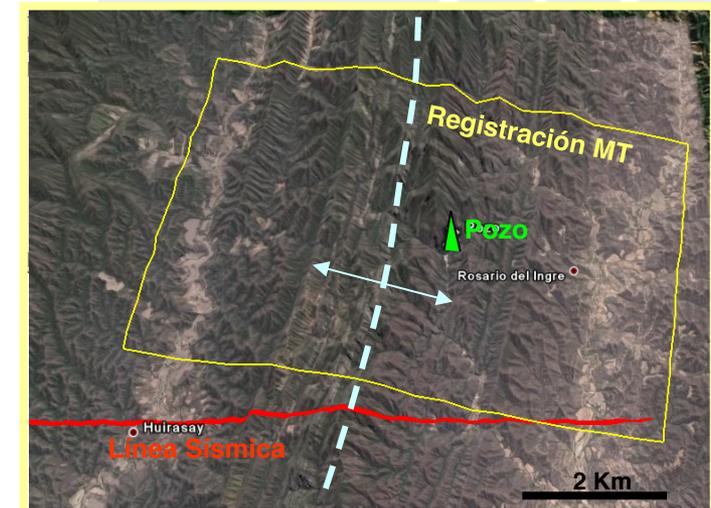
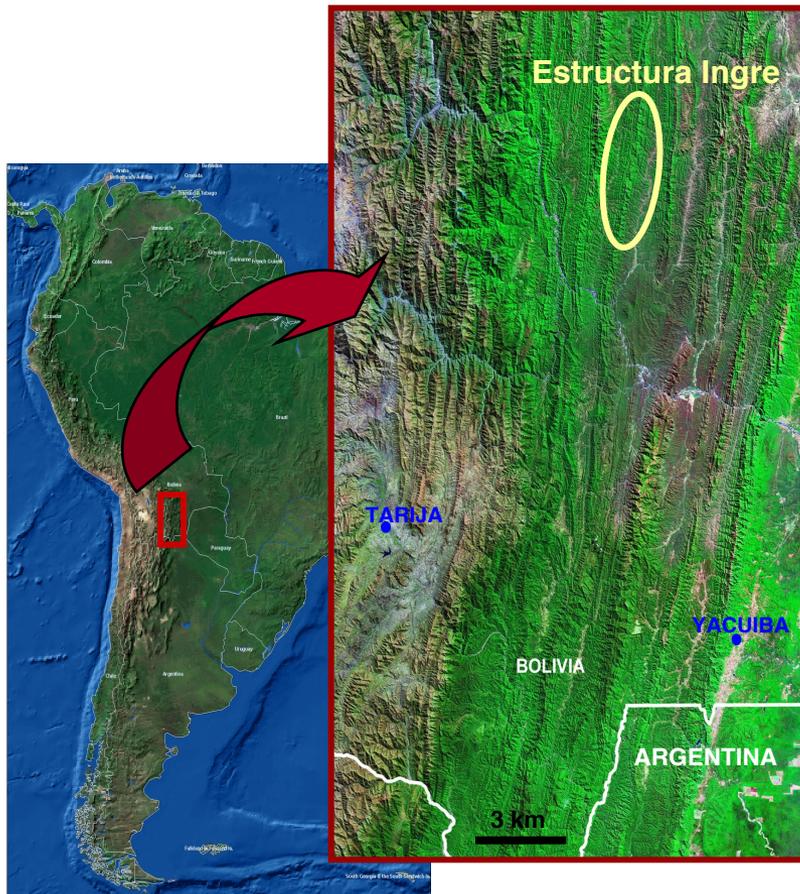


# Aplicación del Método Magnetotelúrico en el Anticlinal Ingre del Subandino Boliviano

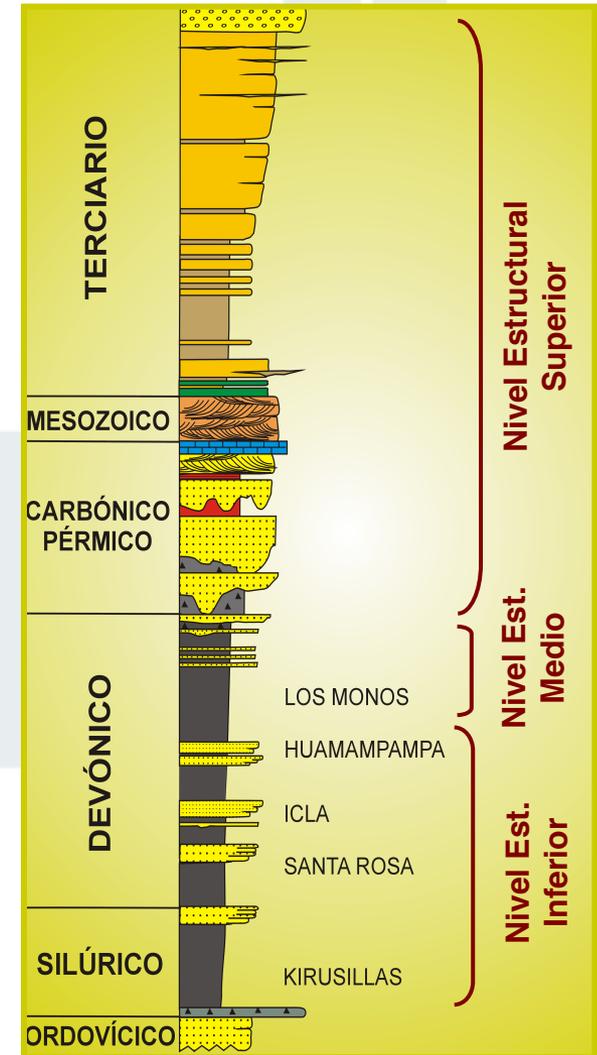
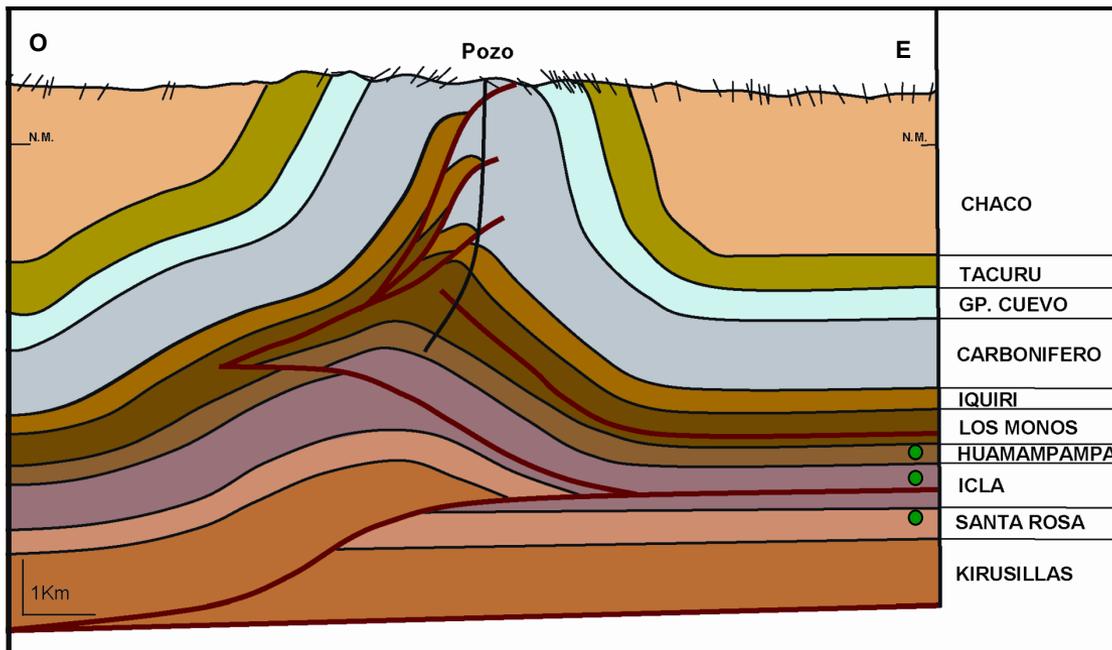
**Autores: María Emilia Muzzio  
Diego Aprea  
Alfredo Disalvo**

- En las Sierras Subandinas de Bolivia se empleó el método magnetotelúrico (MT) sobre el Anticlinal Ingre, con el fin de mejorar su interpretación estructural.
- En el área existían pocos pozos y la información sísmica era escasa y de pobre calidad.
- Para optimizar la trayectoria de un pozo exploratorio se reprocesó en profundidad la línea sísmica cercana y se registró MT sobre el anticlinal.



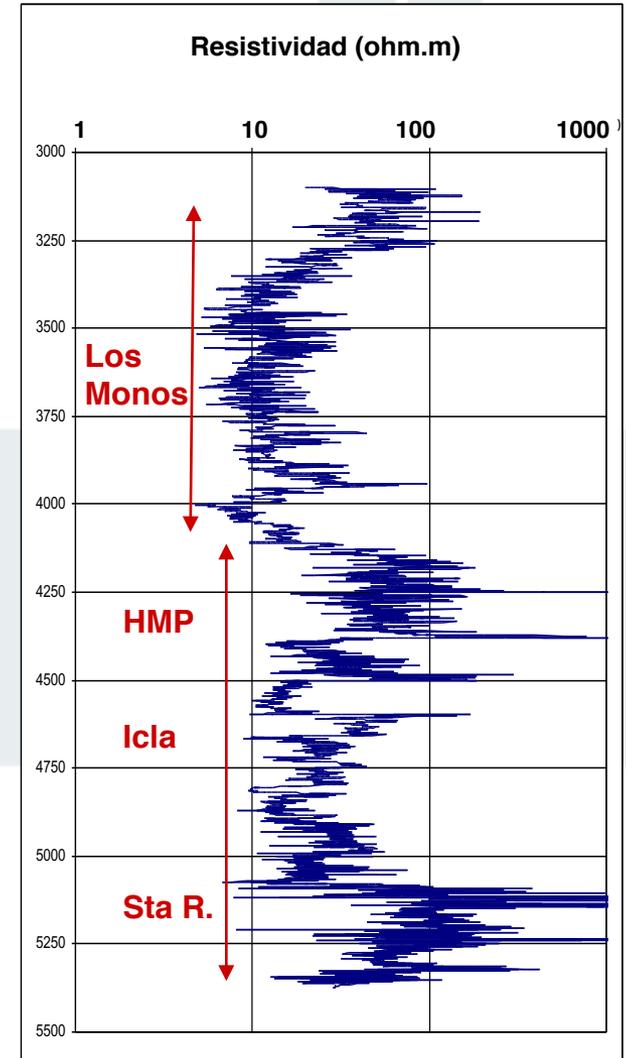
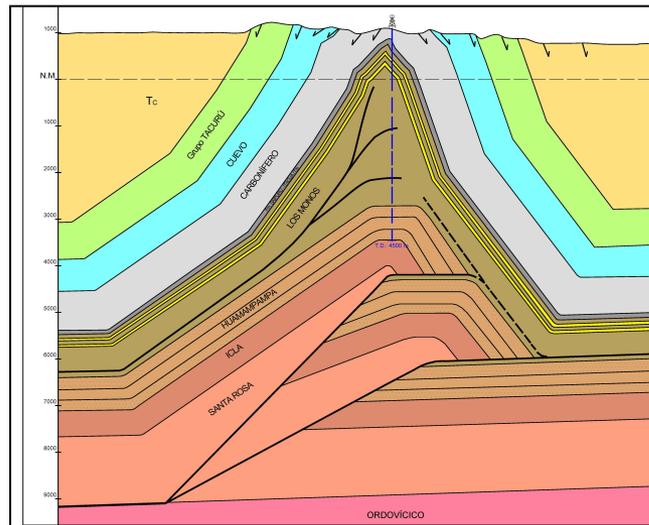
# Ambiente Geológico

- Las Sierras Subandinas Bolivianas corresponden a un ambiente tectónico compresivo, de faja plegada y corrida de lámina delgada.
- Los principales reservorios y las rocas generadoras son de edad Siluro-Devónica.
- Se reconocen 3 niveles estructurales a partir de sedimentos ordovícicos sin deformar. El nivel medio (Fm. Los Monos) suele producir una disarmonía entre el nivel inferior y el superior.



## Análisis de Factibilidad

- Antes de realizar la adquisición de MT se evaluó la respuesta y sensibilidad del método a partir del modelo estructural vigente y las resistividades medidas en pozos aledaños.
- El estudio asumió que la Fm. Los Monos tenía un contraste de resistividad importante respecto de Huamampampa. Este contraste es el que permitiría diferenciar el nivel estructural inferior del nivel medio.
- El análisis de factibilidad indicó que el método magnetotelúrico podría resolver a grandes rasgos la geometría del anticlinal profundo.



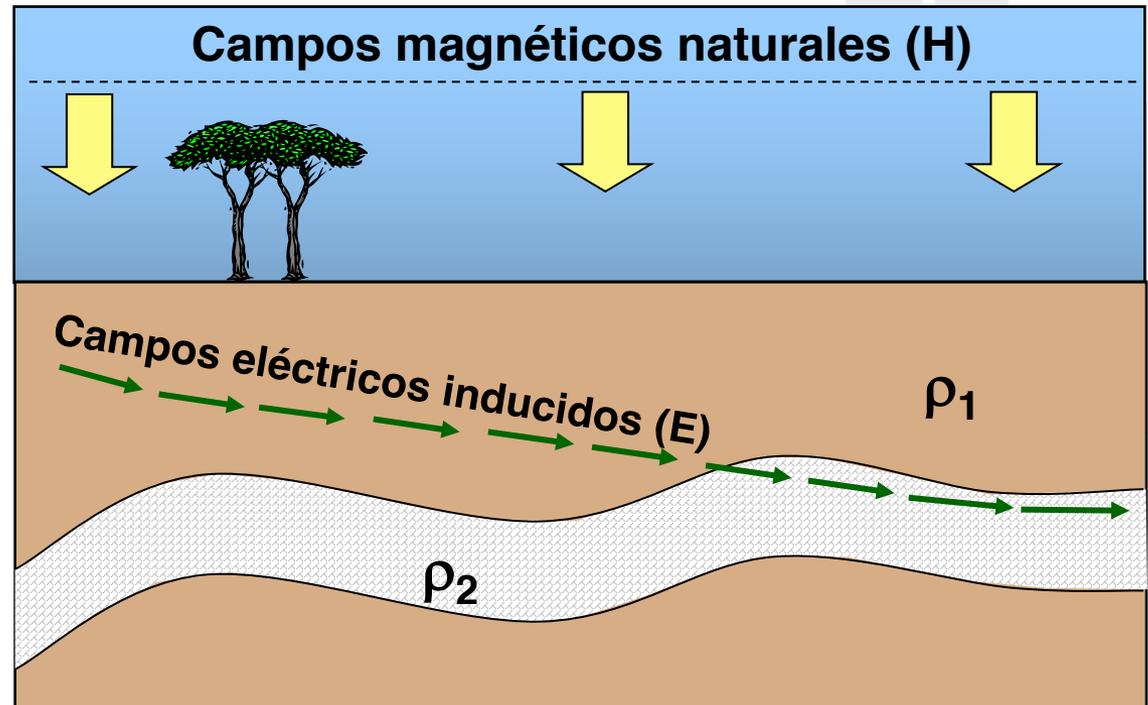
## Método Magnetotelúrico (MT)

- El método magnetotelúrico permite determinar la distribución de resistividades del subsuelo a partir de mediciones en superficie de campos eléctricos y magnéticos naturales.
- El campo magnético terrestre varía en el tiempo debido a la actividad solar y las tormentas eléctricas. Estas fluctuaciones del campo magnético (H) inducen campos eléctricos (E) en la Tierra. La relación entre ambos campos depende de las resistividades ( $\rho$ ) de las rocas del subsuelo.

$$E = Z \cdot H$$

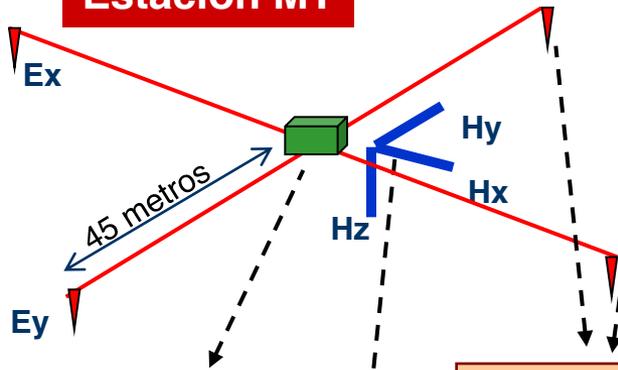
Z= Tensor de Impedancia

$$Z = F(\rho, \text{frec.})$$



# Adquisición y Procesamiento MT

## Estación MT



- En cada estación se registran las 2 componentes eléctricas ( $E_x$ ,  $E_y$ ) y las 3 magnéticas ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) por un lapso mínimo de 8 horas.
- Luego se procesan los datos medidos para obtener las curvas del tensor de impedancia en función del período.

Receptor de 5 canales sincronizado con tiempo GPS



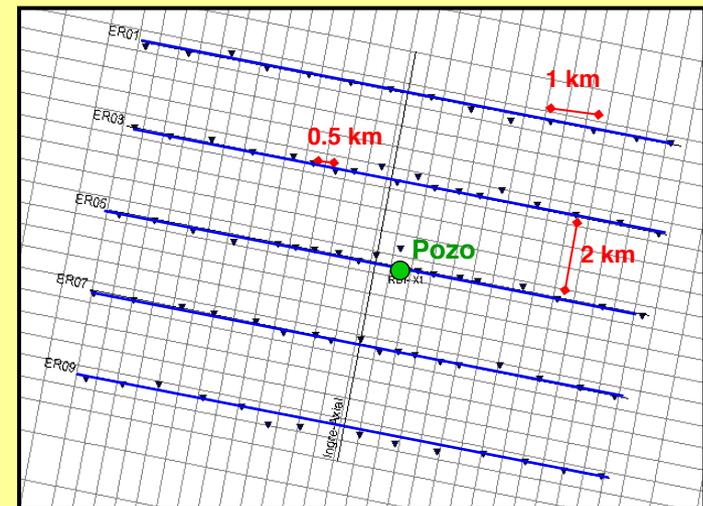
Electrodos para medición del campo eléctrico ( $E_x$ ,  $E_y$ )



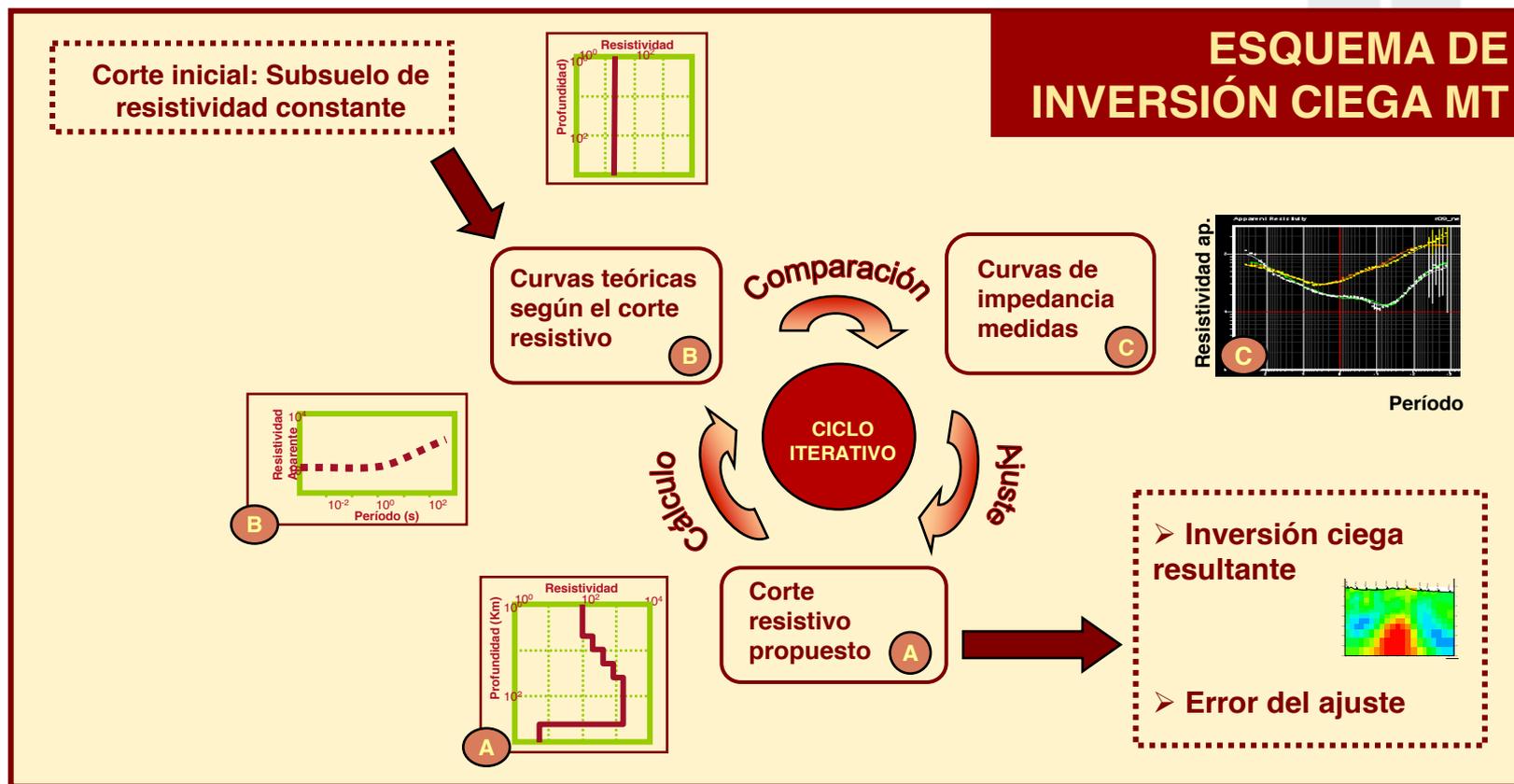
Bobinas magnéticas para medición del campo magnético ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ )



## Grilla de Estaciones MT

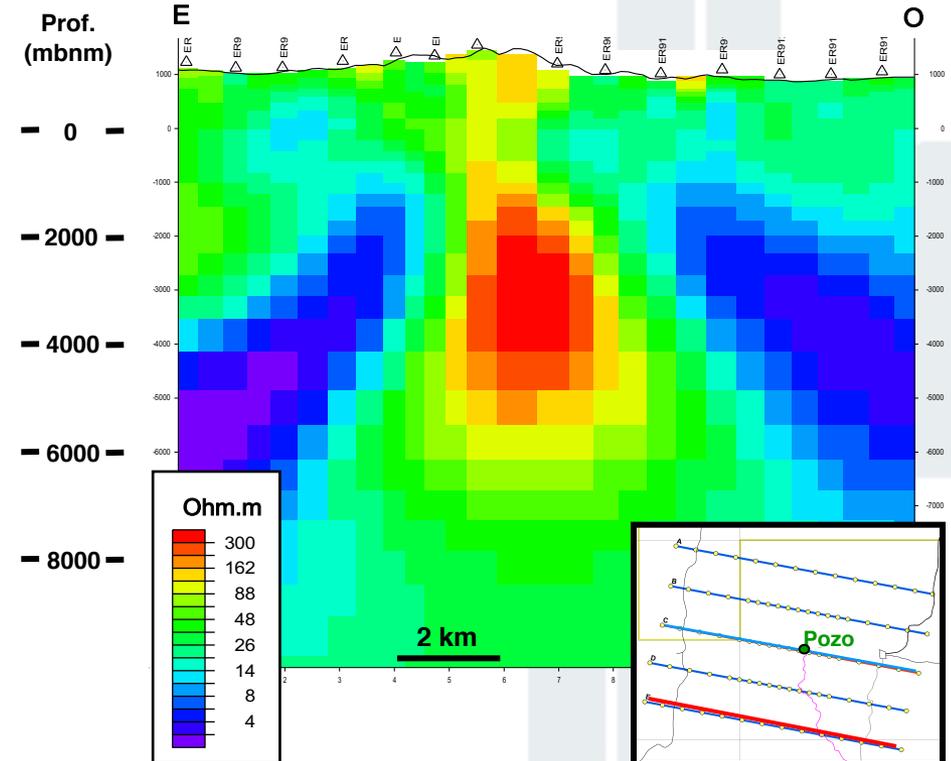
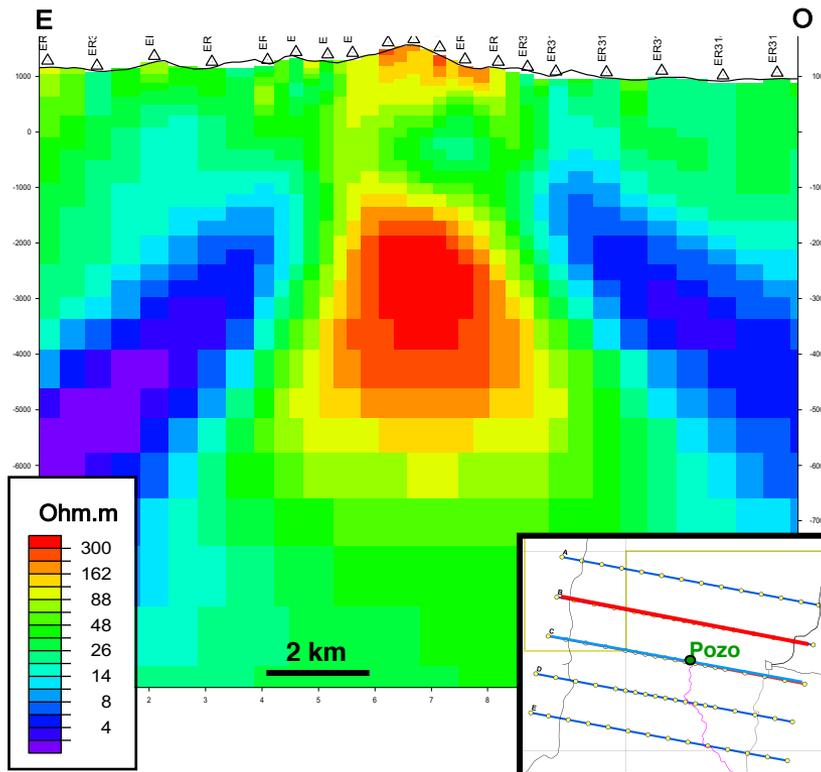


- Es conveniente invertir los datos para traducir la información del tensor de impedancia a cortes resistivos en profundidad.
- Se pueden realizar inversiones 1D, 2D y 3D ciegas o a partir de un modelo geológico.



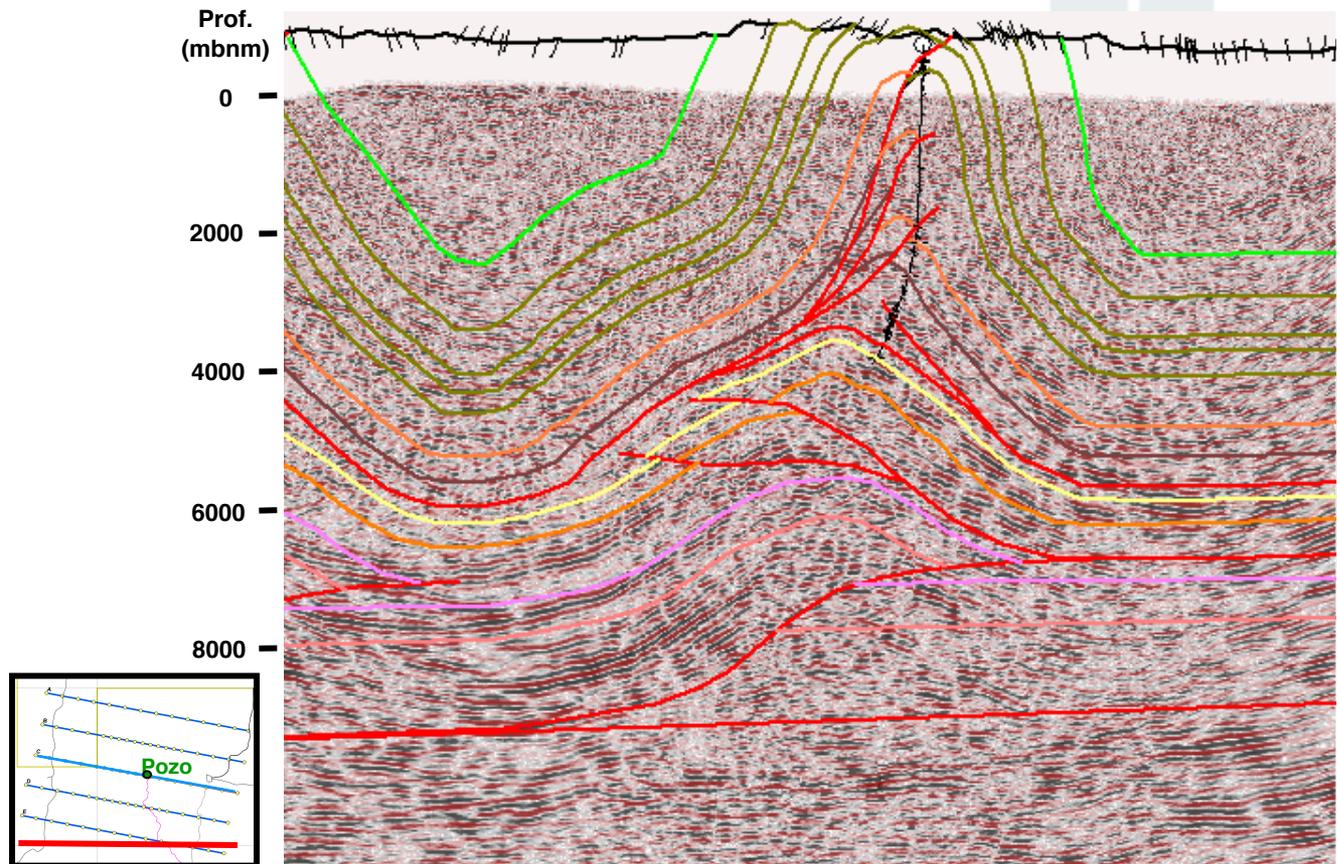
## Inversiones Ciegas 2D

- Se realizaron inversiones ciegas sobre cada línea 2D, tomando un modelo inicial de 20 Ohm.m.
- En estas imágenes se destacan las zonas conductoras de un núcleo más resistivo que correspondería a la estructura en niveles profundos. Se puede delinear bien la geometría y posición del anticlinal.



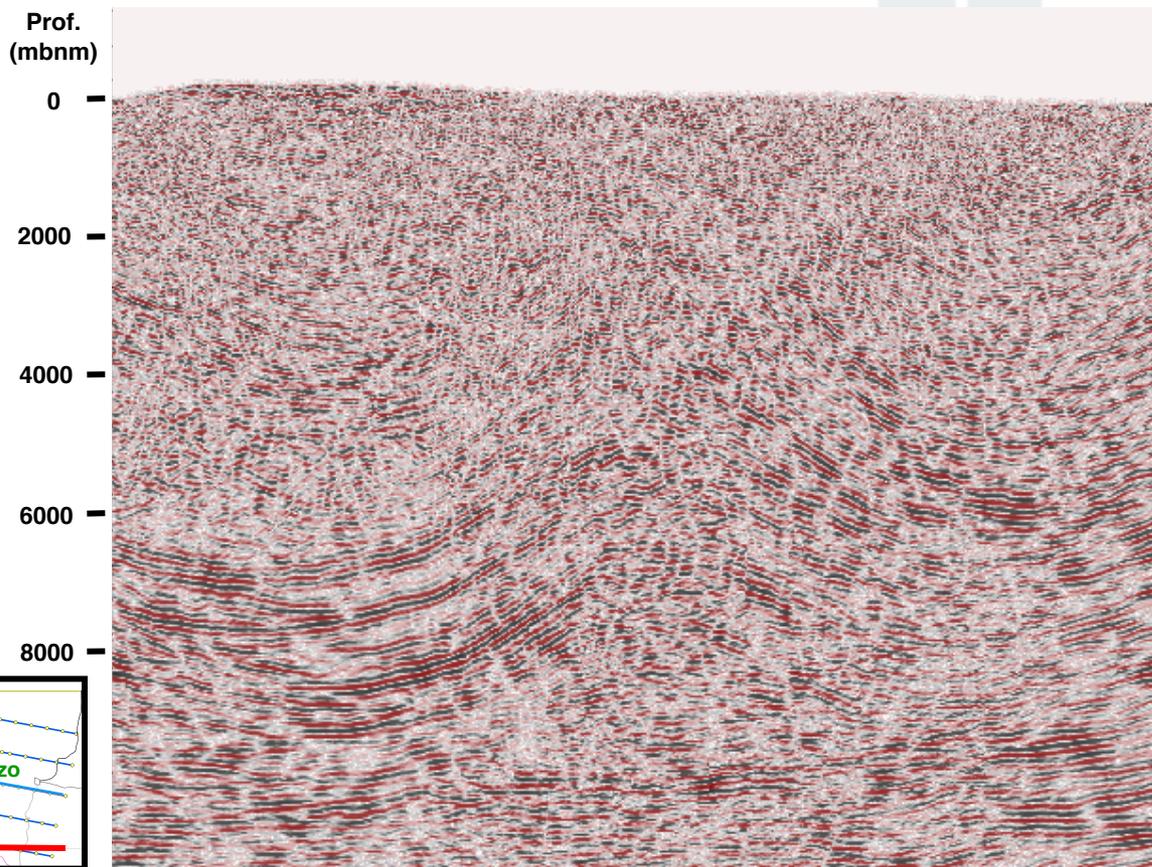
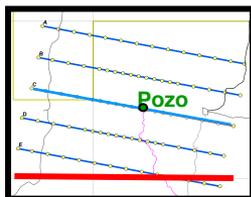
## Interpretación en la sísmica PSDM

- Se interpreta una estructura anticlinal de flancos casi verticales y fallada en su cresta.
- La estructura superficial tiene vergencia hacia el oriente, mientras que el nivel inferior tiene vergencia hacia el oeste, producto de uno o varios retrocorrimientos. Debido a esto las crestas superficial y profunda no coinciden.



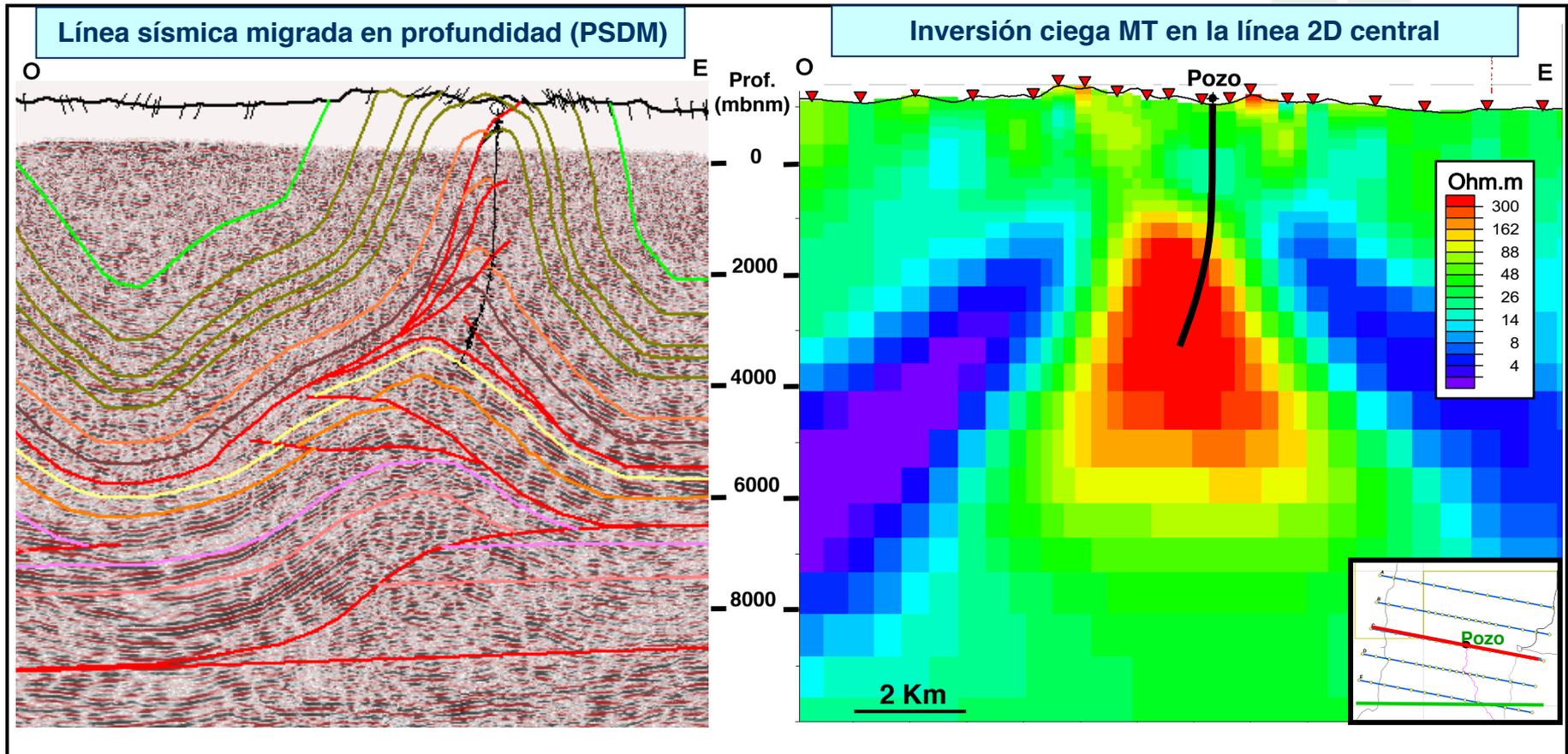
## Interpretación en la sísmica PSDM

- Se interpreta una estructura anticlinal de flancos casi verticales y fallada en su cresta.
- La estructura superficial tiene vergencia hacia el oriente, mientras que el nivel inferior tiene vergencia hacia el oeste, producto de uno o varios retrocorrimientos. Debido a esto las crestas superficial y profunda no coinciden.
- Aunque existe más información que en la línea en tiempo, en la imagen PSDM resultante es posible tener varias interpretaciones alternativas.
- El procesamiento PSDM es muy dependiente del modelo de velocidad y método empleado, por lo que resulta importante poder comparar esta imagen con datos de otra fuente.

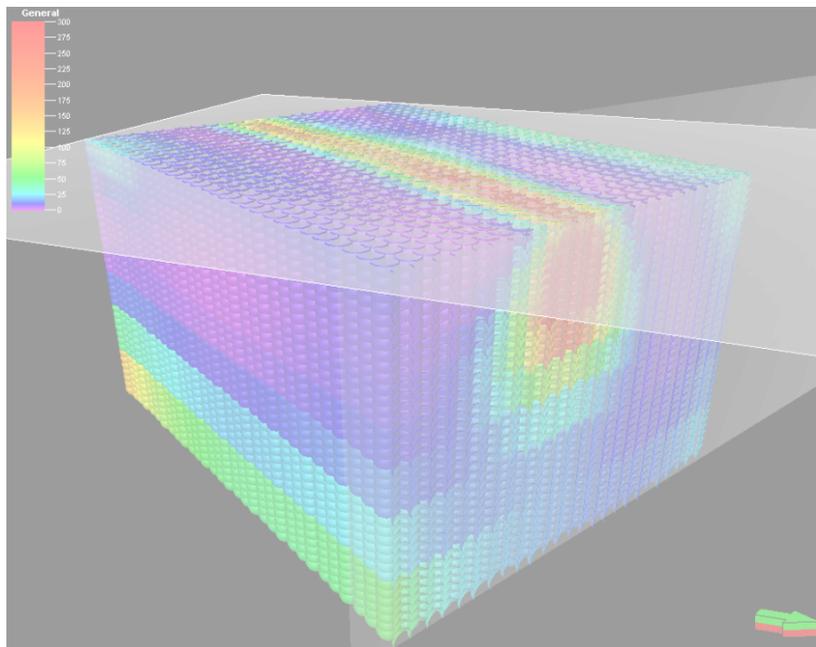


## Inversiones Ciegas 2D

- La geometría de la inversión ciega MT coincide con la interpretada en la sísmica PSDM.
- A partir de ambos resultados se decidió desviar la perforación hacia el oeste.

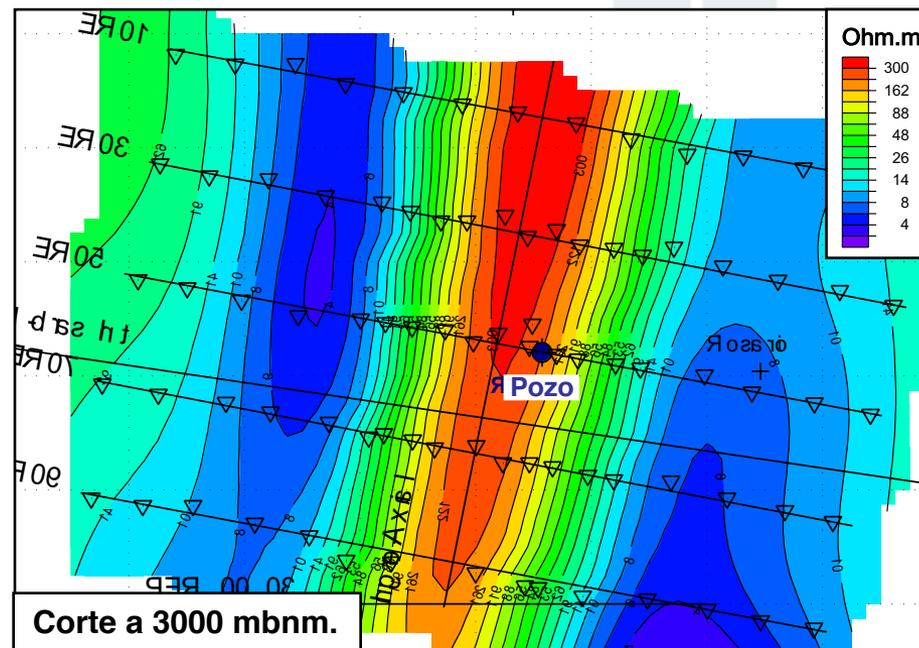


## Inversiones Ciegas 3D



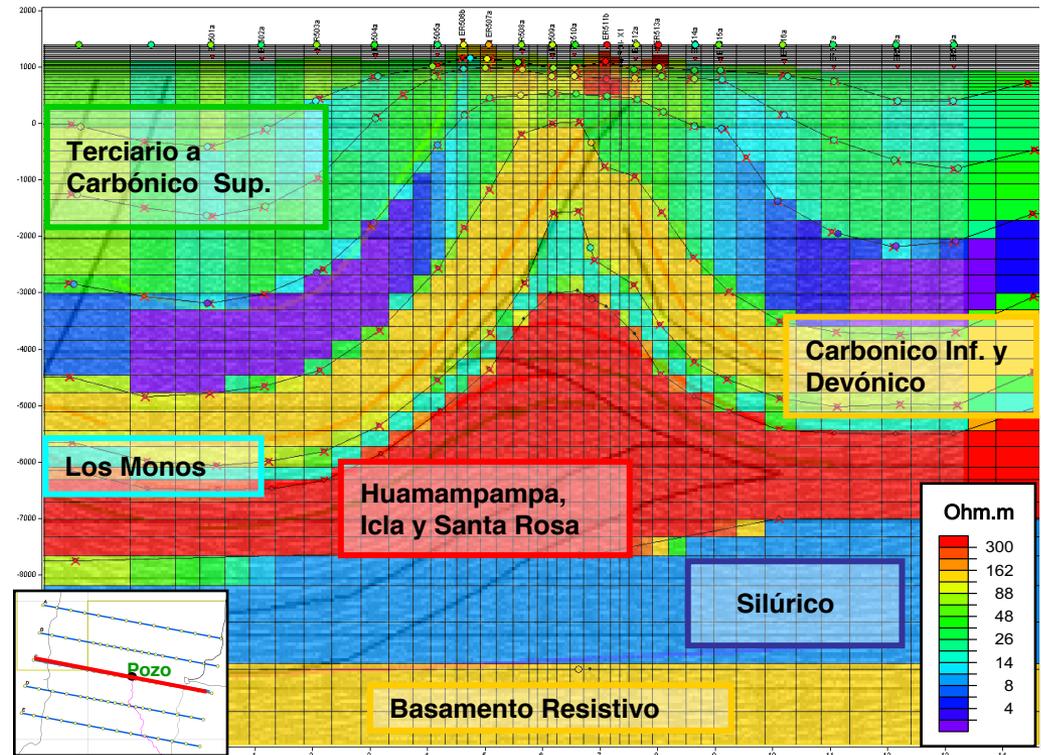
- Se obtienen invirtiendo simultáneamente todas las estaciones MT.
- Se pueden integrar con datos de geología de superficie, pozos y sísmica.
- Permiten generar diversos cortes verticales y horizontales para ver el buzamiento del eje de la estructura.

- En las inversiones 3D aparecen problemas de borde en los límites de la registración MT.
- Es conveniente interpretarlas junto con las inversiones 2D que tienen mayor detalle.



## Inversiones 2D con Control Geológico

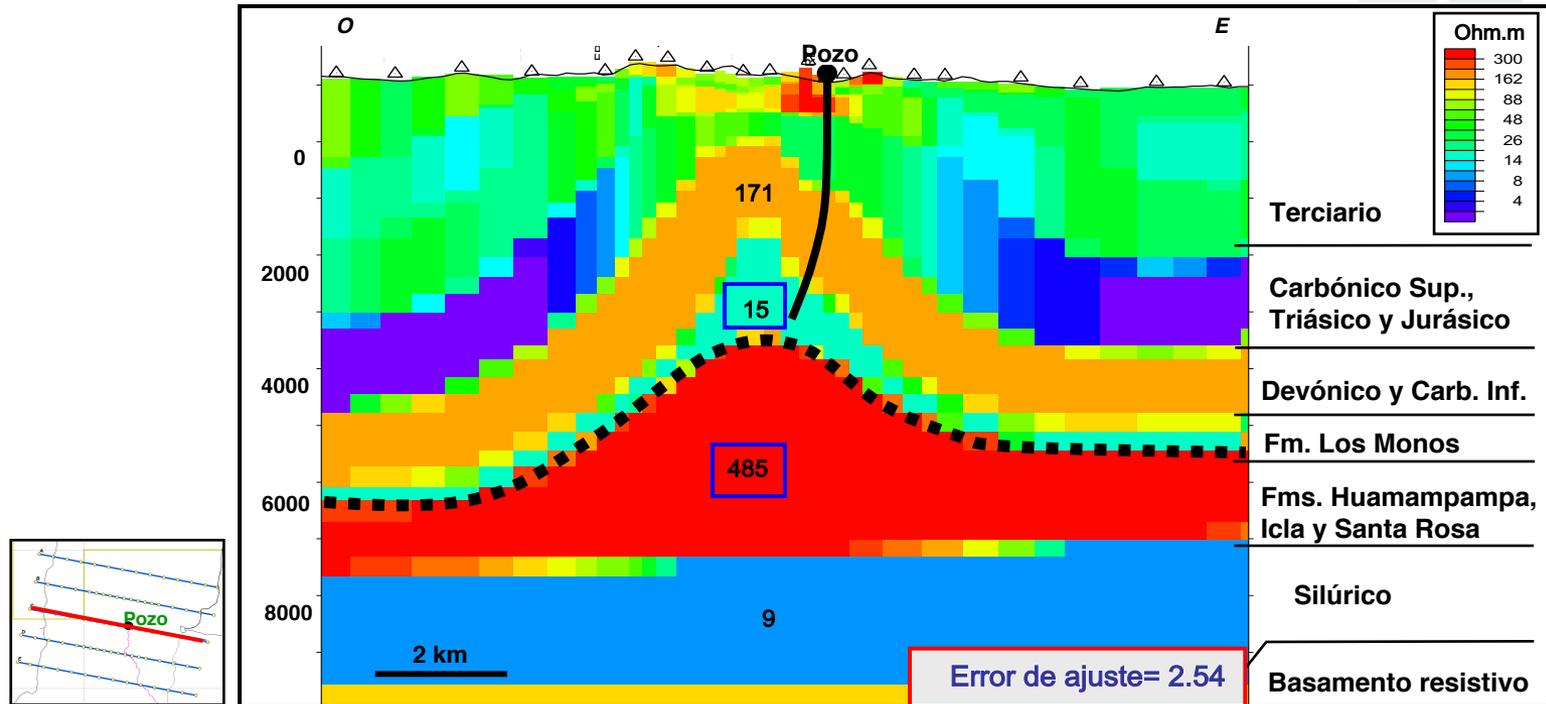
- Sobre la línea MT central se realizaron inversiones 2D controladas por el modelo geológico propuesto.
- Se fijaron diversas capas siguiendo el corte estructural y se definieron las resistividades en cada una.
- Se permitieron variaciones laterales de resistividad en las capas más someras y se asumieron resistividades constantes en las capas subsiguientes.



- La geometría propuesta quedó fija y en la inversión se van modificando los valores de resistividad de las capas, hasta minimizar el error de ajuste del corte resultante.
- El error de ajuste mide la diferencia entre las curvas de impedancia MT calculadas con el corte y las medidas. Se lo utiliza para comparar entre sí varias inversiones de este tipo.

## Inversiones 2D con Control Geológico

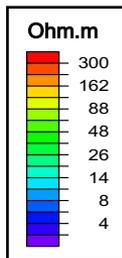
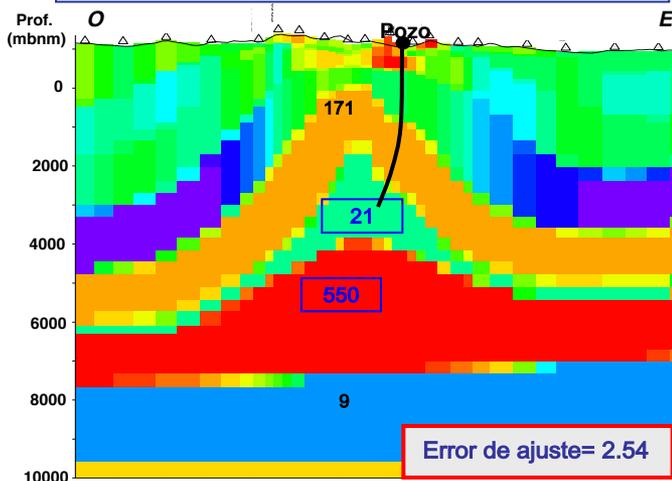
### Corte resultante de la inversión con control geológico



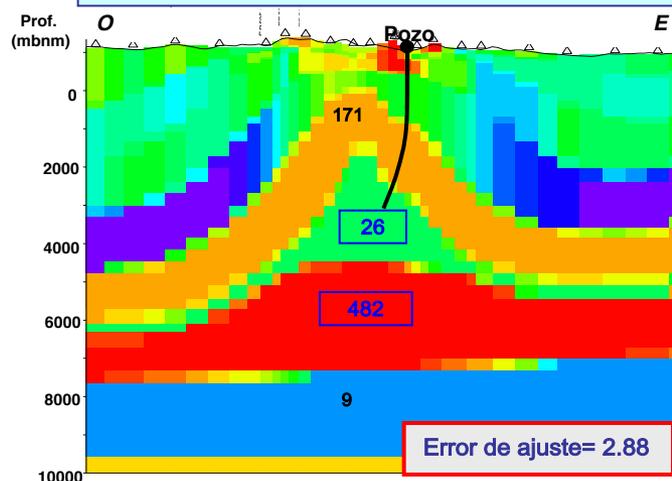
- Luego se probó la sensibilidad del modelo propuesto modificando la posición del tope de Fm. Huamampampa en el corte inicial y comparando los errores resultantes para cada geometría.
- En cada caso se fijaron como resistividades iniciales las de este corte y sólo se permitieron variaciones en las resistividades de las capas de Fm. Los Monos y Fm. Huamampampa.

# Inversiones 2D con Control Geológico Análisis de Sensibilidad

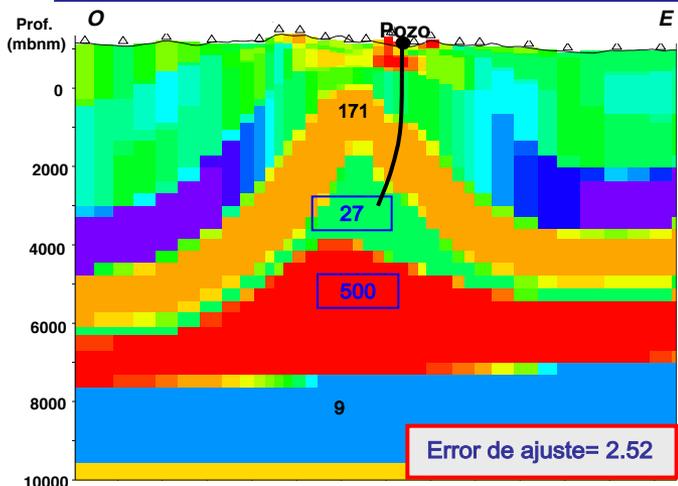
**A) Tope de Huamampampa 500m hacia abajo**



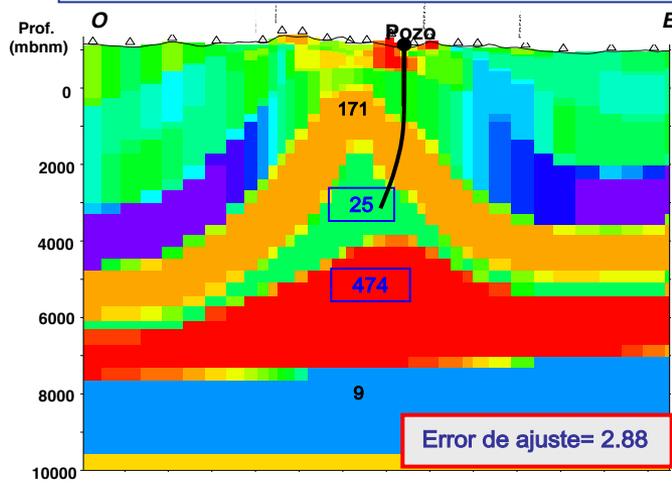
**B) Tope de Huamampampa 1000m hacia abajo**



**C) Tope de Huamampampa 500m hacia el oeste**



**D) Tope de Huamampampa 500m hacia el este**



## Conclusiones

- ◆ Los primeros resultados MT mostraron la no coincidencia del eje profundo con el superficial y resultaron fundamentales para decidir desviar la perforación a tiempo.
- ◆ Los perfiles mostraron que las resistividades de la parte media e inferior de la Fm. Los Monos eran mayores a las previstas. De modo que el tope de Huamampampa no tendría suficiente contraste resistivo como para diferenciarse. Así el tope del núcleo resistivo que se infiere en las inversiones MT correspondería a un nivel intermedio de Los Monos y no al tope de los reservorios.

- ◆ Los primeros resultados MT mostraron la no coincidencia del eje profundo con el superficial y resultaron fundamentales para decidir desviar la perforación a tiempo.
- ◆ Los perfiles mostraron que las resistividades de la parte media e inferior de la Fm. Los Monos eran mayores a las previstas. De modo que el tope de Huamampampa no tendría suficiente contraste resistivo como para diferenciarse. Así el tope del núcleo resistivo que se infiere en las inversiones MT correspondería a un nivel intermedio de Los Monos y no al tope de los reservorios.
- ◆ Las inversiones ciegas ayudaron a definir los flancos de la estructura y el eje del anticlinal en Los Monos-Huamampampa. La posición y geometría del anticlinal determinadas luego por perfiles fueron acordes a las interpretadas con MT.
- ◆ En otros sectores del Subandino el método puede ser una buena herramienta para ayudar a interpretar las estructuras profundas.

- ◆ Los primeros resultados MT mostraron la no coincidencia del eje profundo con el superficial y resultaron fundamentales para decidir desviar la perforación a tiempo.
- ◆ Los perfiles mostraron que las resistividades de la parte media e inferior de la Fm. Los Monos eran mayores a las previstas. De modo que el tope de Huamampampa no tendría suficiente contraste resistivo como para diferenciarse. Así el tope del núcleo resistivo que se infiere en las inversiones MT correspondería a un nivel intermedio de Los Monos y no al tope de los reservorios.
- ◆ Las inversiones ciegas ayudaron a definir los flancos de la estructura y el eje del anticlinal en Los Monos-Huamampampa. La posición y geometría del anticlinal determinadas luego por perfiles fueron acordes a las interpretadas con MT.
- ◆ En otros sectores del Subandino el método puede ser una buena herramienta para ayudar a interpretar las estructuras profundas.
- ◆ Algunas ventajas adicionales del método magnetotelúrico son:
  - no es afectado por zonas ciegas como la sísmica
  - los primeros resultados se obtienen en pocos días
  - el costo es sensiblemente inferior a una campaña sísmica
  - no genera impacto ambiental

# PREGUNTAS ?

# MUCHAS GRACIAS

