

CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA EN BASE A PROSPECCION GEOELECTRICA - ZONA NOROESTE DE SGO DEL ESTERO – REP. ARGENTINA

Farías Bonifacio Modesto¹; Cortes Julia del Carmen²; Thir Juan Martín³ & Storniolo Angel⁴

Resumen - Los trabajos de prospección geoelectrónica realizados en el noroeste de la Provincia de Santiago del Estero, en el límite con la de Salta, permitieron en base a las resistividades de los sedimentos establecer un esquema de las características geológicas y el funcionamiento hidrogeológico de una zona de la que no se tenía ningún tipo de información.

El Perfil Geoelectrónico oeste-este de 43 km de largo, entre el Río Salado y la Provincia de Salta, y otro norte-sur de 15 km paralelo al río, sirvieron para deducir aspectos hidrogeológicos de la Cuenca del Río Salado, ubicar estructuras, establecer contactos entre distintas formaciones, delimitar zonas de distintos tipos de agua y determinar la posibilidad del aprovechamiento hídrico subterráneo. Toda esta información fue volcada en un Block Diagrama que sintetiza los aspectos antes mencionados.

Palabras-clave - geofísica, caracterización hidrogeológica.

INTRODUCCION

En razón de la falta de información hidrogeológica del noroeste de la Provincia de Santiago del Estero por no existir perforaciones, y por tratarse de una zona, que si bien está poco habitada posee un potencial agropecuario por desarrollar muy importante, se decidió utilizar la prospección geoelectrónica con el fin de obtener una primera aproximación de las posibilidades del aprovechamiento hídrico subterráneo. La necesidad de expandir

¹ U.N.S.E. Av.Belgrano (s) 1912 – 4200 Sgo.del Estero – Telfax 0385-4222595

² U.N.S.E. Av.Belgrano (s) 1912 – 4200 Sgo.del Estero – jcortes@unse.edu.ar

³ U.N.S.E. Av.Belgrano (s) 1912 – 4200 Sgo.del Estero – thir@unse.edu.ar

las fronteras agropecuarias, requiere de un conocimiento hidrogeológico preliminar antes de realizar cualquier tipo de emprendimiento que justifiquen obras de captación, incógnita que se trató de develar en este trabajo.

UBICACIÓN

La Provincia de Santiago del Estero, está ubicada al norte de la República Argentina, entre los paralelos 26° 20' y 30° 30' de latitud sur y los meridianos 61° 45' y 64° 45' de longitud oeste (Fig.1). Los 2000 km² del área de estudio comprenden al sector noroeste del Departamento Pellegrini, cuyos límites norte y oeste colindan con la Provincia de Salta, el este con el Río Salado y al sur el Río Horcones.

ASPECTOS GENERALES

Clima: El régimen de lluvias es del tipo **Monzónico Subtropical Continental**, con un promedio anual de precipitaciones de 652 mm. El régimen térmico corresponde al **Cálido Moderado** con valores medios anuales comprendidos entre 20,1° y 21°C. El clima es **Templado Lluvioso**, variedad caliente, con siete meses de temperaturas medias mensuales superiores a 10°C. Los valores máximos de **Evaporación Potencial** media mensual, corresponde al mes de enero con 163 mm, y la mínima para junio de 26 mm. La precipitación supera la **ETP** solamente durante los meses de febrero y marzo, presentando la zona un déficit anual de 314 mm.

Hidrografía: El límite este de la zona de estudio está dado por el Río Salado, el que es de régimen permanente y nace en la Prov.de Salta, desembocando en el Río Paraná, despues de recorrer 720 km y atravesar las provincias de Santiago del Estero y Santa Fe. Su módulo en el Arenal es de 20 m³/s y el caudal máximo medio diario de transporte es de 1200 m³/s. Al sur está el Río Horcones, que nace en la Provincia de Salta, recorre con dirección NW-SE el centro del Dpto.Pellegrini, hasta desembocar actualmente en el río Salado, del que se ha convertido en un tributario debido a la acción antrópica. Es un río temporario, que lleva agua entre 5 y 6 meses en el año, tiene un módulo de 3,8 m³/s y picos instantáneos de 50 a 60 m³/s.

GEOLOGIA

⁴ U.N.S.E. Av.Belgrano (s) 1912 – 4200 Sgo.del Estero – arstorniolo@bigfoot.com

En las Sierras Subandinas, ubicadas inmediatamente al oeste de la zona de estudio afloran rocas Precámbricas a Holocenas. Las más antiguas corresponden a la Fm.Candelaria, constituídas por cuarcitas, fuertemente plegadas, que constituyen los núcleos de los Cerros Remate y Candelaria. En la pila sedimentaria superior se presenta la Fm.Anta, perteneciente al subgrupo Metán del Grupo Orán del Terciario Medio, que va desde el Eoceno Superior al Mioceno Medio. Corresponde a la parte distal de la Serie Rojiza estratificada y está caracterizada por pelitas y margas fuertemente laminadas de colores morados, verdes y amarillentos que ocasionalmente intercalan calizas oolíticas, con abundante yeso y tobas claras. La Fm.Anta es cortada por el Río Horcones a la altura de Lomas Blancas, en el límite con la Provincia de Salta. En este lugar los estratos presentan una dirección N25° y un buzamiento de 33°E. Están en contacto con unas areniscas pardas muy finas con cemento calcáreo que tienen dirección y buzamiento similar (N30° y buzamiento 35°E) las que fueron datadas como del Pampeano inferior. A unos 45 km al este de los afloramientos de Loma Blanca, la Fm Anta fue encontrada a los 800 m de profundidad, (Pozo SE-LHx2 Horcones) lo que hace pensar en un sinclinal, buzante en este punto hacia el oeste, que incluye sedimentos más modernos pertenecientes al Plioceno de la Formación Chaco (engloba material de esa edad cuando falta la Fm.Paraná). El Pampeano descrito en este punto abarca los primeros 100 m de la perforación. Estas estructuras son producto de los movimientos andinos póstumos que llegaron a plegar y fracturar sedimentos del Pampeano más antiguo (areniscas finas limolíticas de color pardo). La presencia de estas areniscas fueron detectadas al este del Río Salado a profundidades superiores a los 400 m lo que estaría indicando una fractura del sinclinal y un basculamiento de los estratos hacia el este, estructura que está señalada en el Block Diagrama. Por encima de estas areniscas se asentaron en discordancia los loess limolíticos del Cuartario Superior, peneplanizando el relieve.

HIDROGEOLOGIA

La información hidrogeológica elaborada corresponde al Cono Aluvial del Río Horcones(Tineo-Farías,et al,1998) el que es explotado intensivamente por la calidad y cantidad del recurso hídrico subterráneo, datos que corresponden a condiciones muy localizadas, que nada tienen que ver con la zona de estudio, a pesar de la proximidad de las mismas.

La documentación incluye a perforaciones de distintas profundidades realizadas en el extremo noreste (Ahí Veremos), que alumbraron acuíferos con aguas cuyos tenores

salinos van descendiendo con la profundidad; hasta los 100 m el Residuo Seco es de 14 gr/l, hasta los 150 m de 6,5 mg/l y después de los 270 m es de 1,1 mg/l. La descripción de los perfiles sedimentológicos nos hablan de arcillas pardas con láminas de yeso, intercaladas con muy pocos acuíferos de arenas finas con yeso hasta los 270 m de profundidad y desde allí y hasta los 310 m arenas finas a medianas intercaladas con escasa arcilla. La testificación eléctrica de SP y Resistividad muestra una homogeneidad de los materiales, con escasas inflexiones en la resistividad hasta los 270 m y desde esa profundidad hasta los 310 m aparecen bien definidas las zonas permeables. El nivel piezométrico de -3,00 m descrito corresponde al conjunto de acuíferos alumbrados desde los 270 m hasta los 310 m de profundidad. De la perforación de Guanaco Muerto, ubicada 15 km al oeste, se tiene información únicamente de la profundidad (310 m) y residuo seco (3,0 gr/l). En la Provincia de Salta, 50 km al oeste de la anterior, se rellenó una perforación de 50 m de profundidad que atravesó desde los 5 m pelitas de color gris verdoso con depósitos de yeso en diferentes niveles, descritas en el perfil como pertenecientes a la sección superior de la Fm. Anta.

En el extremo sudeste de la zona de estudio existe la perforación de Nuevo Simbolar realizada hasta la profundidad de 346 m, la que presenta características sedimentológicas similares a la de Ahí Veremos. En este caso, los acuíferos en explotación están entre 321-343 m, el nivel de surgencia es de +5,00 m y el Residuo Seco de 1,7 gr/l. En general se puede decir que hidrogeológicamente todas las perforaciones realizadas en la margen derecha y próximas al Río Salado explotan los mismos acuíferos, los que presentan hacia el sur, un aumento de salinidad y niveles de surgencia positivos debido a condiciones topográficas.

GEOFISICA

PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

En razón de carecer de información geológica del noroeste de la Provincia de Santiago del Estero, se decidió utilizar la prospección geoelectrica como el método más sencillo y rápido de obtener datos del subsuelo, con el objeto de caracterizar hidrogeológicamente la zona y conocer las posibilidades de aprovechamiento hídrico subterráneo.

A tal fin se realizaron dos perfiles geoelectricos de direcciones E-W y N-S, para los que se utilizó el método de Schlumberger, con un semiespaciado del circuito de emisión (AB/2) máximo de 1000 m. Fue ejecutado en el campo mediante un dispositivo tetrapolar

simétrico respecto al origen, con lo que se obtuvo una curva de Resistividad Aparente, producto de hacer circular por el terreno una corriente (I) por el circuito de emisión y medir la diferencia de potencia(V) que se genera entre los electrodos de recepción (MN).

PERFIL GEOELÉCTRICO A-A' AGUA AMARGA-AHÍ VEREMOS

Se realizaron veinticinco Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en una longitud total de 45 km, con una separación entre SEV de 1500 a 2000 m, con los que se construyó un perfil geoelectrico de dirección E-W (Ver croquis de ubicación).

ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS CURVAS DE CAMPO

La interpretación cualitativa tuvo por objeto obtener una primera idea o aproximación acerca de las características del subsuelo. En estos casos no se determinaron espesores ni resistividades absolutas, sino sirvieron para definir áreas con diferentes características y condiciones geológicas.

Para el análisis cualitativo de los SEV que componen el Perfil Geoelectrico A-A', fueron clasificadas de acuerdo al tipo de curvas. Las del extremo oeste son del tipo KQQ (Fig.1), que se mantiene desde el SEV 2274 hasta el 2276 (4 km al E), es decir valores de resistividad cada vez menores con la profundidad. A partir de allí y hasta el SEV 2295 (25 km al E), las curvas son del tipo HK (Fig.2), con su máximo en la parte central, el que va desapareciendo a medida que se avanza hacia el este (Fig.3), para continuar hasta el final del perfil (Ahí Veremos), con un tipo HK (Fig.4), que presenta el máximo en la parte terminal de la curva. Esto puso de manifiesto, una primera indicación de los cambios en los ambientes de sedimentación, con una discontinuidad muy marcada en el extremo oeste, y un mejoramiento con la profundidad de las propiedades eléctricas del subsuelo a medida que se avanza hacia el este.

INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

Si bien la interpretación cualitativa puede a veces dar resultados muy útiles, lo verdaderamente importante es la cuantitativa. Su finalidad es determinar la distribución espacial de las resistividades en el subsuelo, partiendo de resistividades aparentes observadas en el terreno.

Para la Interpretación Cuantitativa se utilizó el **Programa Resix Plus**, Interactivo, que permite también ejecutar la inversión directa y estimar un modelo de capas

directamente de los datos sin tener que construir las capas del modelo manualmente. Esto es realizado usando un modelo similar al de Koefoed (1976).

La resistividad transformada es computada desde los datos de resistividad aparente con la aplicación de un filtro lineal. Este consta de 19 coeficientes, con un intervalo de muestreo de cinco puntos por intervalo logarítmico. La reiteración de la aplicación del filtro, provee valores de la función de resistividad transformada en espaciamiento de diez puntos por intervalo logarítmico. Otra propiedad del programa, es que posibilita el análisis de equivalencias y otras series de características que lo hacen flexible a los requerimientos que plantea la interpretación de los SEV.

A efectos de relacionar la información obtenida con las características del terreno, se realizó un sondeo paramétrico frente a la perforación de Ahí Veremos (SEV2382), que tiene datos sobre las características sedimentológicas e información sobre la salinidad del agua a distintas profundidades, las que ya fueron descriptas.

Esta información fue utilizada para descomponer la parte ascendente de la curva HK en tres capas, de las que se obtuvieron los siguientes espesores y resistividades: 39m y 3,1 ohms para la cuarta capa; 104 m y 4,8 ohms para la quinta y 129 m y 13 ohms para la sexta. Este modelo conceptual se lo mantuvo para todos los SEV del tipo HK, con valores máximos al final de la curva, es decir hasta el SEV 2381.

Para la zona de la que no se tiene ninguna información, se optó para una primera aproximación utilizar el **Estimate Model de la Categoría Calculate**, con la generación del modelo automáticamente, eligiendo un error de ajuste del 1%, con el fin de obtener un número no muy reducido de capas sin complicar al modelo en la solución del problema. Analizando el **Perfil Geoeléctrico A-A'** (Fig.5), se observa en el sector oeste, límite con la provincia de Salta, valores muy altos de resistividad, (entre 230 y 100 ohms) en los primeros 15 m, que se corresponden con los conglomerados explotados como canteras de grava. En el mismo sector, inmediatamente por debajo de los mismos y hasta los 400 m de profundidad, las resistividades varían entre 1 y 3 ohms, que equivaldrían a las arcillas verdes de la Fm.Anta. Por debajo de éstas y en espesores cada vez mayores aparecen valores de resistividad comprendidos entre 4 y 7 ohms que se interpretan como representativos de los loess limolíticos del Pampeano Superior, que van disminuyendo de espesor hacia el este. Esta discontinuidad geoeléctrica observada en el extremo oeste del perfil se podría deber a la presencia de un sinclinal de dirección N-S y buzamiento este, relleno por material de diferente comportamiento eléctrico.

A partir del SEV 2381, en donde la curva de resistividad aparente se horizontaliza, comienza a aparecer en profundidad (entre los 250 y 350 m) un horizonte con resistividades entre 8 y 13 ohms pertenecientes a unas areniscas finas, con intercalaciones de arenas más gruesas descritas en las perforaciones como acuíferas que, corresponderían al Pampeano Inferior. Esta Formación pertenecería al sector ascendente del sinclinal buzante en esta zona hacia el oeste, las que se encuentran en discordancia erosiva con los loess sobrepuestos del Pampeano Inferior. La presencia de dicha estructura hace que dicho horizonte no sea detectado en el perfil a partir del SEV N°2280.

Por debajo de este horizonte resistivo, es decir desde los 350 m de profundidad, vuelven a bajar los valores, los que quedan comprendidos entre 3,1 y 5,6 ohms, interpretándose los mismos como la respuesta eléctrica de los limos arenosos del Plioceno.

La zona marcada como favorable desde el punto de vista hidrológico corresponde al sector del perfil en donde se manifiestan resistividades entre 8 y 13 ohms. A los inmediatamente contiguos hacia el oeste, en donde van descendiendo los valores, se interpretan como mezcla de aguas con distintas zonas de recarga; las provenientes del norte con tenores salinos bajos y las del oeste, con altas concentraciones de sólidos disueltos.

PERFIL GEOELÉCTRICO G-G' BABILONIA-NUEVO SIMBOLAR

A 35 km al sudeste de Ahí Veremos, comienza un perfil geoelectrico N-S paralelo al Río Salado, que va desde Babilonia hasta Nuevo Simbolar. El mismo está integrado por 13 SEV, con una separación de 1000 m y un AB/2 de 1000m(Ver croquis de ubicación).

INTERPRETACIÓN CUALITATIVA

Las Figs.6-7-8 y 9 muestran una marcada constancia en la forma de las curvas, son del tipo HK concordantes con los SEV realizados en el extremo Este del Perfil A-A'. Esta característica estaría indicando prima-facie una constancia en el tipo de sedimentos en el sentido N-S.

INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

Se realizó un sondeo Paramétrico frente al Pozo de Nuevo Simbolar, al que se le aplicó el mismo criterio de interpretación que el empleado para el tipo HK de la

perforación de Ahí Veremos, es decir que a la parte ascendente de la curva se la descompuso en tres capas que corresponden a la cuarta del Corte Geoeléctrico con 3,8 ohms y 38,43 m de espesor, la quinta tiene 7,4 ohms y 132 m y la sexta tiene una resistividad de 11,3 ohms y un espesor de 130 m.

En el Perfil geoeléctrico G-G' de 16 km de largo y dirección N-S, se puede observar una reiteración de las condiciones analizadas en el extremo este del Perfil A-A', en donde despues de un horizonte conductor con resistividades entre 0,5 y 1,6 ohms y un espesor de 15 m, comienza a elevarse la curva con resistividades que van en aumento hasta alcanzar los valores máximos entre los 250 y 300 m de profundidad con resistividades que oscilan entre 9,3 y 11,3 ohms. Esta capa geoeléctrica ha sido señalada en el perfil como favorable para alumbrar agua subterránea, a pesar de haber descendido algo los valores de resistividad detectados al norte, y elevado algo los de Residuo Seco desde Ahí Veremos hasta Nuevo Simbolar. En general se puede decir que las areniscas finas del Pampeano Inferior tienen dirección N-S y se encuentran apoyadas sobre los limos arenosos del Plioceno.

CARACTERIZACIÓN HIDROGELÓGICA EN BASE A PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

En el Cuadro N°1 se relacionan los valores de resistividades verdaderas con la litología, lo que lleva a esbozar una caracterización hidrogeológica general, referidas éstas a permeabilidades y tenores salinos de los acuíferos incluidos.

Cuadro Nº 1

Litología	Edad	Resistividad Ohms/m	Caracterización Hidrogeológica
Arcillas rojas Arcillas verdes	Cuartario (retransportadas) Mioceno (Fm.Anta)	1 - 3	Sedimentos de muy baja permeabilidad y acuíferos muy salinos (25 gr/l)
Loess Limolítico	Pampeano Superior	4 – 7	Sedimentos de baja permeabilidad que incluyen pequeñas capas arenosas. Acuíferos salinos (6-15 gr/l)
Areniscas Pardas Finas	Pampeano Inferior	8 - 13	Muy buena permeabilidad. Acuíferos con tenor salino Bajo (1-2 gr/l)
Areniscas rojas	Cuartario (retransportadas)	25 - 100	Pueden presentar buena permeabilidad por descementación. Acuíferos cuya química puede mejorar influenciada por recarga local (topográfica)
Conglomerado	Mioceno (Fm.Anta)	100 - 230	Superficiales, no constituyen acuíferos

Block Diagrama

Con toda la información recopilada referida a la zona del Río Horcones y la deducida mediante el análisis de perforaciones y perfiles geoelectricos, se confeccionó un Block Diagrama, en el que se sintetiza esquemáticamente la Geología e Hidrogeología del noroeste de la Provincia de Santiago del Estero. El corte realizado a los 26° 18' de latitud sud, corresponde a una zona no incluida en el área de trabajo, pero se optó por incorporarla dado la apoyatura geológica que tiene el estudio del Cono Aluvial del Río Horcones.

El corte de los 25°42' de latitud sur coincide exactamente con el Perfil Geoelectrico A-A' (Ahí Veremos-Agua Amarga). Los datos del estudio geofísico fueron llevados a

términos geológicos con la esquematización de las estructuras que aparecen distorsionadas por las diferencias entre las escalas horizontal y vertical.

CONCLUSIONES

1 – La zona de estudio forma parte de un sinclinal de carácter regional fracturado a la altura del Río Salado, y basculado hacia el este.

2 – Las areniscas de grano muy fino aflorantes en las Tomas serían las mismas que se atraviesan a los 250 m de profundidad en las perforaciones próximas al Río Salado.

3 – Estas areniscas están recargadas desde el norte por el Río Salado y posiblemente se encuentren en esa zona en niveles superiores.

4 – La no detección mediante geoelectrica de estas areniscas desde Guanaco Muerto hacia el oeste, se debe a su buzamiento en esa dirección

5 – Las mejores posibilidades de aprovechamiento hídrico subterráneo están circunscriptas a una franja norte-sud de 15 km de ancho paralela al Río Salado.

6 - Hacia el oeste, en una zona de 10 km de ancho, contiguo al anterior, la mezcla de aguas provenientes del norte y el oeste, llevarían la calidad química a la categoría de apta para ganadería.

7 – Las areniscas rojas podrían albergar agua freática de regular calidad química (para hacienda) siempre que haya una recarga localizada en depresiones topográficas.

8 – En las otras zonas las posibilidades de aprovechamiento de las aguas subterráneas son escasas, casi nulas.

BIBLIOGRAFIA

Johansen,H.K.,(1975) "An interactive Computer/Graphic-Display-Terminal System for interpretation of resistivity soundings" Geophysical Prospecting Vol.23 pp:449-458.

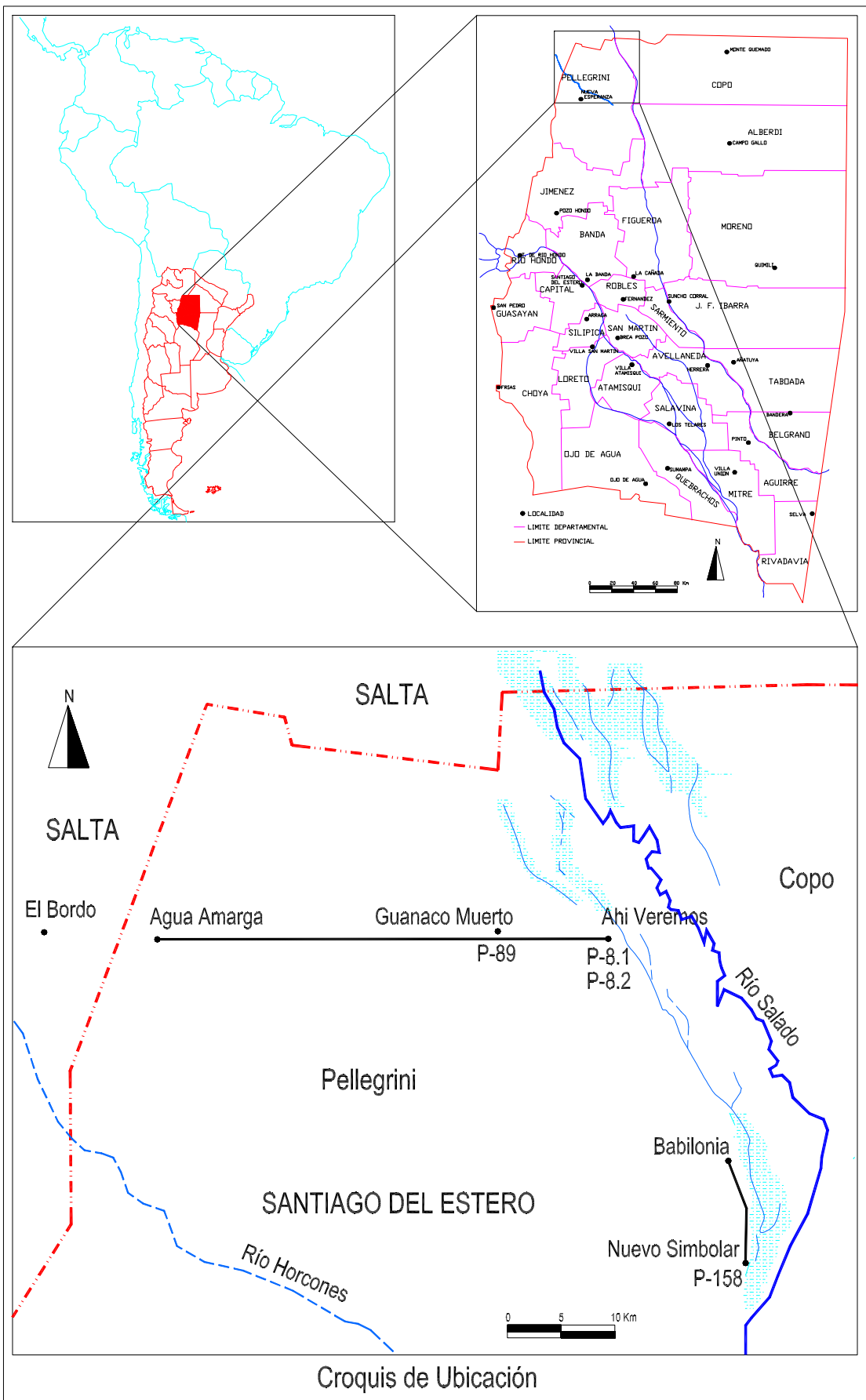
Koefoed, O.,(1979) "Resistivity sounding on an earth model containing transition layers with linear change of resistivity with depth.Geogh.Prospect.,27,p.865-875.

Orellana,E., (1982) "Prospección geoelectrica en corriente continua" Ed.Paraninfo – Madrid

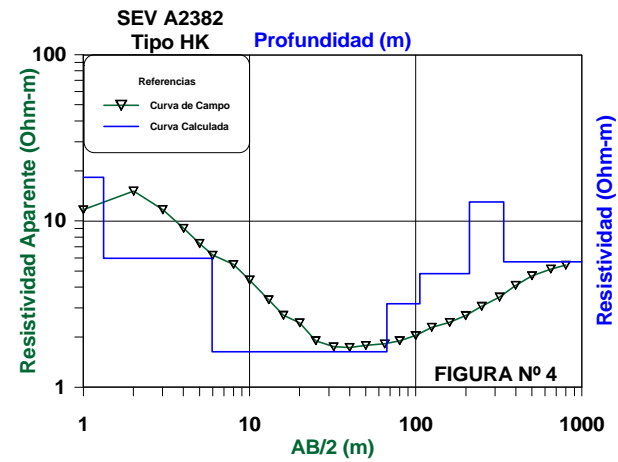
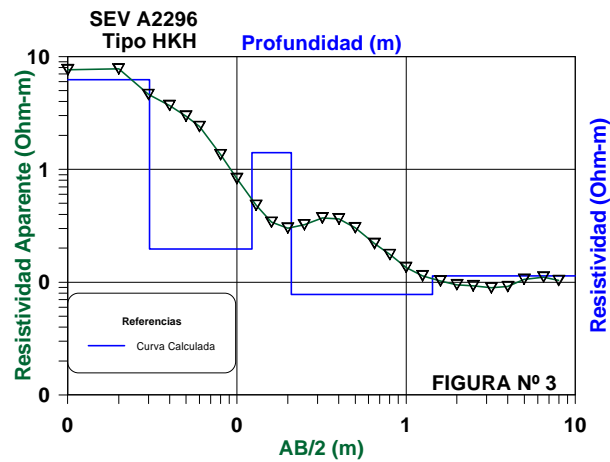
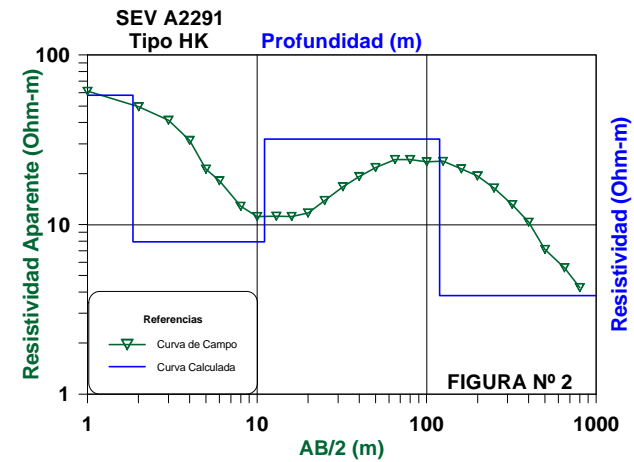
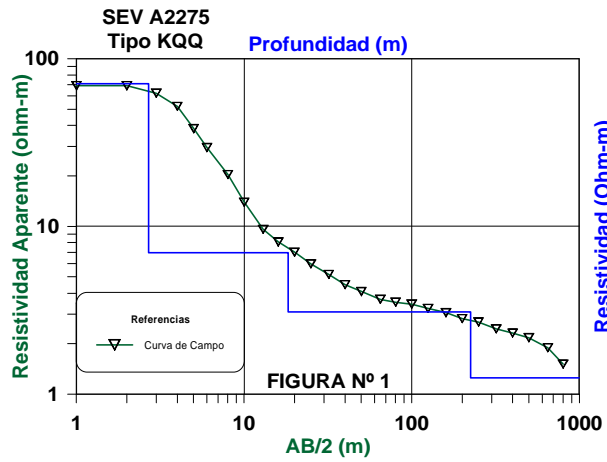
Pous,J.,Marcuello,A., and Queralt,P., (1987) "Resistivity inversion eith a priori information". Geophysical Prospecting 35, pp.590-603.

Russo, A., Ferello, R., y Chebli, G., (1979) "Llanura Chaco Pampeana" Segundo Simposio de Geologia Regional Argentina – Academia Nacional de Ciencias de Córdoba-Vol.1-pp139-184.

- Tineo,A.,Farías,B.,Avila,E.,Cortés,J.,Pavón,J.,Storniolo,A.,Tarchini,I.,Thir,J.,1998)"Estudio Hidrogeológico del Pie de Monte Oriental de las Sierras Subandinas de Santiago del Estero (Dptos. Jimenez y Pellegrini)- Cuarto Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea – Memorias – Volumen 1 – pp169-189. Montevideo - Uruguay
- Zohdy, A. R.,(1989)"A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner soundings curves". Geophysics, Vol.54, N°2,pp.245-253.



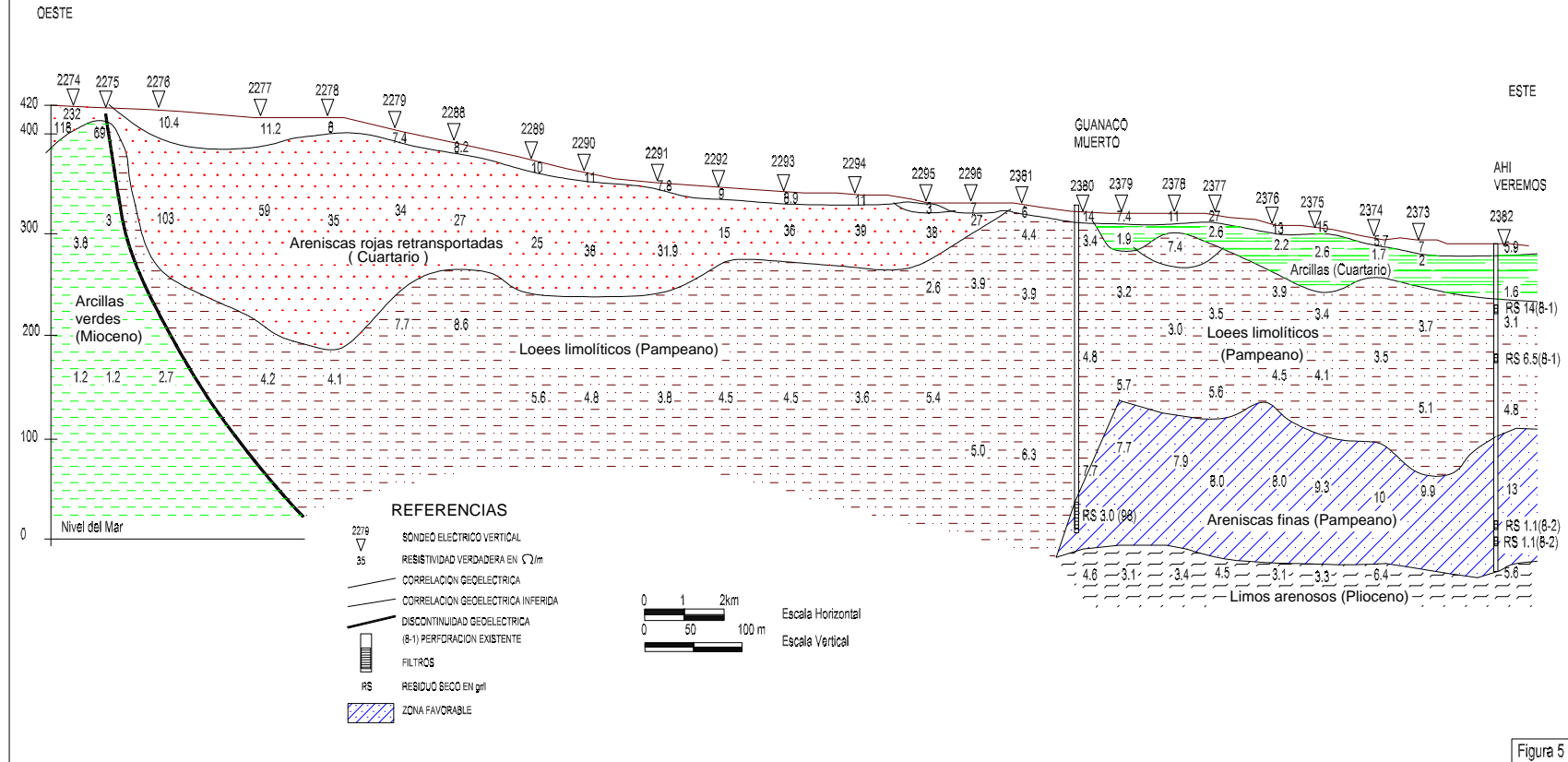
SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES
PERFIL GEOELECTRICO A-A'
DPTO. PELLEGRINI – PROV. SGO. DEL ESTERO
ARGENTINA
ANALISIS CUALI – CUANTITATIVO



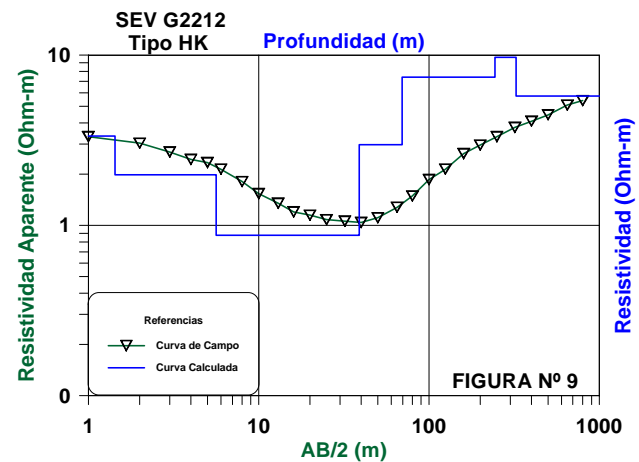
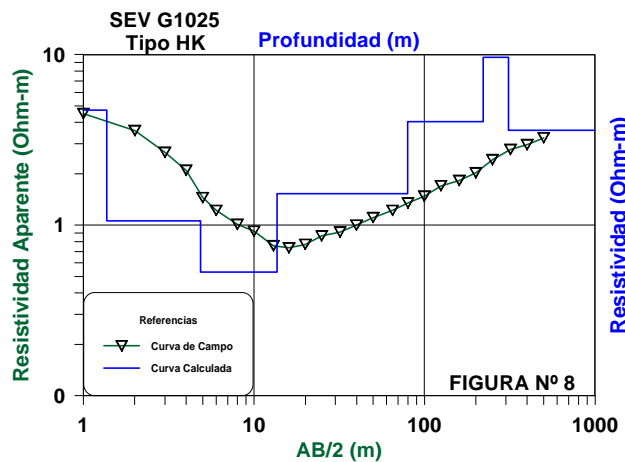
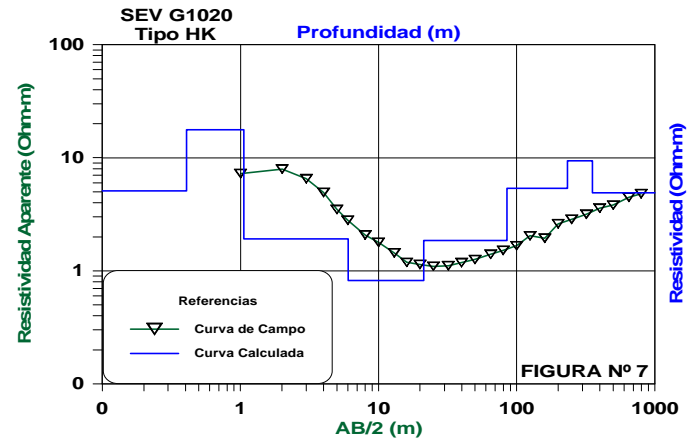
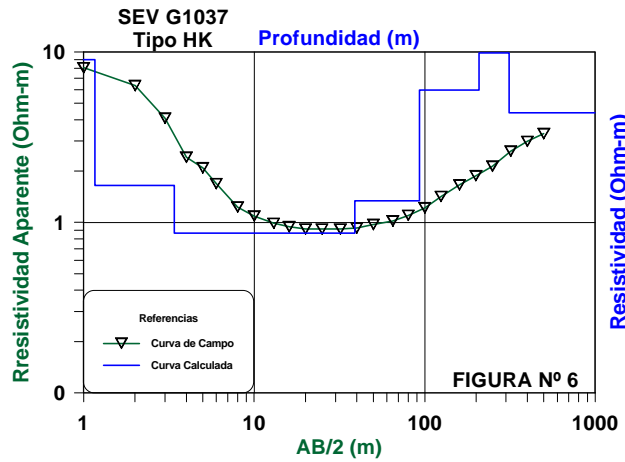
PERFIL GEOELECTRICO A-A'

AGUA AMARGA - AHI VEREMOS

DPTO. PELLEGRINI - SANTIAGO DEL ESTERO



SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES
PERFIL GEOELECTRICO G-G'
DPTO. PELLEGRINI – PROV. SGO. DEL ESTERO
ARGENTINA
ANALISIS CUALI- CUANTITATIVO



PERFIL GEOELECTRICO G-G'

BABILONIA - NUEVO SIMBOLAR

DPTO. PELLEGRINI - SANTIAGO DEL ESTERO

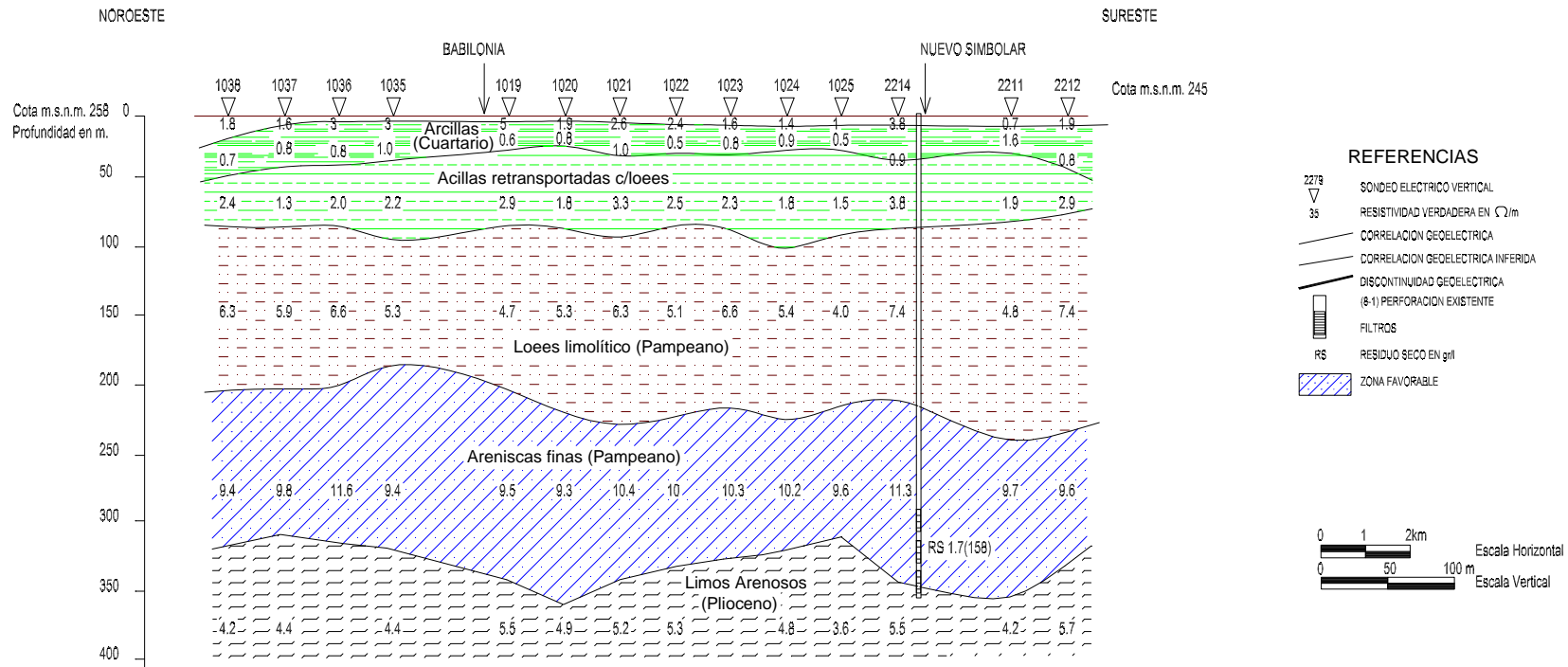


Figura 10

BLOCK DIAGRAMA ESQUEMATIZADO

Zona: RIO HORCONES - AGUA AMARGA
 Dpto.: PELLEGRINI - SGO. DEL ESTERO
 Dpto.: ANTA - SALTA

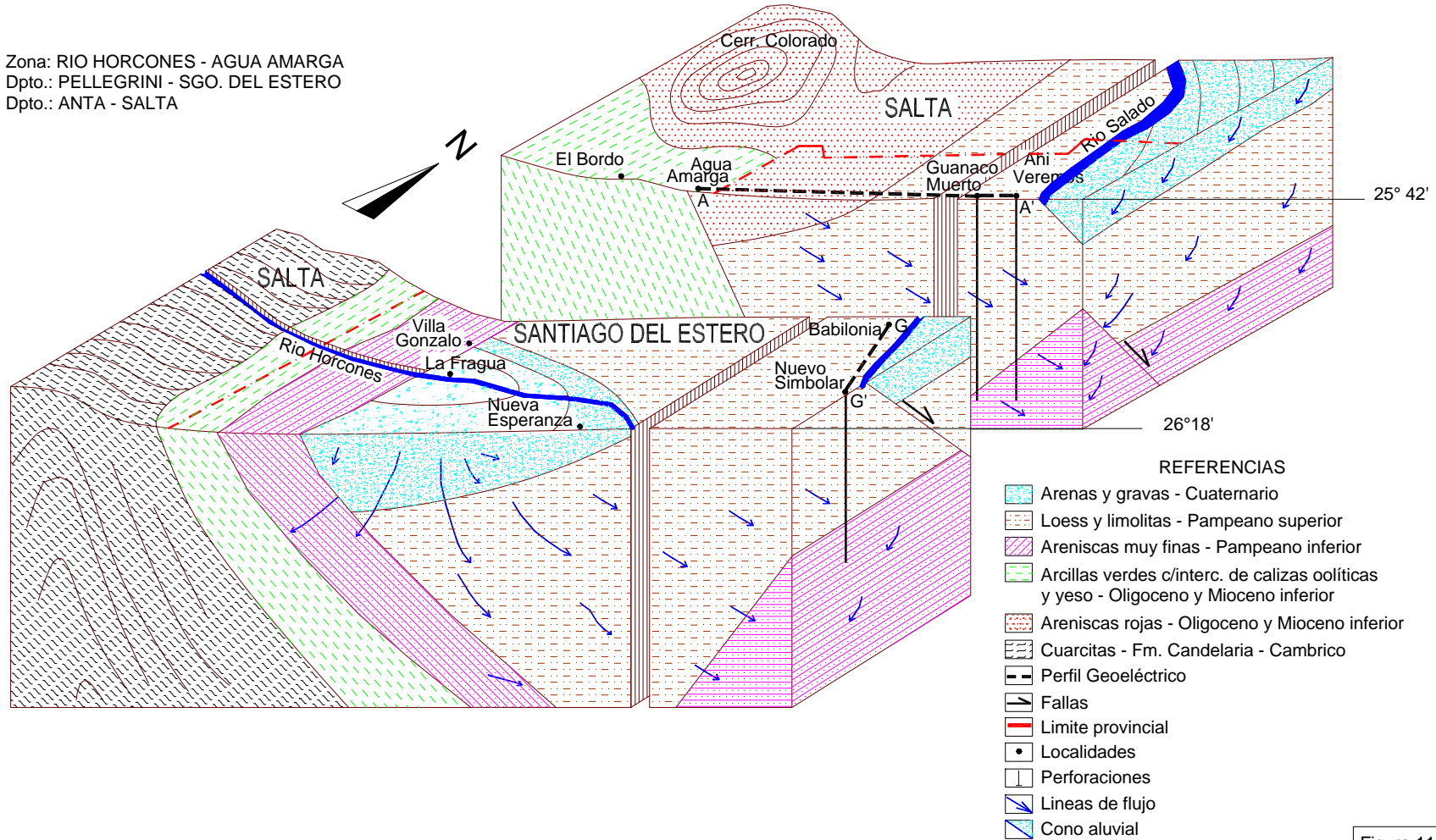


Figura 11