normalmente en la dirección vertical) generado por la fuente sísmica a intervalos regulares.
- **Unidad de registro:** sismógrafo que almacena en formato digital la información proveniente de los geófonos.
- Situado el emisor de las ondas sísmicas en un punto conocido, se genera la onda que será recibida por los geófonos separados una distancia conocida.
- Se mide la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y con ellas se construyen perfiles 2D o 3D.
- La resolución y profundidad va a depender de la separación de los geófonos y la distancia a la fuente sísmica.
- Existen numerosas configuraciones de dispositivos pero lo más habitual son perfiles sísmicos de 50 a 250 m de longitud así como separaciones de geófonos entre 1 y 10 m. En grandes obras de ingeniería se emplean perfiles incluso de has-ta 1 km de longitud.

# DISPOSITIVO

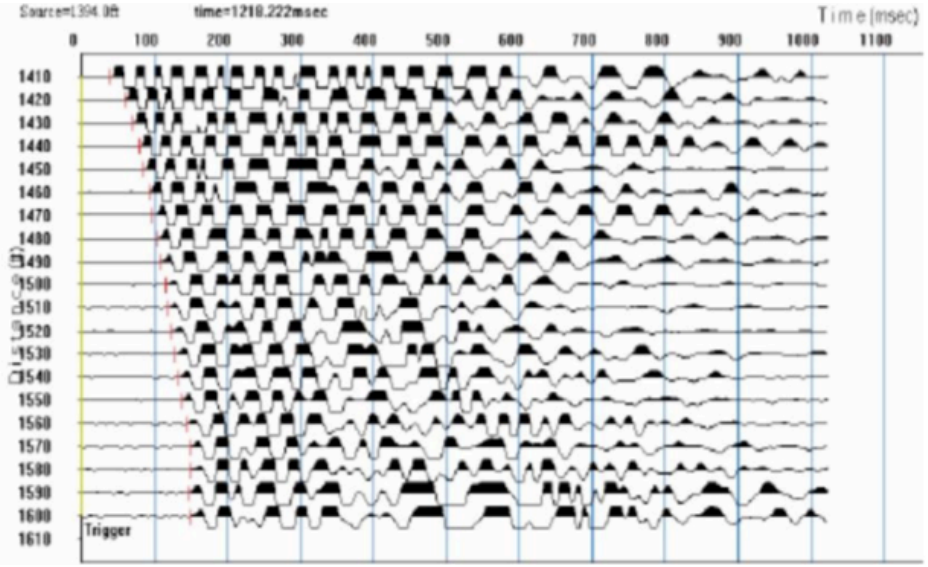



Dispositivo para un ensayo de sísmica de refracción.

http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf

# RESULTADOS

- De cada geófono se obtiene una señal.
- Se obtiene el tiempo de la primera llegada a cada geófono, desde el impacto, obteniendo las curvas tiempo-distancia llamadas Dromocronas.
- Mediante un proceso de inversión, se obtienen de esta curvas un modelo de capas de los materiales atravesados.

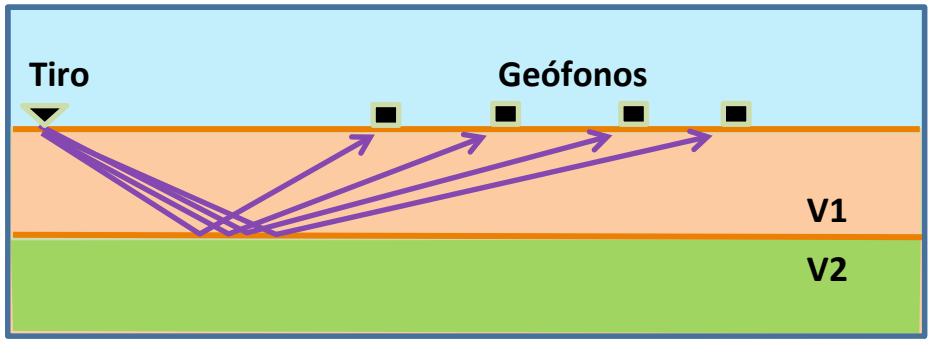



Picado de las primeras llegadas de las ondas P a cada uno de los 24 geófonos.

http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf

# SÍSMICA DE REFLEXIÓN

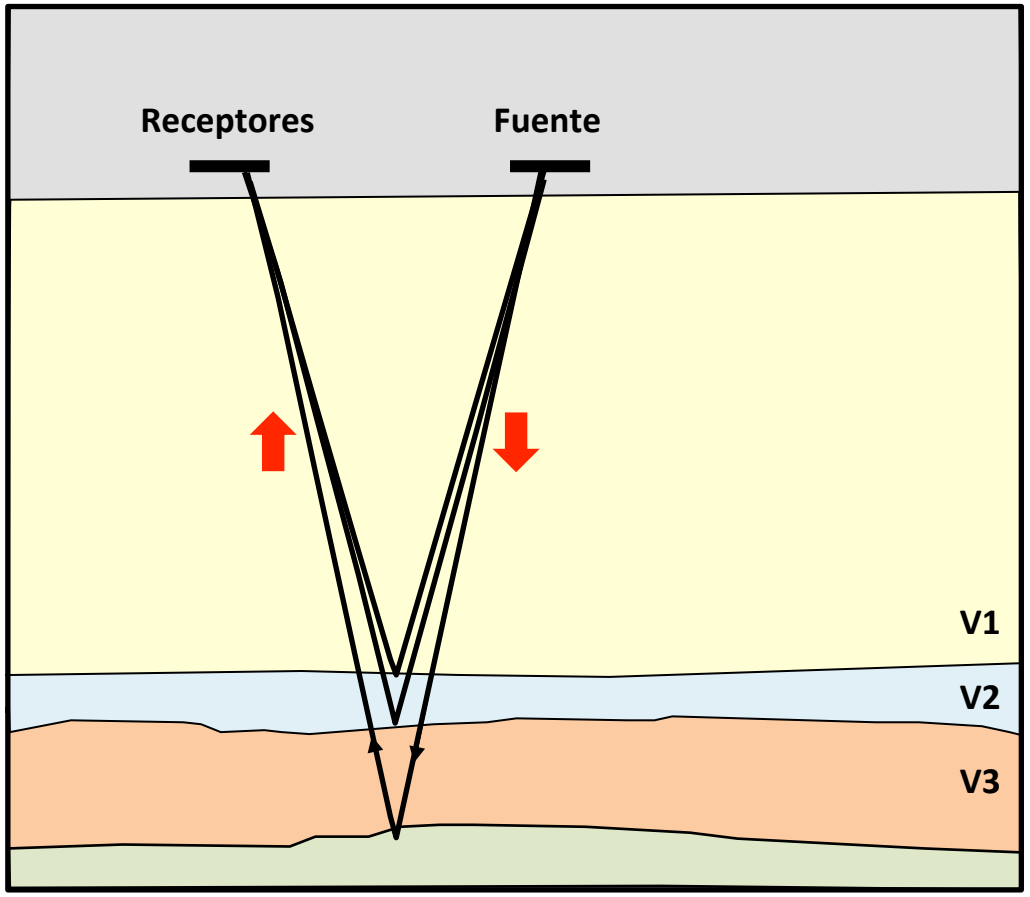
- El método de prospección geofísica conocido como sísmica de reflexión de alta resolución se aplica en estudios geotécnicos e hidrogeológicos, ya que permite el estudio de las formaciones geológicas en los primeros 700-100 m de profundidad.
- Si se ajusta bien el dispositivo y se emplea una fuente de energía adecuada se llegan a alcanzar los 2000m de profundidad.
- Este método se basa en las reflexiones de las ondas sísmicas sobre los contactos entre distintas capas geológicas que presentan contrastes de impedancia.
- En este método, las distancias entre la fuente emisora y los geófonos son pequeñas.




Las ondas rebotan sobre el techo de la segunda capa.

# SÍSMICA DE REFLEXIÓN

- Esquema básico de la emisión y recepción de los rayos reflectados en las distintas capas reflectoras.
- La fuente emisora envía ondas que sufren el fenómeno de reflexión en los contactos entre diferentes materiales.

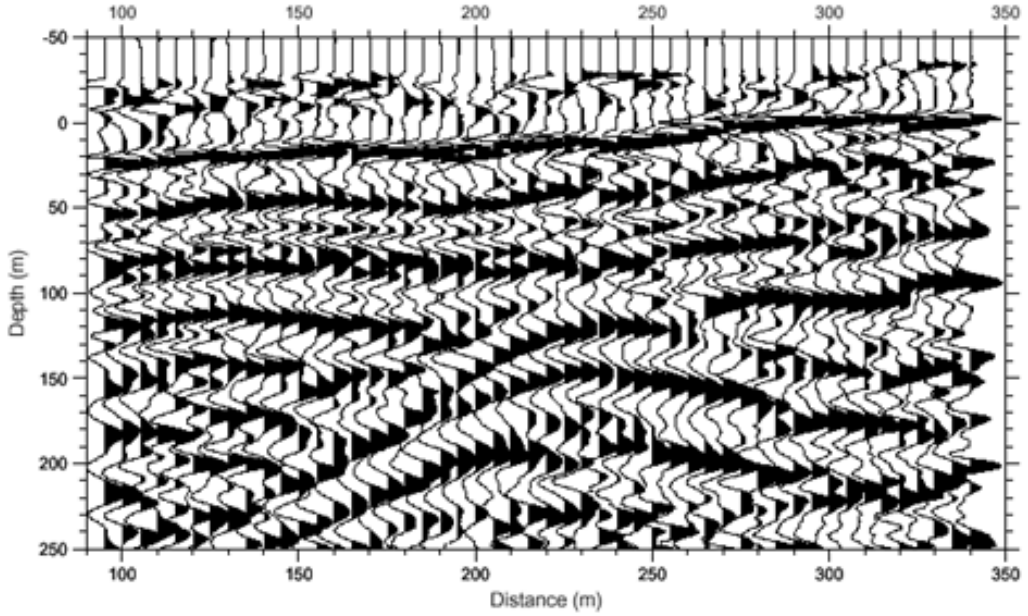


# SÍSMICA DE REFLEXIÓN

- Para obtener mejores resultados, en esta técnica se realiza un número mayor de disparos, aumentado la cantidad de geófonos en comparación con el método de refracción.
- Lo que se obtiene es un grupo de trazas sísmicas que proceden de todos los tiros. Estas trazas se procesan y se reordenan obteniendo "puntos reflectores comunes", que son los que contienen la información de todas las reflexiones encontradas.
- Procesadas y agrupadas todas las trazas se obtiene una "sección sísmica de reflexión".
- Esta sección sísmica es una imagen del subsuelo, donde las reflexiones se ven en forma de lóbulos negros de mayor amplitud, definiendo las capas reflectoras que se asocian con estructuras geológicas.

# SÍSMICA DE REFLEXIÓN

- El tratamiento de datos es laborioso y delicado.
- Hay que conseguir aislar de los registros, las reflexiones.
- El método de prospección sísmica, es una de las técnicas más utilizadas ya que su resultado es una imagen donde se aprecia la geometría de las estructuras geológicas.




Sección sísmica de reflexión.

# COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS SÍSMICAS EN LAS ROCAS

- Los parámetros característicos de las rocas, que se determina con los métodos sísmicos son la **velocidad de las ondas P y S**, el **coeficiente de reflexión**, la **densidad**.

- **Las propiedades de las rocas, que influyen estos parámetros son:**

  **a)** Petrografía, contenido en minerales.

  **b)** Estado de compacidad.

  **c)** Porosidad = porcentaje o proporción de espacio vacío (poros) en una roca.

  **d)** Relleno de espacios vacíos, es decir de los poros.

  **e)** Textura y estructura de la roca.

  **f)** Temperatura.

  **g)** Presión.

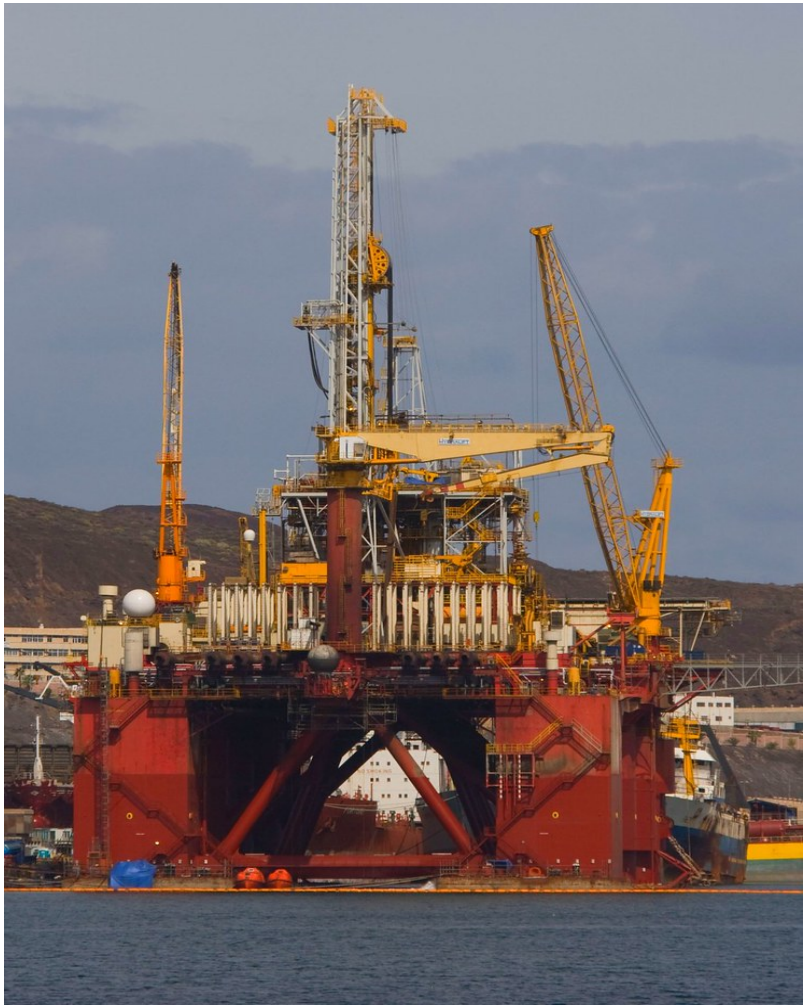
# LAS VELOCIDADES DE LAS ONDAS EN DIFERENTES MEDIOS

| Medio | Velocidad de la onda primaria (vp) en m/ seg. | Velocidad de la onda secundaria (vs) en m/seg. |
|---|---|---|
| **Granito** | 5200 | 3000 |
| **Basalto** | 6400 | 3200 |
| **Calizas** | 2400 | 1350 |
| **Areniscas** | 3500 | 2150 |

- Durante el cambio de un medio al otro las ondas sísmicas tienen que cambiar su velocidad, significa también que van a separarse en una parte reflejada y en una otra parte refractada.

# PROSPECCIÓN SÍSMICA

- Los métodos sísmicos en general y el de reflexión en particular son **métodos muy caros**.
- Son **métodos de detalle**, su empleo debe ser cuidadosamente estudiado y planeado.
- El planteamiento es, inicialmente, geológico.
- Es importante **determinar el objetivo** y el posible valor económico de la información.
- Se pueden aplicar en **prospecciones petrolíferas**, **prospecciones mineras** y en **ingeniería civil**.



# PROSPECCIÓN SÍSMICA EN EXPLORACIÓN PETROLÍFERA

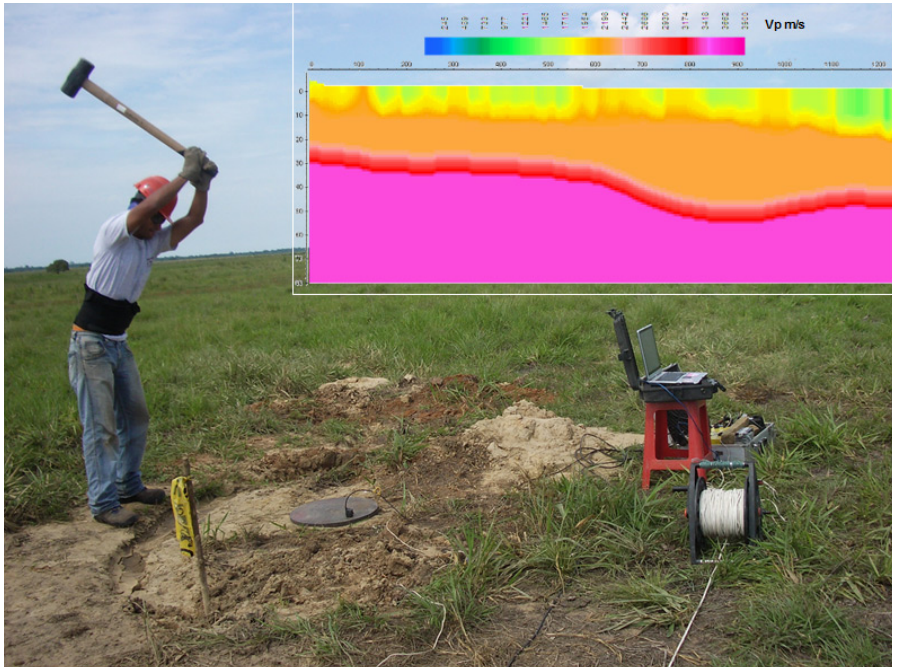
- Es el campo **más amplio de aplicación** de estos métodos.
- Una vez escogida una **cuenca sedimentaria** con presencia de formaciones porosas potencialmente aptas para almacenar hidrocarburos se siguen los pasos:
  1. **Reconocimiento geológico general:** estudio de las posibilidades petrolíferas de la cuenca, reconociendo la presencia de posibles formaciones de rocas madres y de rocas almacén, formaciones impermeables que puedan recubrir estas últimas, espesores de sedimentos etc., y estudios tectónicos regionales para reconocer trampas petrolíferas.
  2. **Reconocimiento geológico y fotogeológico de detalle**. Mapa geológico de detalle, estudios estratigráficos.
  3. **Prospección geofísica por método general:** reconocimiento de densidad y magnetismo en la zona.
  4. **Prospección sísmica en áreas seleccionadas:** líneas de investigación general, complementado con líneas de detalle.
  5. El paso final es la **interpretación de los datos** obtenidos anteriormente de forma que encajen unos con otros.

# LOS MÉTODOS SÍSMICOS EN LA PROSPECCIÓN MINERA

- **En prospección minera, estos métodos están limitados a casos** donde es difícil reconocer el cuerpo mineralizado. La utilización con éxito de los métodos sísmicos requiere dos condiciones fundamentales:
  1. **Regiones de tectónica tranquila** con superficies planas o casi planas.
  2. **Existencia de contraste de velocidad** entre los sucesivos medios del subsuelo.
- En prospección minera, la primera condición no suele cumplirse.
- Los métodos sísmicos son útiles en la **prospección de yacimientos minerales sedimentarios en zonas poco plegadas** y en la **prospección de agua subterránea** y en **carbones**.

# LOS MÉTODOS SÍSMICOS EN LA INGENIERÍA CIVIL

- Estos métodos son utilizados para la localización de la **roca firme** base de las obras proyectadas (decenas de metros).
- Para profundidades pequeñas pequeña no sirve el método reflexión, por lo que se utiliza con más frecuencia el **método de refracción**.

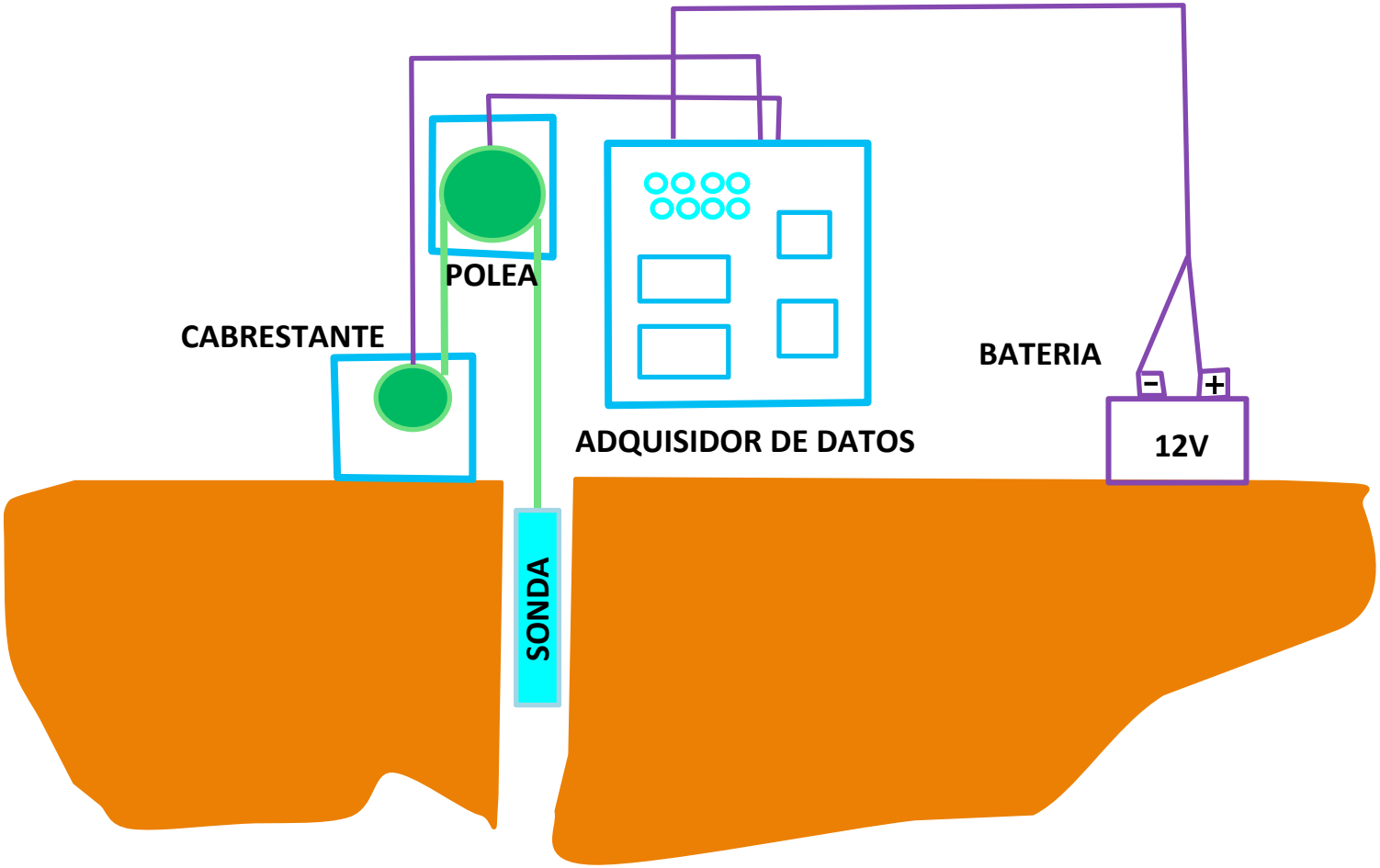


# TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA

# TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA

- La **Testificación Geofísica de Sondeos**, es una técnica de investigación del **subsuelo**.
- Esta técnica consiste en la **medida y el registro** continuo y simultáneo de diferentes **parámetros físicos**, a lo largo de toda la profundidad de un sondeo o pozo.
- Parámetros como resistividad, potencial espontáneo, polarización inducida, susceptibilidad magnética, radiación Gamma Natural, etc.).
- Para ello, se utilizan sondas multiparamétricas intercambiables, que se introducen dentro del sondeo a través de un cable.

# ESQUEMA DE UN EQUIPO DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS




http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf

# OBJETIVO

- La testificación geofísica en sondeos, se realiza con el objetivo de caracterizar los materiales perforados por el sondeo a partir de la medición de diferentes parámetros relacionados con propiedades físicas de los materiales **(resistividad eléctrica del material, velocidad de propagación de las ondas sísmicas o la temperatura y conductividad del fluido)**.

- **Las mediciones puede ser en continuo o puntualmente mediante diferentes sondas** (sensores) que se desplazan a lo largo del sondeo.

- **Este método, aporta información a la testificación geológica en dos sentidos:**
  1. **Testimonio continuo:** la variación de los parámetros físicos de los materiales a lo largo del sondeo acota la interpretación litológica visual del testimonio obtenido.
  2. **Sondeo perforado a destroza:** la testificación geofísica permite resolver cambios litológicos en zonas donde no se han podido recuperar muestras.

# APLICACIONES

- Detección de cavidades y fracturas (Riesgos Naturales, Ingeniería).
- Detección de niveles de agua, intrusiones y contaminaciones (Hidrogeología, Medio ambiente).
- Estudios geológicos para la determinación de estratos (Geología).
- Velocidad de ondas S (Sismología).
- Parámetros geotérmicos y geofísicos (Ingeniería, Geotecnia, Medio Ambiente).

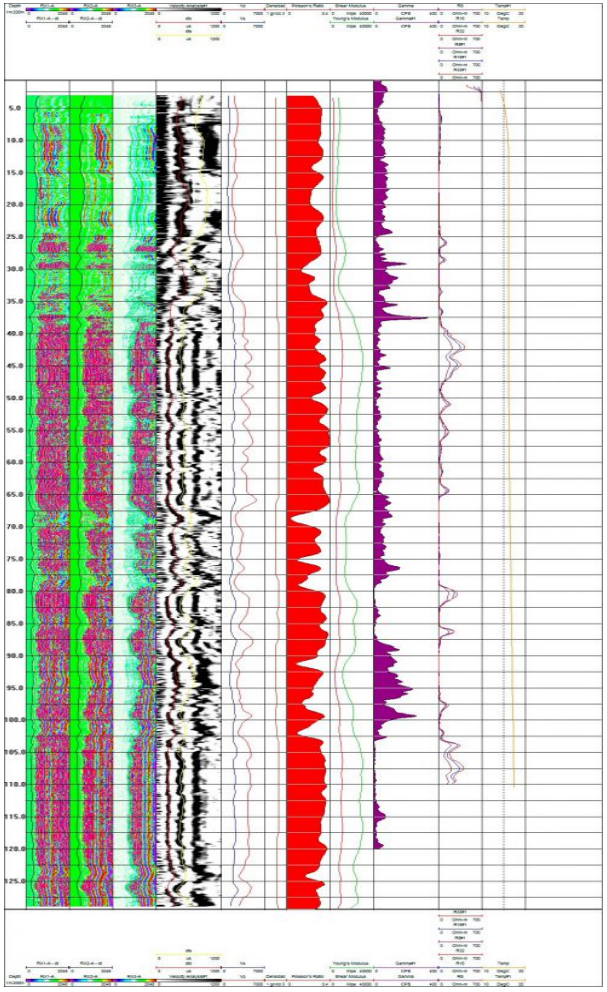
# TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA

- Las sondas de testificación geofísica, permiten medir multitud de parámetros físicos en un sondeo. Existen varios tipos de sondas, la elección de unas u otras va a depender del objetivo final del estudio.

- En muchas ocasiones, es interesante el empleo conjunto de distintas sondas, lo que permitirá una definición más clara del objeto de estudio.

- **Algunos tipos de sondas:**
  - Sonda de televiewer óptico: presenta una cámara incorporada y un prisma con el que genera una imagen continua (y orientada respecto al norte magnético) de 360° de la pared del sondeo. Permite gran información litológica y estructural.
  - Sonda de gamma natural: permite conocer la litología del sondeo, mediante registros de la emisión de rayos gamma naturales, frecuentemente asociados a niveles arcillosos.

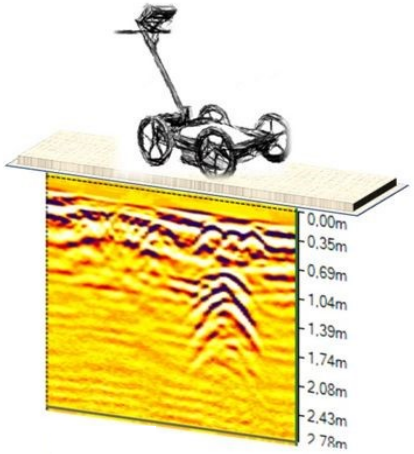
# TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA



http://ags-geofisica.com/servicios-y-tecnicas/

# GEORADAR

- El **Georradar** proporciona una imagen del subsuelo gracias a los cambios en la constante dieléctrica de los materiales que lo componen.
- Un transmisor genera un tren de ondas EM que atraviesan diferentes capas del subsuelo. Parte de la energía del frente de onda es reflejada y detectada por un receptor.
- Así se obtiene una imagen bidimensional ***"profundidad-distancia"*** del subsuelo, a lo largo de una dirección predeterminada.



# APLICACIONES PRINCIPALES

- Muy utilizada en la búsqueda de **canalizaciones** y **servicios enterrados**.
- Estudios **geotécnicos**.
- Estudios en **sondeos** para determinación de fracturas y cimentaciones.
- Exploración **geológica**.
- Estudios de **capas sedimentarias**.
- Estudios no destructivos de estructuras de **hormigón**.

# TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

- Esta técnica consiste en determinar, con una alta resolución espacial (tanto lateral como en profundidad), la distribución de la resistividad.

- A partir del análisis de un número muy elevado de medidas, se pueden obtener perfiles (2D) o bloques tridimensionales (3D), que permiten analizar las características del subsuelo de forma muy fiel y con elevada resolución.

- **El sistema consta de:**
  - Un **resistivímetro** o unidad básica.
  - Un **selector de electrodos**.
  - Un juego de **cables multiconectores** que permiten utilizar hasta 64 electrodos conmutables de forma totalmente automática a través del selector de electrodos y controlado por la unidad básica de control.

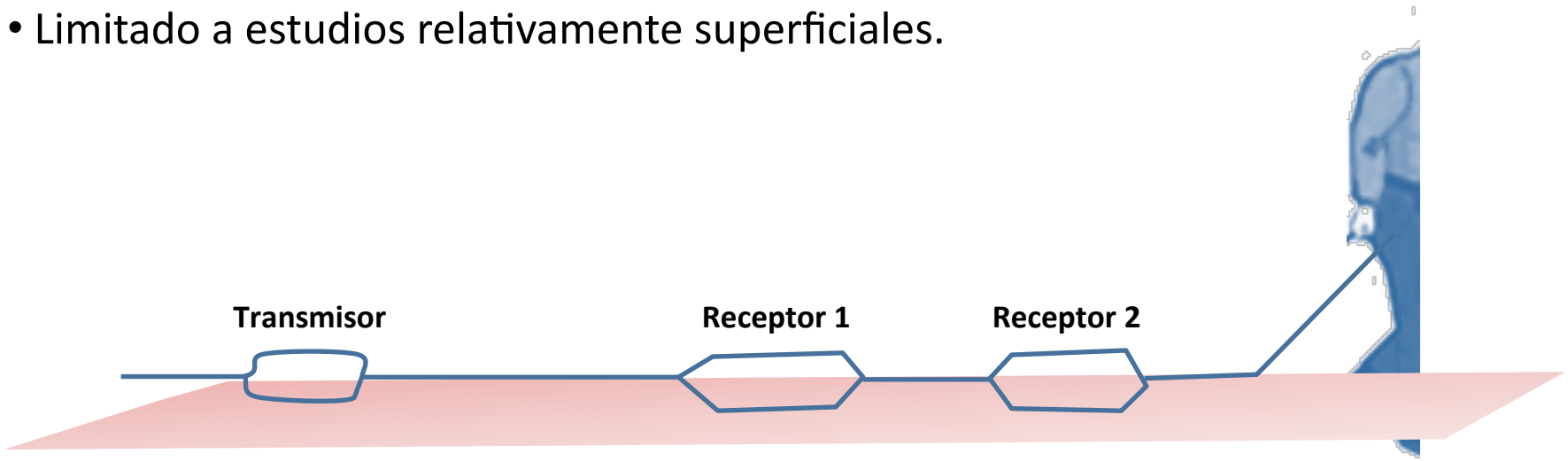
# APLICACIONES PRINCIPALES

- Búsqueda de **aguas subterráneas**.
- Detección de **cavidades**.
- Estudios **arqueológicos**.
- Estudios **geotécnicos**.
- Exploración de **yacimientos metálicos**.

https://ags-geofisica.com/

# TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA SIN ELECTRODOS

- Basado en la **prospección eléctrica** mediante **Acoplamiento Capacitivo** (CCR-del inglés, Capacitively Coupled Resistivity), este método permite medir las **propiedades eléctricas de suelos y rocas, sin necesidad de clavar electrodo alguno en el suelo**.

- **Se utiliza un dispositivo lineal formado por una antena transmisora y otra receptora, arrastrado por el operados**.

- Limitado a estudios relativamente superficiales.