

METODO IP-RES



---

---

---

---

---

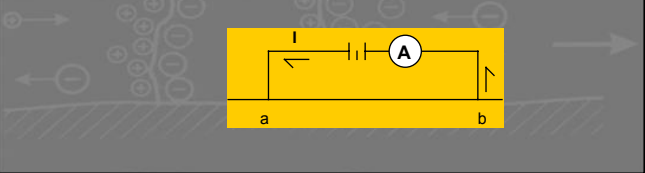
---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Corrientes eléctricas en medios homogéneos y de capas horizontales en corriente continua (SONDAJE ELECTRICO VERTICAL: SEV)

Para establecer un campo eléctrico en un medio de resistividad  $\rho$ , es necesario introducir una corriente eléctrica al terreno por medio de dos fuentes que se denominan electrodos de corriente. En la práctica un sistema de exploración geoelectrica se compone de un generador que transfiere la corriente por medio de sendos cables cuyos extremos se unen a barras conductoras que se insertan en el terreno generando un circuito eléctrico. Este transmite una corriente  $I$  a través de un medio disipativo (la corteza) de resistividad mayor que cero:



---

---

---

---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

En el caso específico de un campo eléctrico producto de una fuente de corriente continua, las ecuaciones de Maxwell se reducen a un sistema vectorial estacionario :

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$
$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

De tal forma que el campo eléctrico es irrotacional, es decir deriva de un potencial escalar  $U$ , tal que :

$$\vec{E} = -\nabla U$$

---

---

---

---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Medio Uniforme

Si la conductividad en el medio es uniforme, el gradiente de la conductividad es cero, de tal forma que el potencial eléctrico en condiciones estacionarias cumple la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 U = 0$$

Cuya solución esta dada por:

$$U = \frac{I\rho}{4\pi r}$$

Considerando la interfase tierra-aire, las condiciones de borde condicionan un flujo nulo de corriente perpendicular a la superficie. En consecuencia la determinación del potencial electrico se ve incrementada en un factor 2:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

---

---

---

---

---

---

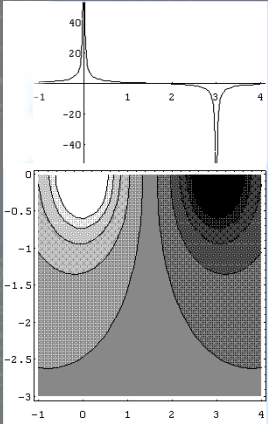
---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Medio Uniforme

En la práctica la inyección de corriente en la superficie terrestre involucra un par de electrodos por los que transita una corriente I desde el terreno y hacia el terreno, de tal forma que el potencial total es la suma de los potenciales monopoles (con signo cambiado y dependencia geométrica que es función de la posición relativa entre el punto de observación y cada polo):



---

---

---

---

---

---

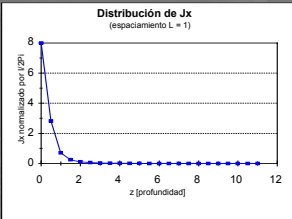
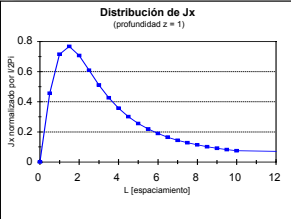
---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Medio Uniforme: Distribución de Corriente

Dependencia de la densidad de corriente con la profundidad (z) y el espaciamiento entre electrodos (L)



---

---

---

---

---

---

---

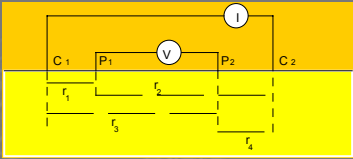
---

A medida que aumenta la profundidad para un determinado espaciamiento de electrodos, la densidad de corriente disminuye prácticamente en forma exponencial

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Medición del potencial eléctrico : definición de arreglos geo-eléctricos y resistividad aparente

Para medir el potencial eléctrico se utilizan además de los electrodos de corriente un par de electrodos en los cuales se mide la diferencia de potencial entre dos puntos:



---

---

---

---

---

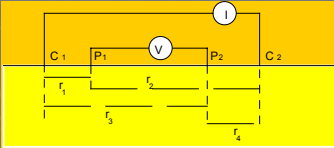
---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA

Medición del potencial eléctrico : definición de arreglos geo-eléctricos y resistividad aparente



La diferencia de potencial entre los electrodos de voltaje (P1,P2) es la diferencia de la suma de los potenciales asociados a los electrodos de corriente (C1,C2) en cada punto (P1,P2):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} = \frac{I\rho}{2\pi} G(r_1, r_2, r_3, r_4)$$

- a) Arreglo Werner :  $r_1=r_4=r_2/2=r_3/2=a$  ;  $G_W=1/a$
- b) Arreglo Schlumberger :  $r_1=r_4=(L-l)$ ;  $r_2=r_3=(L+l)$
- c) Arreglo dipolo-dipolo :  $r_1=r_4=2ln$ ;  $r_2=2l(n-1)$ ;  $r_3=2l(n+1)$  ( $n \ll 1$ ) ;

---

---

---

---

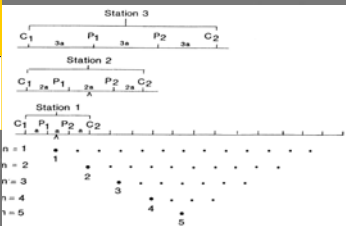
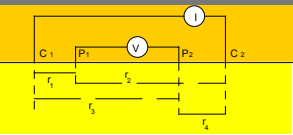
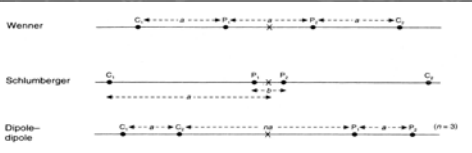
---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
GEOMETRIA Y REPRESENTACION EN PSEUDO SECCIONES DE ARREGLOS ELECTRODICOS



---

---

---

---

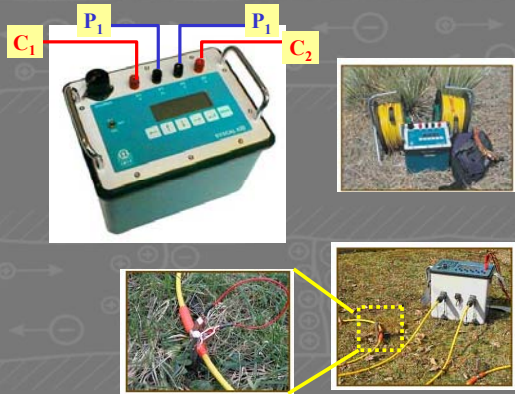
---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
INSTRUMENTACION



---

---

---

---

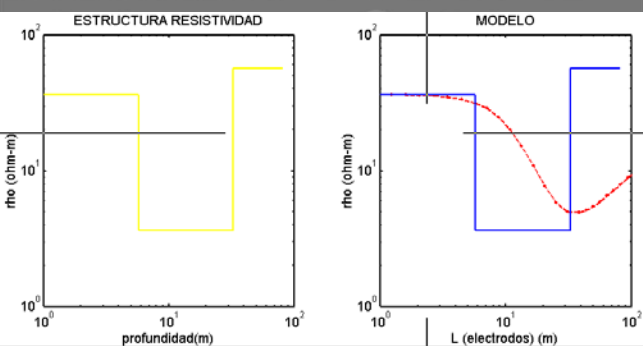
---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
MODELACION 1-D :



---

---

---

---

---

---

---

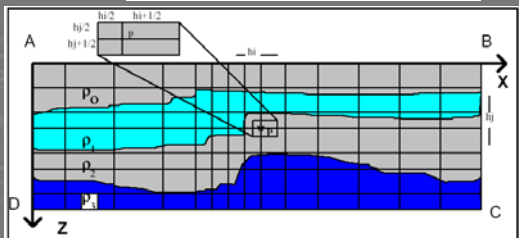
---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
MODELACION 2-D :

La ecuación de continuidad de campos eléctricos, puede escribirse en forma diferencial en términos de un potencial eléctrico (U), la densidad de corriente (q), y la conductividad (σ):

La solución numérica  
De esta ecuación exige  
Una discretización del  
Medio:

$$-\nabla \cdot (\sigma(x, z) \nabla U(x, z)) = q(x, z)$$
$$\Rightarrow \frac{\partial \left[ \sigma(x, z) \frac{\partial U}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[ \sigma(x, z) \frac{\partial U}{\partial z} \right]}{\partial z} + q(x, z) = 0$$



---

---

---

---

---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
MODELACION 2-D :

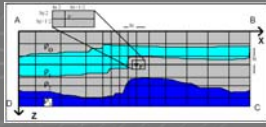
La densidad de corriente en el punto P donde se aplica corriente corresponde a:

$$q_x = \frac{4I}{(h_i + h_{i+1})(h_j + h_{j+1})}$$

Por otra parte la discretizacion permite expresar las derivadas parciales como sumas y productos de propiedades y campos en los nodos:

$$\left[ \frac{\partial \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right)}{\partial x} \right]_{(i,j)} = \frac{1}{2h} \left[ \sigma_{(i,j)} \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{h} - \sigma_{(i,j-1)} \frac{U_{i,j} - U_{i,j-1}}{h} \right]$$

$$\left[ \frac{\partial \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial z} \right)}{\partial z} \right]_{(i,j)} = \frac{1}{2h} \left[ \sigma_{(i,j)} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{h} - \sigma_{(i-1,j)} \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{h} \right]$$



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
MODELACION 2-D :

De tal forma que la ecuación diferencial para el nodo i,j se puede escribir en forma compacta como:

$$\alpha_c U_{i,j+1} + \alpha_n U_{i-1,j} + \alpha_w U_{i,j-1} + \alpha_s U_{i+1,j} - \alpha_p U_{i,j} + q_{i,j} = 0$$

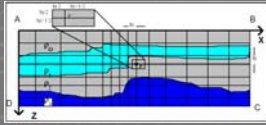
$$(\alpha_c, \alpha_n, \alpha_w, \alpha_s) = (\sigma_{i,j}, \sigma_{i-1,j}, \sigma_{i,j-1}, \sigma_{i+1,j}) / (2h^2); \alpha_p = -(\alpha_c + \alpha_n + \alpha_w + \alpha_s)$$

La solución total es un sistema de ecuaciones de nxm nodos, e igual numero de incognitas,

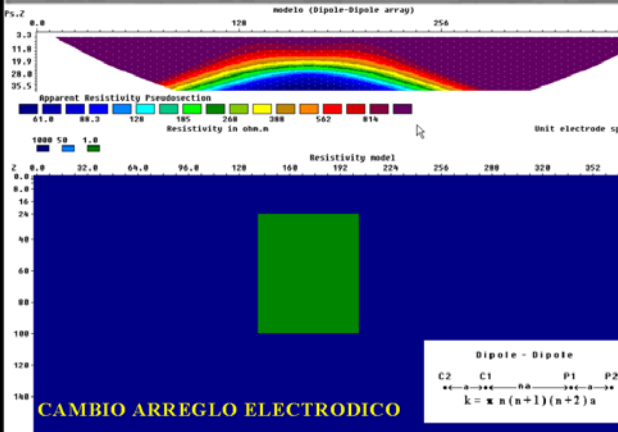
Sujetas a las condiciones de borde de flujo nulo en la superficie externa:

$$\frac{\partial U(x,z)}{\partial x} \Big|_{n,0} = 0 \quad , i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, n$$
$$\frac{\partial U(x,z)}{\partial z} \Big|_{n,0} = 0 \quad , j = 1, 2, \dots, n; \quad i = m$$

Y la inyección de corriente dada.



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS  
MODELACION 2-D :



CAMBIO ARREGLO ELECTRODICO

$$k = \frac{n(n+1)(n+2)}{6}$$

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

El método de polarización inducida ha sido ampliamente utilizado en exploración minera dada su capacidad de mapear las propiedades de polarización observadas en sulfuros diseminados.

El fenómeno de polarización inducida está íntimamente ligado a la presencia de soluciones acuosas en las cuales fluyen cargas eléctricas ante la presencia de un potencial eléctrico. En la conducción electrolytica se establece un equilibrio de cargas que demora un tiempo finito en producirse, el cual es inherente a la velocidad de transporte de los iones en un medio acuoso. Este tiempo de polarización o relajación (al eliminar la diferencia de potencial) es medible instrumentalmente. La constante de tiempo asociada a este proceso permite entonces inferir la presencia de cuerpos mineralizados.

Dos tipos de polarización han sido identificados:

- Polarización de Membrana
- Polarización Electrónica

---

---

---

---

---

---

---

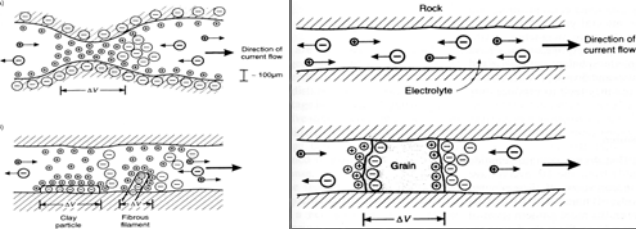
---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

En ambos casos el fenómeno puede esquematizarse en el flujo de iones en dirección opuesta al electrodo que presenta carga del mismo signo. Una vez establecido este flujo de iones la tortuosidad del medio acuoso induce la generación de barreras polarizadas con cargas de signo opuesto.

POLARIZACION DE MEMBRANA

POLARIZACION ELECTRODICA



---

---

---

---

---

---

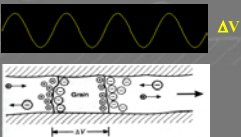
---

---

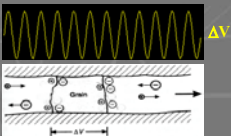
METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

DEPENDENCIAS EXTERNAS:

- superficie de contacto (mayor en cuerpos diseminados)



- frecuencia de medición (a mayor frecuencia el efecto de polarización es menor: transporte inconcluso)



---

---

---

---

---

---

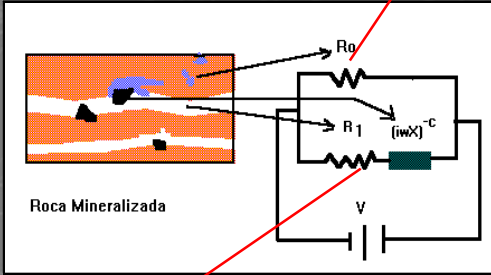
---

---

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

El fenómeno de polarización inducida puede esquematizarse en un circuito eléctrico paralelo:

Resistividad  $R_0$  (matriz rocosa)



arreglo en serie de resistividad  $R_1$  (resistividad de la solución acuosa para frecuencia cero) e impedancia  $(iwX)^{-c}$  (resistencia compleja asociada al fenómeno de polarización que depende de la frecuencia  $w$ )

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

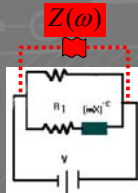
La impedancia equivalente del circuito eléctrico es el recíproco de las impedancias (o resistencias) de cada rama del sistema paralelo:

$$Z(\omega) = \frac{R_0 [R_1 + (i\omega X)^{-c}]}{[R_0 + R_1 + (i\omega X)^{-c}]}$$

Que puede escribirse como:

$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega \tau)^c} \right) \right]$$

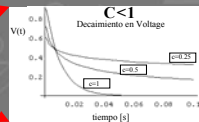
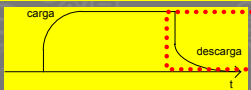
$$\cos m = \frac{R_0}{R_0 + R_1}, \quad \tau = X \left( \frac{R_0}{m} \right)^{1/c}$$



Considerando un factor  $c=1$ :

$$V(t)_{\text{descarga}} = I_o R_o - V(t)_{\text{carga}}$$

$$= I_o R_o m e^{-t/\tau} \quad \text{para } t \geq 0$$



## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

### FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

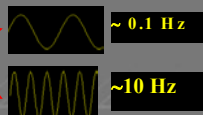
Dominio temporal (Cargabilidad (M)) :

$$M = \frac{\int_0^{\infty} V(t) dt}{V_c}$$

Dominio de las frecuencias (Efecto de frecuencia: FE):

$$FE = (\rho_{dc} - \rho_{ac}) / \rho_{ac}$$

$$= (\rho_{dc} / \rho_{ac}) - 1$$



MF (factor metalico):

$$MF = \frac{2\pi 10^5 FE}{\rho_{dc}}$$

Equivalencia:

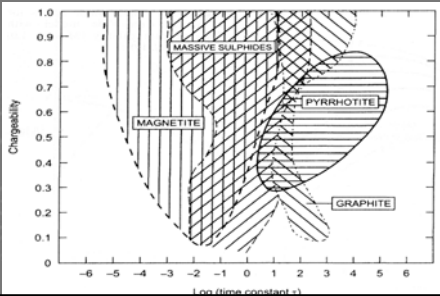
$$M \approx \frac{FE}{1 + FE}$$

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

Dominio temporal (Cargabilidad (M)) :

$$M = \frac{n}{V_c} \frac{\int_0^{\infty} V(t) dt}{V_c}$$

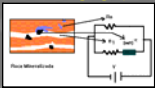


METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

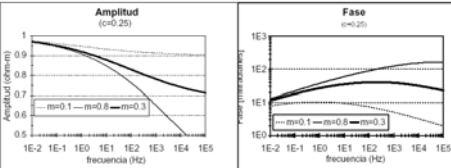
RESISTIVIDAD COMPLEJA:

La impedancia del circuito equivalente:



$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^2} \right) \right]$$
$$\cos \phi = \frac{R_0}{R_0 + R_1}; \quad \tau = N \left( \frac{R_0}{m} \right)^{1/2}$$

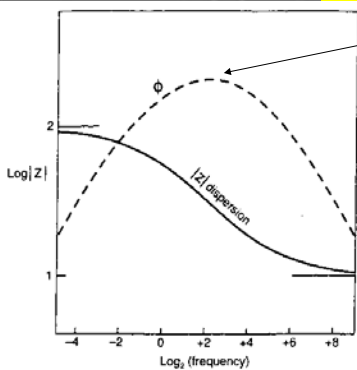
Es una resistencia compleja que puede separarse en amplitud y fase, la anomalía de fase representa el efecto de polarización



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

Relación con la Cargabilidad

$$|Z(\omega)| = \rho_o \left[ 1 - M \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^2} \right) \right]$$



FRECUENCIA CRITICA

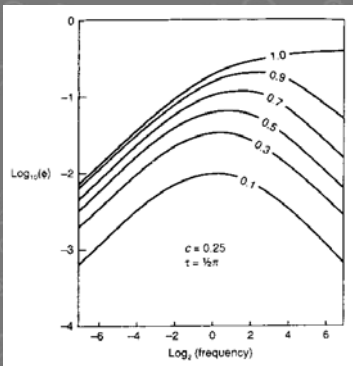
$$F_c = [2\pi\tau(1-M)^{1/2}]^{-1}$$

Log (phi)  
(relative scale)



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

Variación de ángulo de fase para distintos valores de Cargabilidad



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

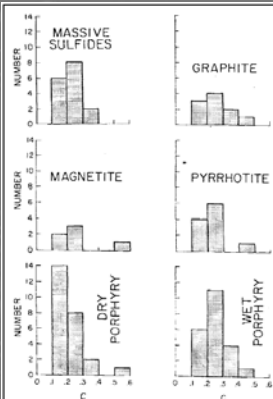
FORMAS DE MEDICION DEL EFECTO DE POLARIZACION

RESISTIVIDAD COMPLEJA:

$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left( \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

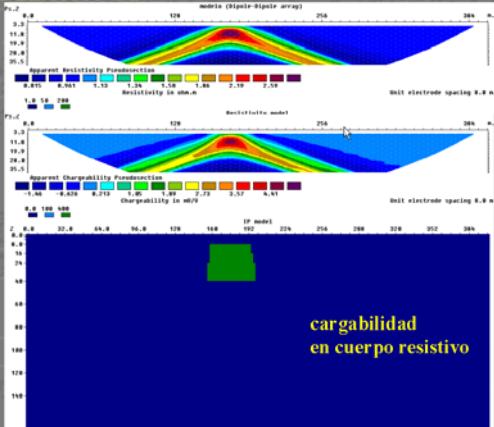
$c \text{ var: } m = \frac{R_0}{R_0 + R_1}; \tau = X \left( \frac{R_0}{m} \right)^{1/c}$

El factor  $c$  condiciona la cargabilidad en medios polarizables (en mediciones de laboratorio se establece que valores del orden de 0.1 a 0.3 son característicos de minerales de orden económico).



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA

MODELACION 2-D :



METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA  
PROBLEMAS DE OPERACIÓN EN EL CAMPO

• INYECCION DE CORRIENTE:

TERRENOS CON RESISTENCIA DE CONTACTO MUY ALTA (MEGA-OHM AMBIENTES DE CALICHE); POSIBLE SOLUCION:

- HUMEDER ELECTRODOS DE CORRIENTE CON SOLUCIONES SALINAS
- CONECCION DE UN CONJUNTO DE ELECTRODOS DE CORRIENTE A UN TERMINAL

• ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNETICO:

EN DOMINIO DE LA FRECUENCIA, EL EFECTO DE POLARIZACION SE ENMASCARA PARA SEPARACIONES ELECTRODICAS LARGAS Y ALTA FRECUENCIA: TRASLAPE CON INDUCCION MAGNETICA DE BAJA=>COPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO. PARA MINIMIZAR EFECTO:

- SEPARAR LOS CABLES DE CORRIENTE Y POTENCIAL
- ELIMINACION ANALITICA: MEDIR FRECUENCIAS ALTAS PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO EN FRECUENCIA DEL ESPECTRO TOTAL

---

---

---

---

---

---

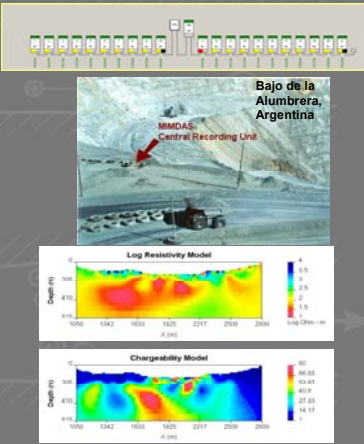
---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS CORRIENTE CONTINUA  
INSTRUMENTACION:

Sistema MIMDAS:

Resuelve los problemas de resolución del método IP-RES en ambientes de gran ruido cultural y con problemas de inyección de corriente (zonas caliche). Adicionalmente permite registrar a profundidades que duplica a los sistemas convencionales (500-700m).



---

---

---

---

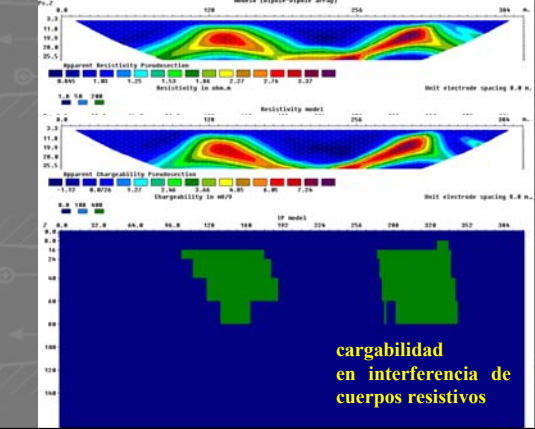
---

---

---

---

METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS POLARIZACION INDUCIDA  
MODELACION 2-D :



---

---

---

---

---

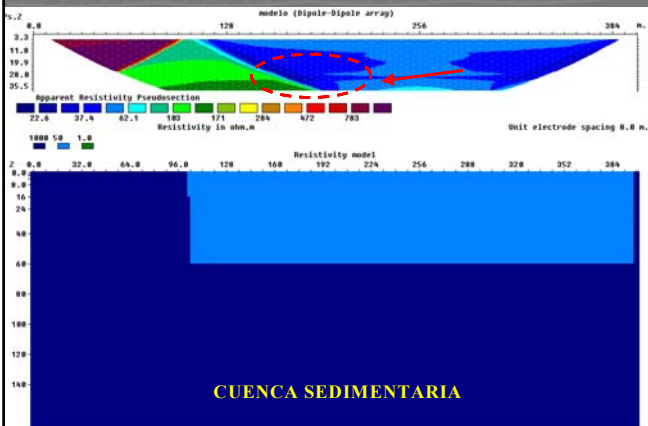
---

---

---

## METODO IP-RES: PRINCIPIOS BASICOS

### MODELACION 2-D :



## METODO IP-RES: CONCLUSIONES

- Detección de propiedades eléctricas y polarización
- Perdida de resolución con la profundidad, penetraciones de 200-400m en sistemas tradicionales, 500-800m en sistemas de ultima generación
- Problemas de inyección de corriente en ambientes muy resistivos
- Modelamiento en imágenes de profundidad con programas de inversión de 2-D (interpretación cualitativa no es confiable)
- Costos de US 800-1000/km en sistemas convencionales, en sistemas de ultima generación valores alcanzan mas de US 2,000/km