

Interpretación de los resultados de la prospección magnetotelúrica (MT) del sistema geotermal del sector sudeste de la Cuenca de Tucumán y su extensión en la Provincia de Santiago del Estero

Alejandro R. Conde Serra



Pozo surgente termal ubicado en el límite entre las provincias de Santiago del Estero y Tucumán

*Interpretación de los resultados de la
prospección magnetotelúrica (MT) del sistema
geotermal del sector sudeste de la Cuenca de
Tucumán y su extensión en la Provincia de
Santiago del Estero*

Alejandro R. Conde Serra

Dirección de Recursos Geológico Mineros

**SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES**

AÑO 2019
Serie Contribuciones Técnicas
Geotermia N° 1

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente: Geól. Julio Ríos Gómez
Secretario Ejecutivo: Dr. Leandro Roca

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Eduardo O. Zappettini

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO MINEROS

Director: Lic. Eduardo Marquina

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Esta publicación debe citarse como:

Conde Serra, A.R. Interpretación de los resultados de la prospección magnetotelúrica (MT) del sistema geotermal del sector sudeste de la Cuenca de Tucumán y su extensión en la Provincia de Santiago del Estero. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Geotermia N° 1. 21 pp. Año 2019. Buenos Aires.

ISSN 0328-9052

ES PROPIEDAD DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES - SEGEMAR
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN



Av. General Paz 5445 (Colectora provincia)
Edificio 25 | 1650 - San Martín - Buenos Aires
República Argentina
(11)5670-0211 | telefax (11)4713-1359



Av. Julio A. Roca 651 | 3° Piso
1067 - Ciudad de Buenos Aires
República Argentina
telefax (11)4349-3162 | www.segemar.gov.ar

CONTENDIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. RESEÑA GEOLÓGICA | 1 |
| 3. ANTECEDENTES | 3 |
| 4. METODOLOGÍA | 5 |
| 4.1.PARÁMETROS UTILIZADOS | 7 |
| 4.2. POZOS DE PARAMETRIZACIÓN | 7 |
| 4.3 CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN | 8 |
| 5. RESULTADOS | 9 |
| Pseudosección A (Fig. 14a) | 11 |
| Pseudosección B (Fig.15a) | 12 |
| Pseudosección C (Fig. 16a) | 13 |
| Pseudosección D (Fig. 17a) | 14 |
| Pseudosección E (Fig. 18a) | 15 |
| Pseudosección F (Fig 19a) | 16 |
| 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 16 |
| 7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO | 19 |
| ANEXO: | |
| UBICACIONES DE ESTACIONES DE MEDICIÓN | 21 |

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de dar cumplimiento al Acuerdo Marco de Cooperación y Asistencia Técnica entre la Provincia de Santiago del Estero, la Universidad Nacional de Santiago del Estero y el Servicio Geológico Minero Argentino firmado en junio del 2012, se llevó a cabo un plan de trabajos ajustados a normas internacionales según el «*Guide to Resource Datacollection, Analysis and Presentation for Geothermal Projects*» avalados por la *International Geothermal Association* (IGA).

En ese contexto se han desarrollado los estudios que a continuación se describen e interpretan. Los mismos constituyen un aporte más a la investigación geotérmica de la región.

A partir del análisis crítico de la bibliografía existente y la verificación en terreno de los rasgos geológicos enunciados en trabajos anteriores, se propuso en adelante realizar una exploración geotérmica regional de la cuenca del Río Salí y la cuenca de Burreyacu, ambas integrantes de la Provincia Hidrogeológica Tucumano- Santiagueña (Tineo et al., 1998).

Como primera medida, se efectuó un reconocimiento hidrogeológico de la cuenca identificando las unidades portadoras de acuíferos. Asimismo se desarrolló una interpretación preliminar del marco estructural. Finalmente se realizó una prospección geofísica con tecnología magnetotelúrica (MT), sobre la cual actualmente se cuenta con antecedentes suficientes de su eficacia en la exploración de campos geotermales. El mencionado estudio fue realizado durante el mes de julio del 2017 y mayo del 2018 por profesionales geofísicos del Instituto Nacional de Geología Isotópica (INGEIS) perteneciente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y el que suscribe en nombre del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

La presente contribución técnica se enfocó a describir el significado geológico que resulta de las anomalías geofísicas halladas. Y, por otra parte, la asociación que existe entre determinadas singularidades geoelectricas y los factores termodinámicos que regulan al sistema geotermal de la cuenca.

El objetivo del estudio fue, además de lo mencionado, obtener información del subsuelo que provea conocimiento de las estructuras que condicionan al sistema geotermal y las profundidades en las que se ubica el acuífero de interés. Como así también desde el punto de vista termodinámico evaluar

las condiciones geológicas más favorables para albergar el calor endógeno.

La prospección geofísica magnetotelúrica se desarrolló en un área aproximada de 450 km², abarcando una faja con dirección preferencial Oeste – Este, desde la localidad de Taco Ralo (Tucumán) hasta Villa Río Hondo (Santiago del Estero). La zona de prospección está limitada al norte por la Ruta Provincial N° 333 (que une la localidad de Lamadrid con Villa Río Hondo) y al sur, con la Ruta Provincial N° 10 .

Algunas estaciones de medición fueron posicionadas preferentemente en ámbitos donde se conocía el perfil geológico del lugar, de esa manera se alcanzó a parametrizar algunos de los resultados obtenidos.

Cabe mencionar que la ejecución del programa de prospección geofísica MT fue considerado un recurso ineludible en el plan de exploración, debido fundamentalmente a que se trató de una cuenca con una gran cobertura sedimentaria, con pocos afloramientos de las unidades hidrogeológicas y rasgos estructurales poco visibles. Así mismo, la mayor parte de los pozos para extracción de agua, especialmente los presentes en el ámbito de trabajo, carecían de registro de sus perfiles litoestratigráficos como para relacionar resultados geofísicos con la litoestratigrafía.

El análisis de la información obtenida, en especial aquella vinculada a la dinámica del sistema termal, permitió insinuar las primeras hipótesis sobre las características del escenario termodinámico que gobierna el campo geotérmico.

2. RESEÑA GEOLÓGICA

La llanura de Tucumán abarca el 77% de la provincia homónima. Su cuenca hídrica alimenta el reconocido sistema termal de la provincia de Santiago del Estero.

Comprende un área aproximada de 17.000 km², limitando con las Sierras del Aconquija y las Cumbres Calchaquíes al oeste, la Sierra de Guasayán y la Dorsal de Tacanas al este y la Sierra de Medina al norte y la Sierra de Ancasti al sur.

Desde el punto de vista estructural la cuenca de interés responde a una depresión atribuida a esfuerzos extensionales que desplazaron divergentemente al sistema serrano del Aconquija y la Sierra de Guasayán durante el Ciclo Tectónico Andico. Se generó así una fosa intermedia que permitió la acu-

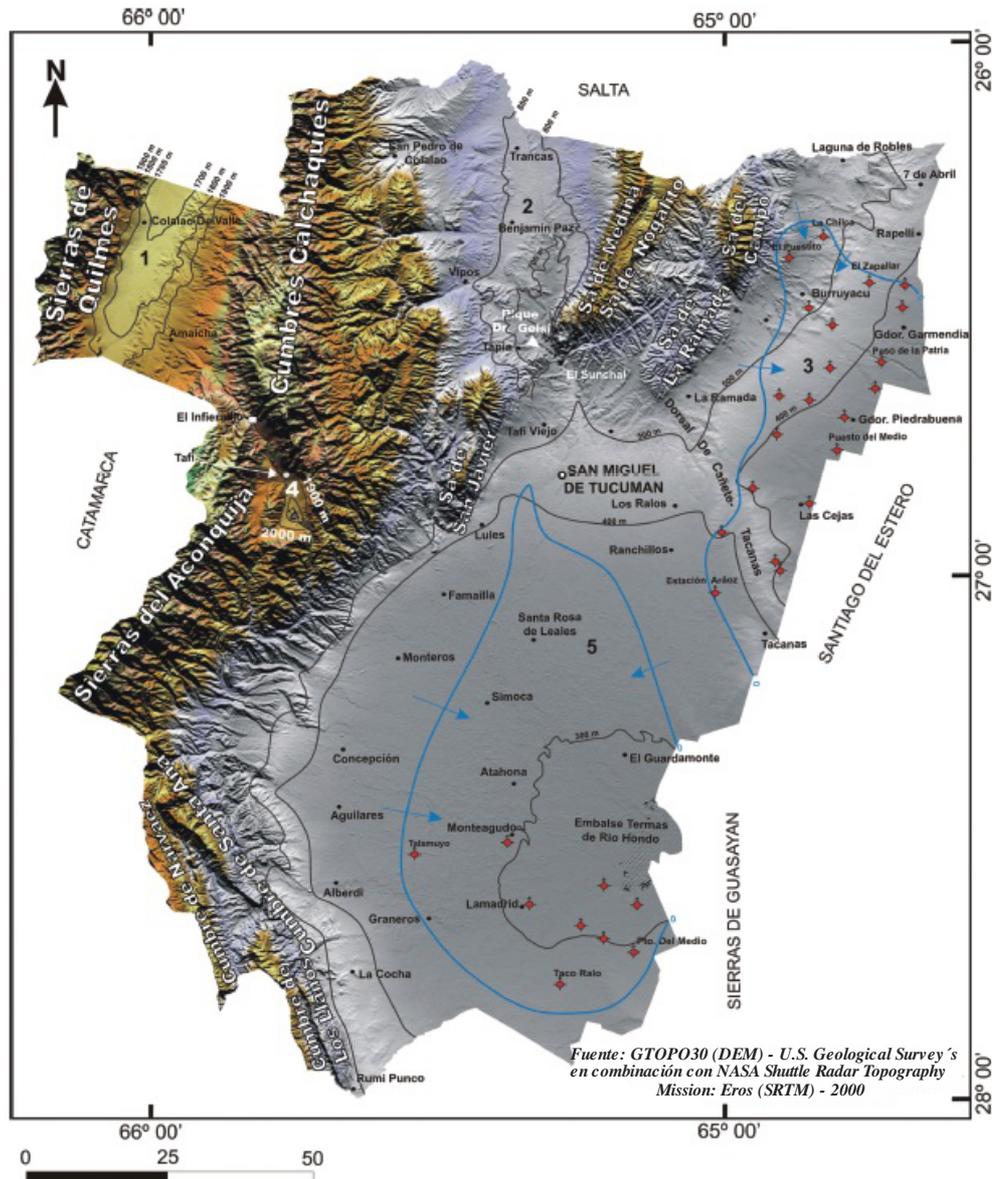


Figura 1. Plano con modelo de elevación digital. Permite distinguir las serranías y estructuras que limitan la llanura tucumano – santiagueña. El halo señalado en azul indica el ámbito artesiano y las flechas, el sentido de recarga

mulación de sedimentos entre el Neógeno y la actualidad, de hasta 3000 m de potencia. La cubeta sedimentaria contiene una de las cuencas artesianas intermontanas más grande de la Argentina. Parte de la misma se aprecia en la figura 1.

El basamento de la cuenca está constituido por metasedimentitas cuarzosas intruidas por granitoides. En discordancia se apoyan secuencias marinas de edad miocena, conformadas por arcillas y limos amarillo - verdosos con intercalaciones de finos niveles yesíferos, nódulos de halita y erráticas lentes de arenas finas rojizas, correspondientes a la Formación Guasayán.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta unidad miocena actuaría de acuícluido de la sobreyacente Formación Las Cañas, de edad plio-

cena, formada por aglomerados, limos arcillosos y cenizas volcánicas pobremente consolidadas. Esta unidad presenta una permeabilidad suficiente como para contener al acuífero termal que es intensamente explotado en la localidad de Termas de Río Hondo. Precisamente este es el acuífero por excelencia sobre el cual se llevaron a cabo los estudios de exploración geotérmica.

Todo conlleva a pensar que esta unidad pliocena conforma el único reservorio de calor convectivo endógeno de la región. Y hasta el momento no se ha hallado otro acuífero de relevancia.

La secuencia sedimentaria se continúa en limos loésicos y fanglomerados, representados por la Formación Capellanía de edad pleistocena. La misma ejerce de acuitardo al acuífero termal subyacente.

La cobertura holocena está representada por depósitos eólicos y aluviales que revisten toda la cuenca, desde el pedemonte de la Sierra de Aconquija (área de recarga de los acuíferos), hasta los niveles más finos que conforman el ambiente de llanura (Tineo et al, 1998).

Por otro lado la Sierra de Guasayán, ubicada en territorio santiagueño, se implanta como un contrafuerte de granitos y tonalitas ordovícicas, que actúan de cierre del sistema hídrico subterráneo.

La figura 2 ilustra sobre la secuencia estratigráfica.

En cuanto a los aspectos estructurales, cabe mencionar la singularidad de la localidad de Termas

de Río Hondo se sitúa en un graben o fosa tectónica, limitado por megafracturas y fallas regionales profundas. En la figura 3 se grafica sobre una foto satelital el marco estructural que controla regionalmente a la localidad de Termas de Río Hondo.

Esta cubeta, que actúa como una subcuenca, contiene parte del sistema termal que se halla omnipresente a escala regional. Participan de este marco lineamientos estructurales confinantes como la falla transcurrente del Río Dulce, la falla en tijera Río Hondo y la falla directa de la Sierra de Guasayán. El rumbo general del graben es N33°E. En cuanto a la falla Río Hondo aparentemente sería la responsable de un basculamiento de la cubeta sedimentaria en cuestión.

CUADRO ESTRATIGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

| | | | | | | | | |
|-----------|-------------|-------------------|----------------|----|----|----|---------------------|---------------------|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | HOLOCENO Superior | 16 | 17 | 18 | 19 | Depósitos Holocenos | |
| | | HOLOCENO Inferior | 14 | | | | | 15 |
| | PLEISTOCENO | | Fm. Capellania | | | | | |
| | PLIOCENO | Superior | Fm. Las Cañas | | | | | |
| | | Inferior | Fm. Guasayán | | | | | |
| | MIOCENO | Superior | Fm. Guasayán | | | | | |
| | | Medio | | | | | | |
| | PALEOZOICO | CARBONIFERO | | | | | | Basamento granítico |
| | | ORDOVICICO | | | | | | |
| | | CAMBRICO | Medio | | | | | |
| Inferior | | | | | | | | |
| PE. | Superior | | | | | | | |

Figura 2. Cuadro estratigráfico de la zona de estudio extraído de la Hoja Geológica Concepción 2766 IV

3. ANTECEDENTES

En lo que se refiere al significado geológico de los resultados, se sirvió inicialmente de los estudios desarrollados por Pomposiello (2002). Los mismos concluyeron en una pseudosección regional MT de frecuencias medias, que muestra un perfil geofísico representativo de la mayor parte de la cuenca SE de Tucumán (Fig. 4). Desde el punto de vista geológico, se evidencia una electronividad de baja resistividad que está asociada a la Fm. Guasayán de edad Miocena

Por otra parte Pomposiello *et al.* 2002 empleando también tecnología magneto telúrica de baja frecuencia y largos períodos de registro, alcanzaron

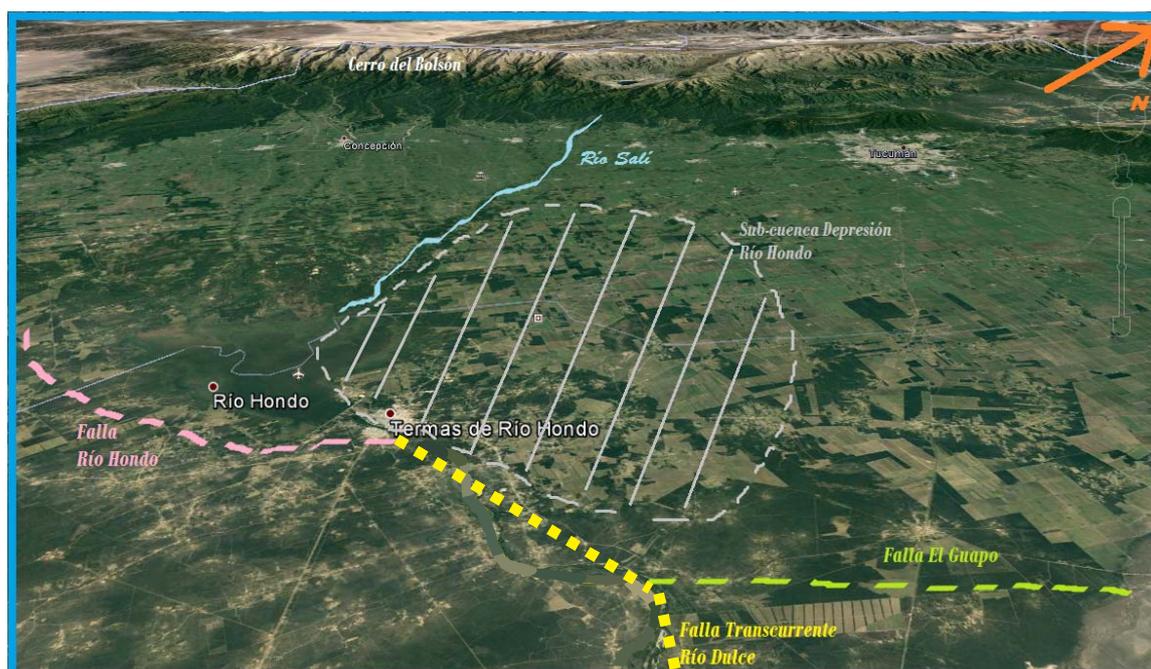


Figura 3. Contexto estructural en el ámbito del bajo de Termas de Río Hondo

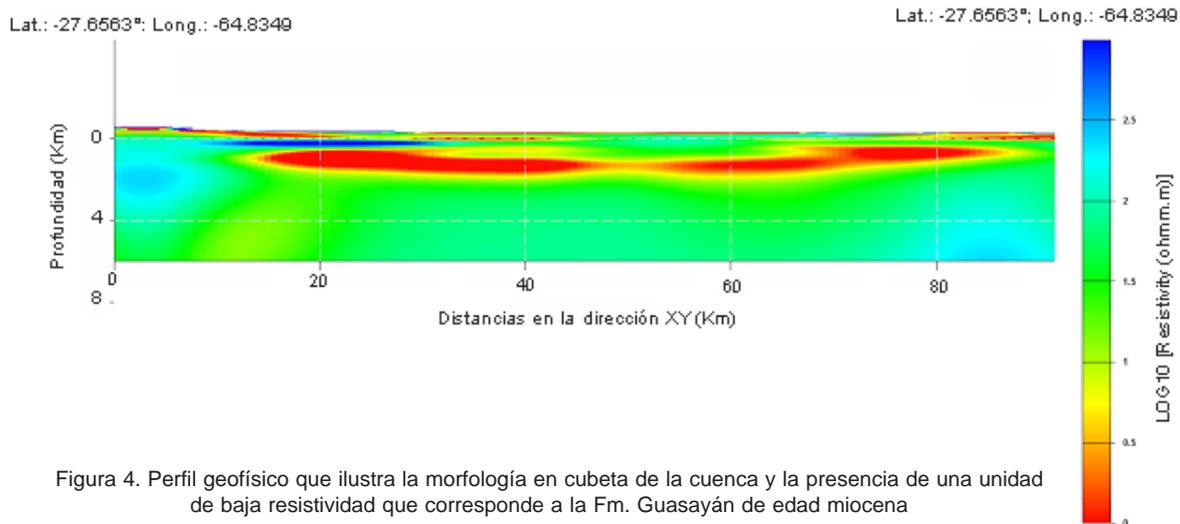


Figura 4. Perfil geofísico que ilustra la morfología en cubeta de la cuenca y la presencia de una unidad de baja resistividad que corresponde a la Fm. Guasayán de edad miocena

grandes profundidades de auscultamiento, permitiendo observar el escenario tectónico regional que contiene a la cuenca del sudeste de Tucumán y su extensión a Termas de Río Hondo en la provincia de Santiago del Estero. En este trabajo los autores determinaron singulares anomalías geoelectricas que se relacionan a escala regional con la zona de subducción tectónica regional del centro norte de la Argentina (Fig. 5).

Es de destacar en el perfil que ilustra la figura 5 la presencia de un electroconductor de fondo con un despegue lateral de bajo ángulo a partir de los 7 km a 9 km de profundidad.

Con los estudios magnetotelúricos de alcance profundo llevados a cabo por Baldis *et al*, 1983 y Pomposiello *et al*, 2002 llegaron a la conclusión de la existencia de una fuente de calor astenosférico a profundidades, que a esa escala son someras, dicese

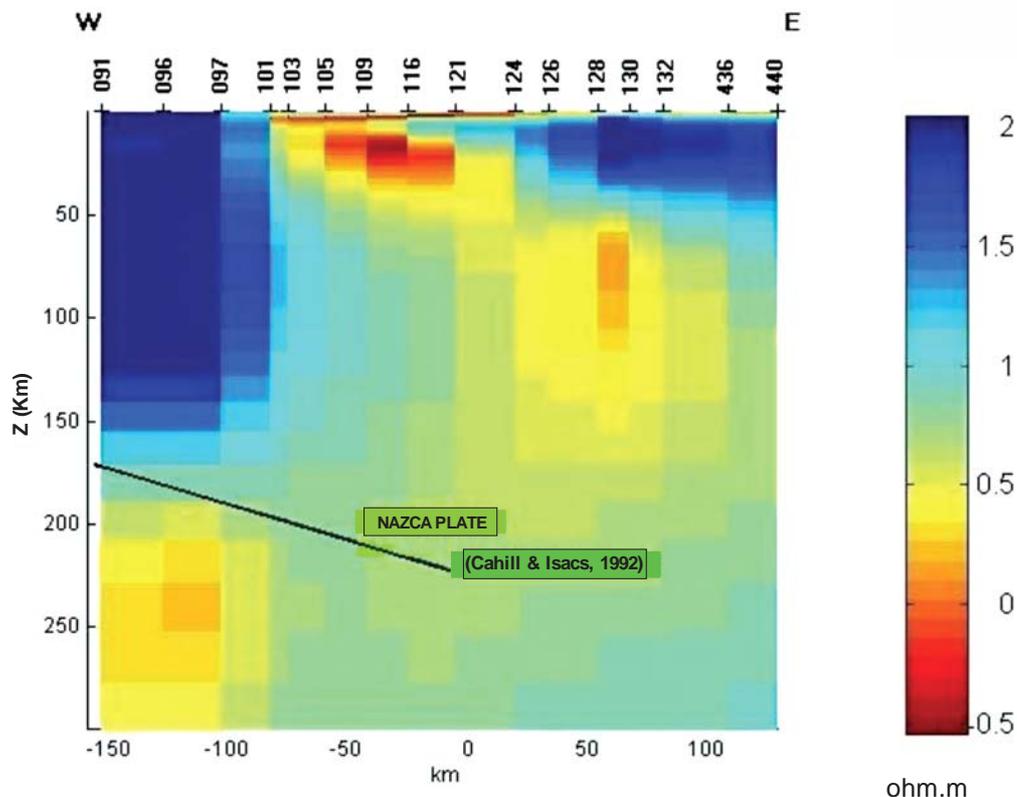


Figura 5. Sección geoelectrica resultado de la aplicación de la metodología geofísica MT de ultra baja frecuencia que comprende al Centro - Norte de la República Argentina. (Pomposiello 2002, inédito). La absisa superior del gráfico indica la distribución de las estaciones MT de baja frecuencia, donde las estaciones 91 a 116 se ubicaban dentro del sector tucumano de la cuenca y de la estación 121 a 440 dentro del sector de la Provincia de Santiago del Estero sobre la latitud 27°S

de 7 km a 12 km. Esa parte del territorio argentino presenta una estrechez cortical significativa.

El hallazgo de un electroconductor de fondo a las profundidades mencionadas se correlacionaría con una «pluma de calor mantélico ascendente donde la fluencia calórica se elevaría en sentido este, abarcando la Cuenca de Tucumán, las Termas de Río Hondo y el lado oriental de la Sierra de Guasayán, ambas en la provincia de Santiago del Estero. Esta sería la fuente de calor endógeno responsable de la existencia de un sistema geotermal del tipo cuenca intermontana. Hay antecedentes de este modelo geotérmico en el mundo, por ejemplo en el Great Basin en el estado de Nevada, Estados Unidos de Norteamérica.

Es importante señalar que Martin *et al.* (2016) alcanzó conclusiones geotérmicas similares a las que se vierten en este trabajo, pero a partir de estudios hidrogeológicos efectuados sobre datos de pozos de agua existentes en la comarca que atañe al presente trabajo

4. METODOLOGÍA

La adquisición de datos se ejecutó en 42 estaciones, seleccionando algunas de ellas para la parametrización y el reconocimiento geológico profundo. Para esto último se utilizó un equipo marca EMI Instruments MT24LF (origen USA) donde hicieron lecturas por períodos extensos, en un rango de 1KHz hasta 0,01Hz.

Todas las estaciones fueron ubicadas en un área predeterminada de 500 km² aproximadamente, sobre el sector sureste del Distrito Termal de la Cuenca Hidrológica de Tucumán, precisamente en el ámbito rural comprendido entre las localidades de la Lamadrid (Tucumán), Taco Ralo (Tucumán) y Arboles Grandes (Santiago del Estero) en la frontera con la provincia de Tucumán. La distribución de las estaciones además contó con el respaldo del conocimiento geológico de un sector de la Hoja Geológica Concepción 2766 IV.

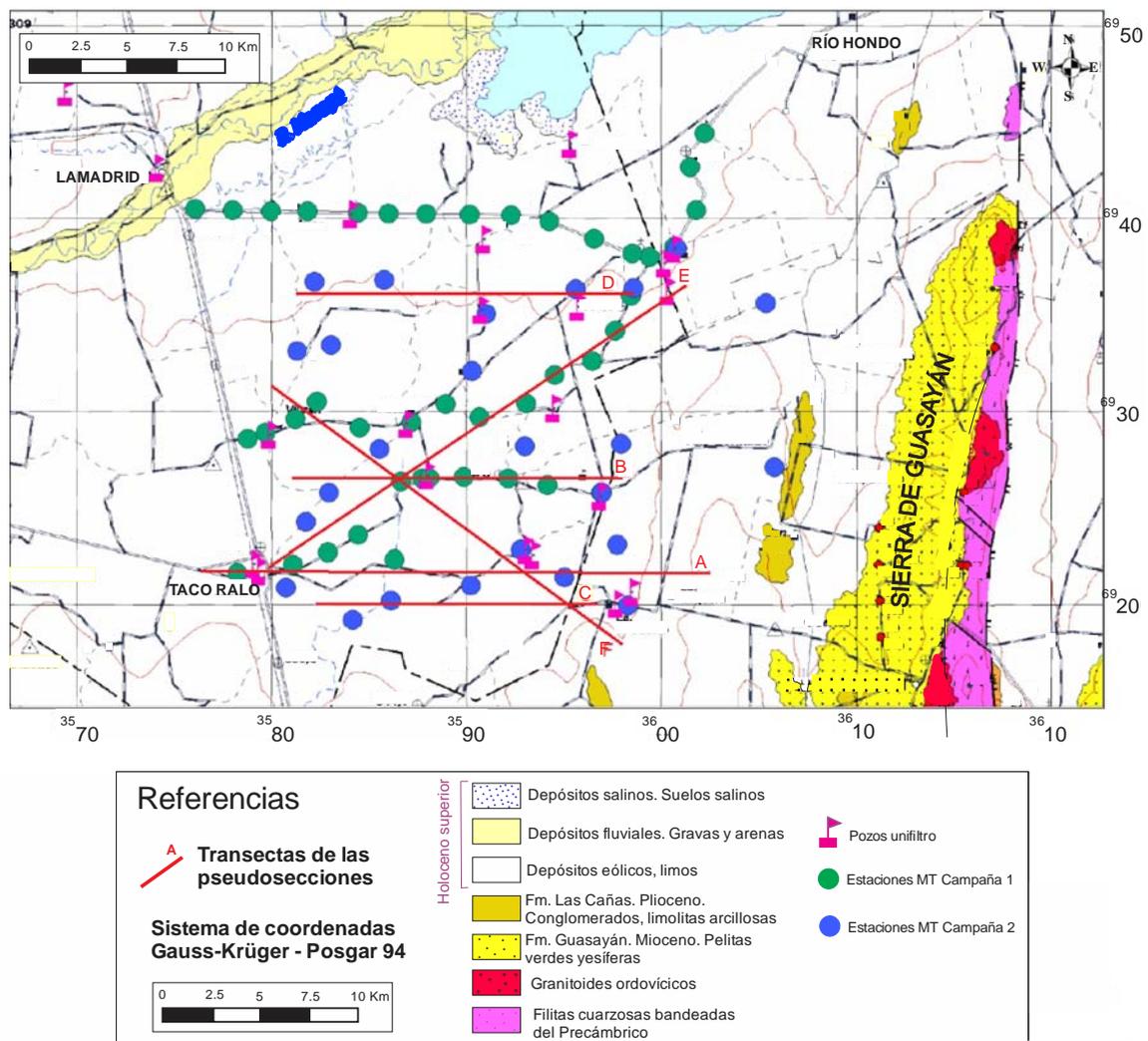


Figura 6. Se presenta el sector de la Hoja Geológica Concepción 2766 IV, en la que se posicionaron las estaciones de medición magnetotelúricas, los pozos relevados durante las campañas y las líneas de las pseudosecciones geoelectricas

Para una mejor ubicación del área de prospección, sus vértices fueron NO $-27,6092^{\circ}$; $-65,3071^{\circ}$; NE $-27,5682^{\circ}$; $-64,9340^{\circ}$; SE $-27,8045^{\circ}$; $-64,8618^{\circ}$ y SO $-27,8694$, $-65,2286^{\circ}$ resultando un cuadrilátero irregular como superficie de prospección.

En Anexo se presenta una planilla de ubicación de las estaciones. La misma obedeció también a la obtención de permisos de permanencia, ya que en su mayoría se establecieron en propiedades privadas.

Por supuesto se cumplió rigurosamente la consigna de ubicar estaciones alejadas de los ruidos electromagnéticos de los tendidos eléctricos, de gasoductos, redes ferroviarias y carreteras con alto tránsito. No obstante se deja constancia que se han repetido algunas mediciones debido a la ocurrencia de perturbaciones electromagnéticas solares constatadas en los reportes diarios del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) del U.S. Department of Commerce, específicamente aquellos registros de los días 14 y 15 de julio del 2017.

Se recuerda que la premisa del estudio geofísico fue detectar anomalías geoelectricas asociadas a rasgos estructurales, sean fallas como fracturas e identificar unidades de interés hidrogeológico que conformaban el marco geotermal del sistema.

El programa de prospección geofísica consideró además y mayoritariamente el empleo de la tecnología Audio Magneto Telúrica (AMT) con frecuencias de registro de los campos eléctrico y magnético entre los 1 KHz a 0,1 Hz.

Las impedancias tensoriales fueron adquiridas mediante un equipo marca Geometrics modelo Stratagem EH4-II (Figura 7) aplicando sensores de alto período y barras de campo Hx y Hy (marca Schlumberger de USA), que usualmente se aplican



Figura 7: Fotografía donde se observa el Logger de medición Stratagem EH4-II con una batería de alimentación de 12 volts

en instrumental magnetotelúrico de baja frecuencia (ver figura 10).

Esta combinación de sensores específicos para lecturas en baja frecuencia son técnicamente compatibles para un logger AMT y su uso está homologado por el fabricante Geometrics.

El arreglo del tendido respondió a dipolos (Ex e Ey) N-S y W-E de 60 m de longitud. Y los electrodos utilizados fueron los conformes que se emplean en instrumentos MT de baja frecuencia. (Figuras 8 y 9). Se adoptaron electrodos impolarizables de baja frecuencia (impregnados en solución sobresaturada de cloruro de plomo) en la banda 0,1 – 10 Hz y metálicos en la banda 1Hz a 10.000 Hz. (Figura 9).

Este esquema de arreglo electródico y sus componentes, como así también la utilización de barras para baja frecuencia (Figura 10), le otorgó al instrumento de medición una capacidad para auscultar hasta varias centenas de metros con alta resolución.

El software de adquisición fue el IMAGE TM, licencia USA, que realizó un pre procesamiento en campo, filtrando la señal, ajustando la ganancia por cada canal para ambos campos y obteniendo el cálculo complejo de la impedancia (Z). Así mismo este software permitió realizar un primer análisis 1D para tener idea de las profundidades alcanzadas in situ.

Por cada banda de frecuencia se utilizaron más de 50 segmentos de series de tiempo para alcanzar un análisis robusto automático de la señal (mejorando la relación señal-ruido).

El umbral de coherencia para ambos campos fue de 0,7. No obstante en gabinete se seleccionaron manualmente los segmentos de las series temporales y se incrementó el umbral de coherencia para los campos (Hx, Hy, Ex y Ey) a 0,9.



Figura 8: Fotografía donde se observa el nodo de conexión de los 2 sensores magnéticos (barras Hx y Hy) con orientación N-S y E-W, y los 4 dipolos (Ex e Ey) con orientación N-S y E-W



Figura 9: Imagen de un electrodo impolarizable correspondiente al arreglo de registros para bajas frecuencias MT



Figura 10: Imagen de las barras de lectura del campo magnético de baja frecuencia. La barra izquierda está señalizada para ubicarse en sentido E-W y la barra de la derecha para una ubicación en sentido N-S

En cuanto a los trabajos de procesamiento e inversión, con los cuales se elaboraron modelos 1D, 2D y 3D, se utilizó el software WingLing de la firma Geosystem de Italia que también se emplea para editar, rotar y ver la consistencia entre Amplitud y Fase de los tensores de impedancia (para ello se aplicaron los algoritmos D+Sutarno). Como es sabido, a partir de los tensores de impedancia se calculan las resistividades aparentes y las fases. Al respecto, se tuvo el cuidado suficiente de verificar la compatibilidad entre resistividad aparente y fase, para corregir aquellos errores derivados de la heterogeneidad superficial del subsuelo.

Específicamente para la inversión 3D de los datos magnetotelúricos se empleó el Código ModEM de Egbert y Kelbert, 2012. La misma se basó en el

método del gradiente de conjugado no lineal (NLCG). Así mismo el mencionado Código permitió invertir el tensor de impedancia Z_{ii} .

Los modelos iniciales se construyeron mediante el software 3DGrid, que además ayudó a visualizar los datos, graficar parte de los resultados, como método apto para las interpolaciones y la obtención de iguales períodos en todos los sitios de medición.

Fundamentalmente el modelado 3D de las mediciones permitió reconocer las propiedades de resistividad eléctrica de las distintas formaciones sedimentarias y del basamento cristalino.

4.1 PARÁMETROS UTILIZADOS

El modelo inicial de los registros de la prospección geofísica se confeccionó a partir de una grilla de $64 \times 64 \times 60$ celdas en direcciones X, Y, y Z.

Como valor de referencia se optó por una resistividad inicial de 30 ohm-m y un tamaño de celdas de 700 m x 700 m. Las celdas límites se aumentaron con un factor de 1,2. El espesor de la capa superior fue de 10 m y el espesor de cada capa posterior se aumentó con un factor vertical de 1,01 hasta una profundidad de 10.000 metros. Para el estudio se eligieron 35 períodos entre 0.001 y 2.51 segundos. Asimismo fueron invertidos los elementos fuera de la diagonal del tensor de impedancia. En cuanto a los errores para las impedancias fue fijado en 5% de $I Z_{xy} * Z_{yx} I^{1/2}$. Por último, cabe mencionar que después de 84 interacciones el ajuste medido por error cuadrático medio normalizado (NRMS), entre los datos medidos y los predichos por el modelo, alcanzó un valor de 1,52.

Es importante tener en consideración que para una comprensión concisa y sólida de los resultados geofísicos con implicancia geológica y geotérmica, se han seleccionado aquellas pseudosecciones más representativas de los rasgos de interés.

4.2 POZOS DE PARAMETRIZACIÓN

Se realizó el relevamiento de la mayor cantidad posible de pozos de explotación de agua, preferentemente caliente y surgente, en la zona de estudio (Tabla 1). En efecto los mismos guardan una implicancia geotérmica de consideración, ya que fueron construidos según la experiencia de los lugareños en las zonas donde se aguardaba encontrar las mayores temperaturas del acuífero termal, es decir, con el menor grado de componentes de aguas frías someras.

Como resultado revelador, la distribución de los pozos surgentes se ajustó a una faja NE-SO, que

| Nombre | (x) Posgar 94 | (y) Posgar 94 | Lat. (Grados decimales) | Long. (Grados decimales) | Observaciones |
|------------------|---------------|---------------|-------------------------|--------------------------|---|
| p. Páez | 3586928 | 6929095 | -27,766439 | -65,118156 | 46 °C - 276m - surgente |
| p. Puesto 1/2 | 3587983 | 6926407 | -27,790624 | -65,107257 | 51 °C - 400 m - surgente |
| p. Iguana Bis | 3593059 | 6922581 | -27.82480229 | -65.05545948 | 41,6 °C - 272,8m - surgente |
| Taco Ralo | 3579087 | 6921847 | -27.83232253 | -65.19721295 | 41 °C - 407,7m - |
| Pozo El Arbolito | 3600680 | 6938174 | -27.68356254 | -64.97942941 | 42 °C Palomino |
| Pozo La Cañada | 3594496 | 6929896 | -27.75870076 | -65.04145485 | |
| Pozo Bouillett | 3596886 | 6925337 | -27.79966482 | -65.01684429 | 36 °C - 300m - semisurgente |
| Pozo Gasoducto | 3584089 | 6939947 | -27.66870146 | -65.14771619 | 37 °C - 366m - Surgente |
| Pozo Cadillo | 3597705 | 6919793 | -27.8496265 | -65.00807986 | 387m - no surgente |
| Pozo Cadillo new | 3598488 | 6920405 | -27.84404735 | -65.00018232 | 360 m - no surgente |
| Pozo Iguana R | 3593427 | 6922316 | -27.8271677 | -65.05170395 | 41,6 °C - 416m - 40m de filtro - surgente |
| Pozo Surgente | 3590761 | 6934979 | -27.71309497 | -65.07972316 | 41,4 °C Chañarcito |

Tabla 1. Pozos relevados, con su ubicación y características.

coincide con un lineamiento estructural de la misma orientación (Figura 11.).

4.3 CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN

Es el mismo que se utiliza en los estudios convencionales de geoelectrónica. Para el caso, la distribución de las anomalías de resistividad fue consecuencia de que la conversión de las impedancias tensoriales de los campos magnético y eléctrico fue

una respuesta a la homogeneidad o inhomogeneidad de los materiales del subsuelo. Se recuerda que por lo general la discontinuidad de una electrounidad se debe a singularidades estructurales.

Por otra parte para comprender los resultados del presente, se ilustra en la imagen de la figura 11 a continuación, la ubicación de las estaciones de medición, los pozos surgentes termales y los lineamientos estructurales más destacados.



Figura. 11: Imagen satelital con las estaciones de medida, los pozos visitados y los lineamientos estructurales.

5. RESULTADOS

Como esquema integral de los resultados geoelectricos se presenta un bloque diagrama pseudo

3D, armado a partir de las pseudosecciones de distribución de la resistividad. (Figura 12 a, b y c).

La electrostratigrafía destaca la presencia de una unidad de baja resistividad asociada a las sedi-

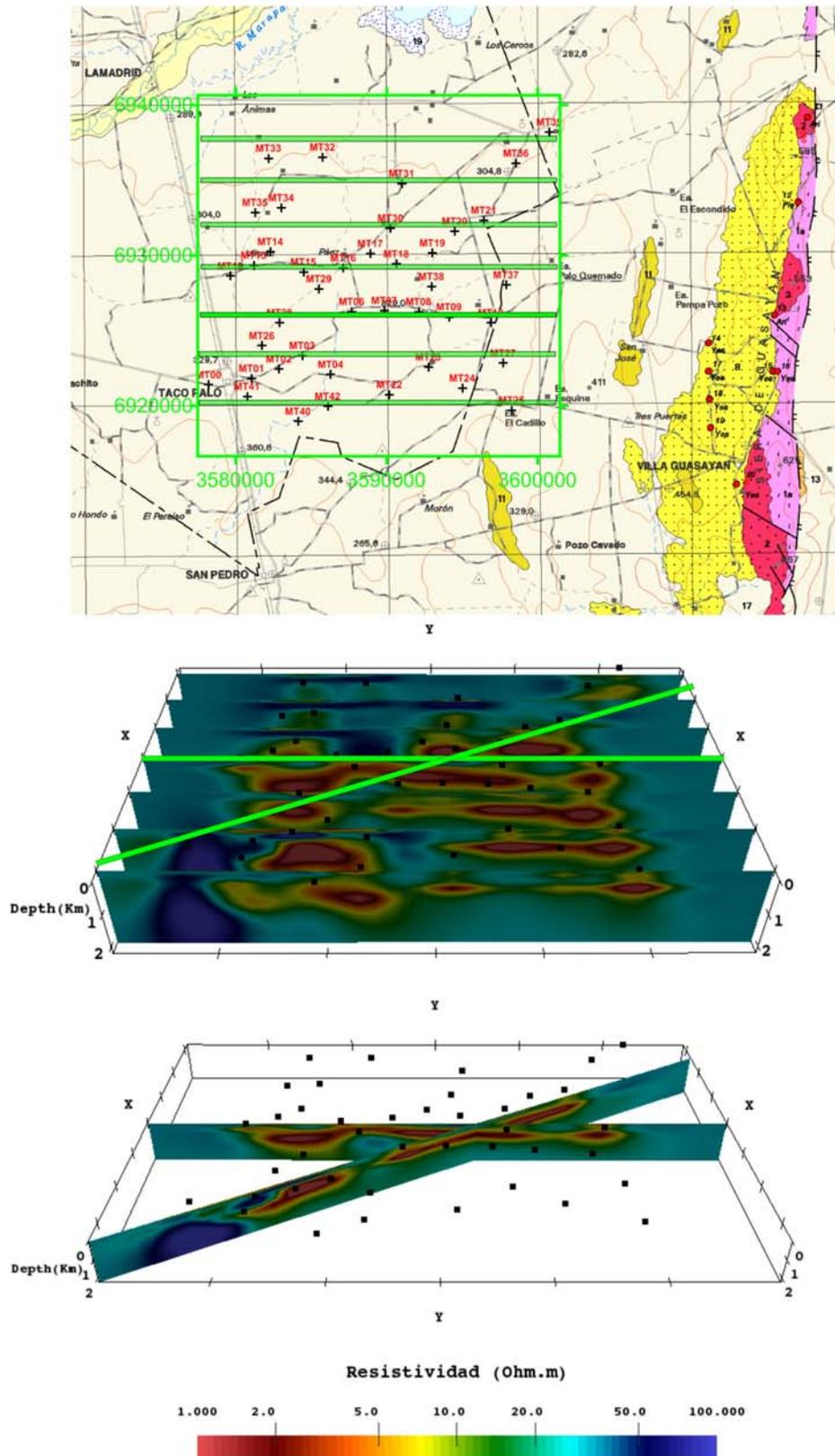


Figura 12. Integración de pseudosecciones en un bloque diagrama a los efectos de ilustrar a partir de un esquema pseudo 3D los resultados de las mediciones geoelectricas, donde a) grafica la posición de las pseudosecciones que conforman el bloque; b) las pseudosecciones y c) pseudosecciones control.

mentitas del Pleistoceno que contienen los niveles de agua freática salobre. La resistividad varió entre 0.5 y 5 ohm-m y su espesor fue variable, de alrededor de 150 metros. Por debajo de esta unidad se halló una capa más resistiva de alrededor de 10 ohm-m y con un espesor variable de entre 350 m al este y 500 m oeste. Esta electrounidad podría responder a la formación pliocena que contiene al acuífero termal, denominada Fm. Las Cañas. Subyacente a la Fm. Las Cañas, se detectó una unidad muy conductora con resistividades menores a 1 ohm-m, de espesores variables y a una profundidad que se incrementa generalmente hacia el oeste del área de estudio. Esta electrounidad estaría asociada a la Formación Guasayán del Mioceno (el acuífero del acuífero termal). Se recuerda que en su composición se presentan limos, arcillas con intercalaciones de finos niveles de yeso, nódulos de halita y erráticas lentes de arenas finas algunas conteniendo acuíferos de despreciable potencia. Por debajo de la men-

cionada secuencia electroestratigráfica, la presencia de un fondo alto resistivo estaría vinculado al basamento cristalino.

En adelante se describirán los resultados de la distribución de los valores de resistividad de las pseudosecciones más destacadas y asociados a la litoestratigrafía imperante (figura 13). Específicamente aquellas que presenten rasgos geológicos con significado geotérmico y que contribuyan a entender el modelo que gobierna al sistema geotermal.

En el presente trabajo se describen solo las pseudosecciones electroestratigráficas más significativas en donde las escalas verticales fueron aumentadas al doble (V.E.=2x) para una mejor visualización de las anomalías. Por otra parte, las pseudosecciones suavizadas se muestran con líneas de isoresistividad y una escala vertical (V.E.=1x) igual a la horizontal.

Las escalas de resistividad varían entre 1 y 100 ohm.m.

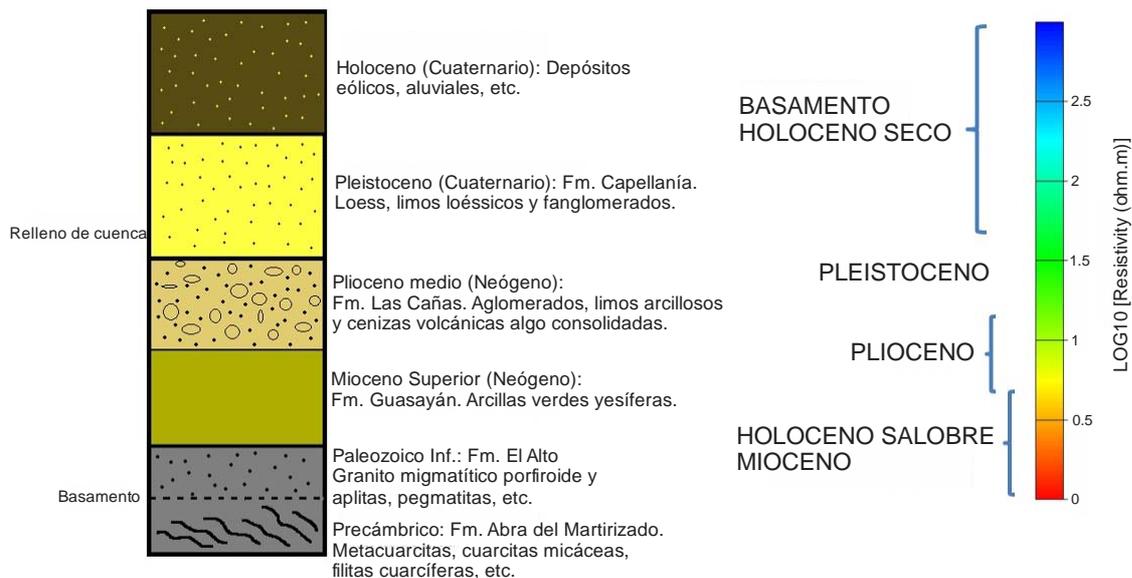


Figura 13. Columna estratigráfica y su respuesta geoelectrica.

PSEUDOSECCIÓN A

Se observa una electrounidad conductiva correlacionada a la unidad de edad Mioceno (Fm. Guasayán) que se reconoce a profundidades mínimas hacia el este de la Cuenca, con una tendencia a profundizarse hacia el oeste. Su morfología discontinuada se debe probablemente a la presencia de una falla (reflejo de un disloque del basamento?).

En el análisis de estos resultados aparece un destacado resistivo al oeste, justo debajo de la localidad de Taco Ralo. Amerita que en el futuro se desarrolle un estudio específico para definir la razón de esta anomalía.

En cuanto al resistivo superficial observado estaría relacionado a sedimentitas secas holocenas. Se ha apreciado en dicho sector una abundante presencia de arenas y limos arenosos. (figura 14a)

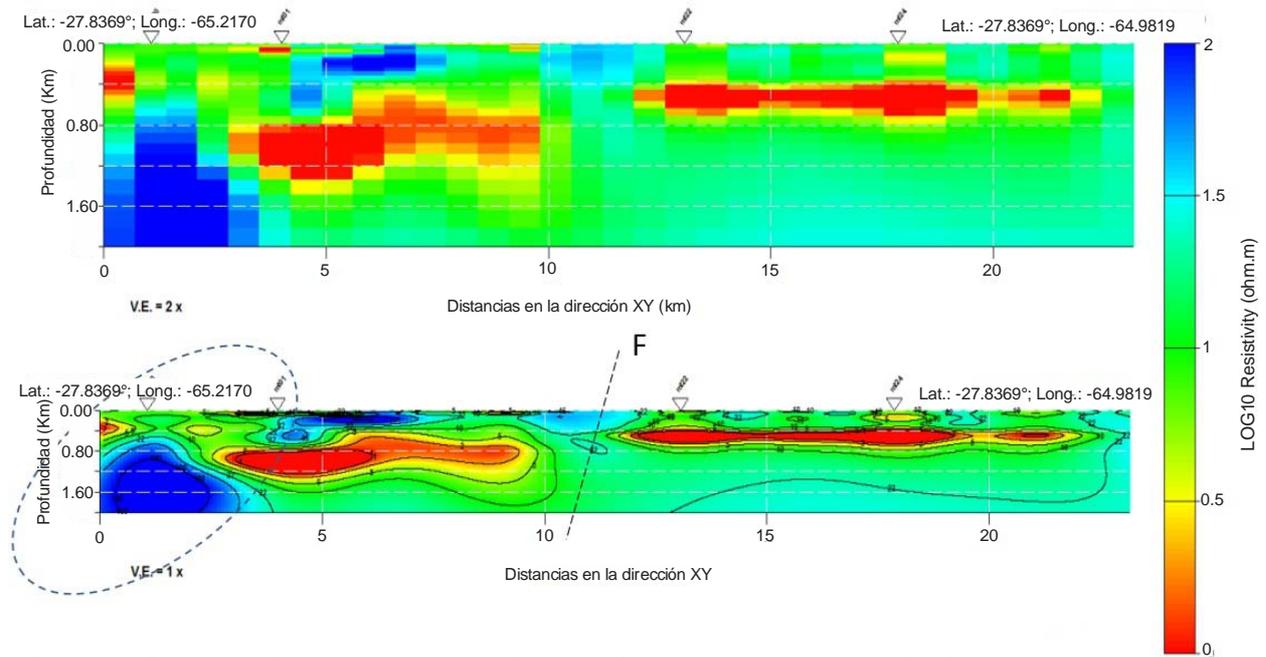


Figura 14a. Pseudosección A donde se muestran las anomalías con contornos en bloque (según procesado crudo) y con contornos suavizados (por reproceso de la gráfica).



Figura 14b. Imagen satelital que muestra donde se ubica la línea que conforma la Pseudosección A.

PSEUDOSECCIÓN B

Se observa al basamento como unidad resistiva persistente de fondo generalmente menos profundo al este de la cuenca. Prosigue la discontinuidad de

la electrounidad conductiva (fallas en líneas punteadas). El Mioceno (Fm. Guasayán) se mantiene a una profundidad constante respecto a la pseudo-sección A. Se observa también la presencia de medios conductivos someros. (figura 15a).

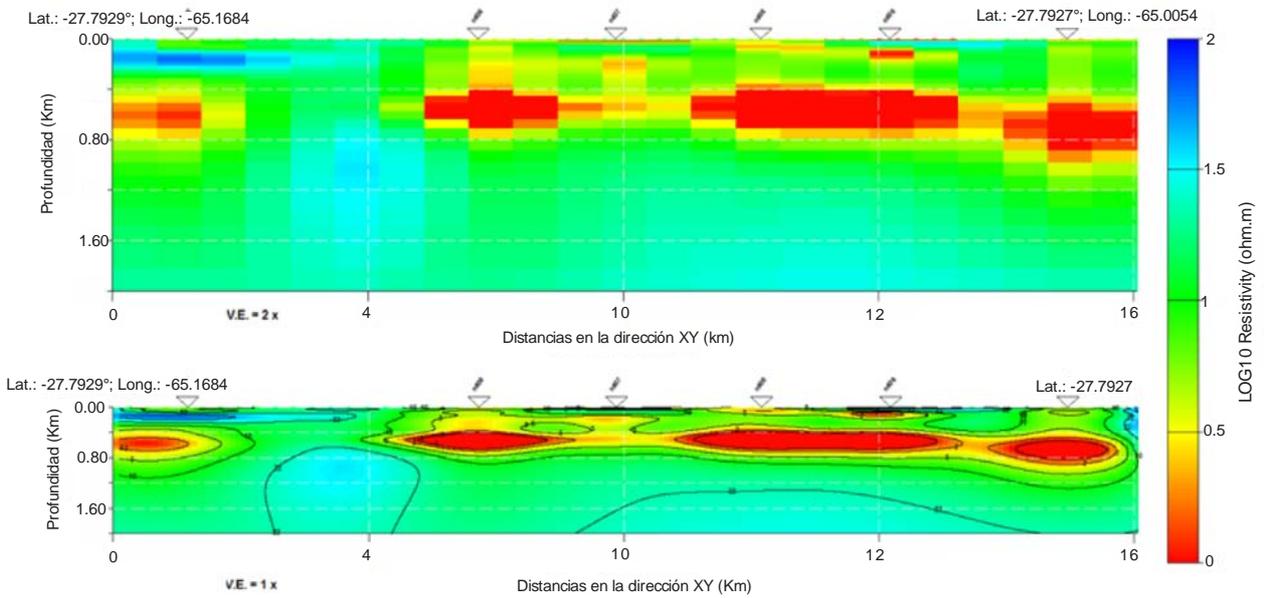


Figura 15a. Pseudosección B donde se muestran las anomalías con contornos en bloque (según procesado crudo) y con contornos suavizados (por reproceso de la gráfica).



Fig. 15b. Imagen satelital donde se observa la línea geoelectrica que conforma la Pseudosección B.

PSEUDOSECCIÓN C

Se replica nuevamente la ubicación de la Fm. Guasayán con una mayor profundidad al oeste de la

cuenca. La discontinuidad de la anomalía conductiva respondería a la presencia de la falla regional. (figura 16a).

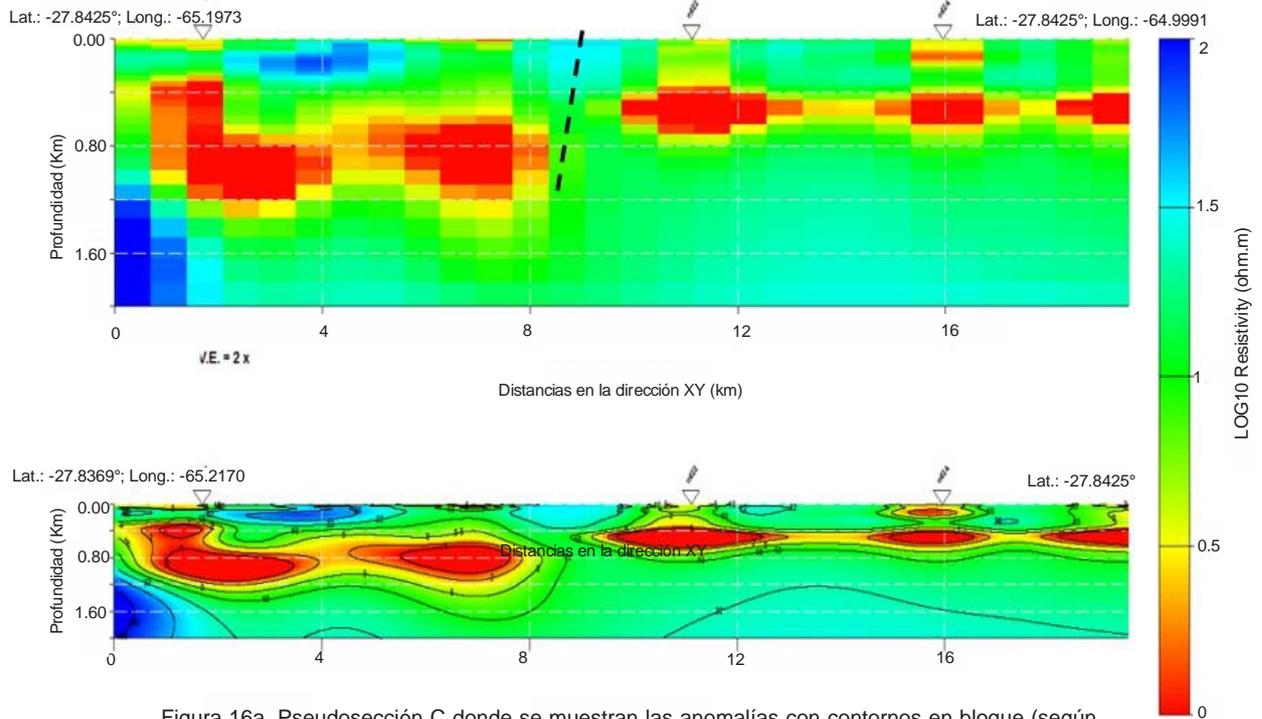


Figura 16a. Pseudosección C donde se muestran las anomalías con contornos en bloque (según procesado crudo) y con contornos suavizados (por reproceso de la gráfica).



Fig. 16b. Imagen satelital donde se observa la línea geoelectrica que conforma la Pseudosección C.

PSEUDOSECCIÓN D

Sobre el sector este de la pseudosección se aprecia la aparente influencia estructural del Bajo de las Termas de Río Hondo donde la yacencia de la Fm.

Guasayán sería más profunda. Se observa además un resistivo de fondo relevante, que se supone estaría vinculado al alto estructural Dorsal de la Mujer Muerta y que deberá ser definido en estudios posteriores de detalle. (figura 17a).

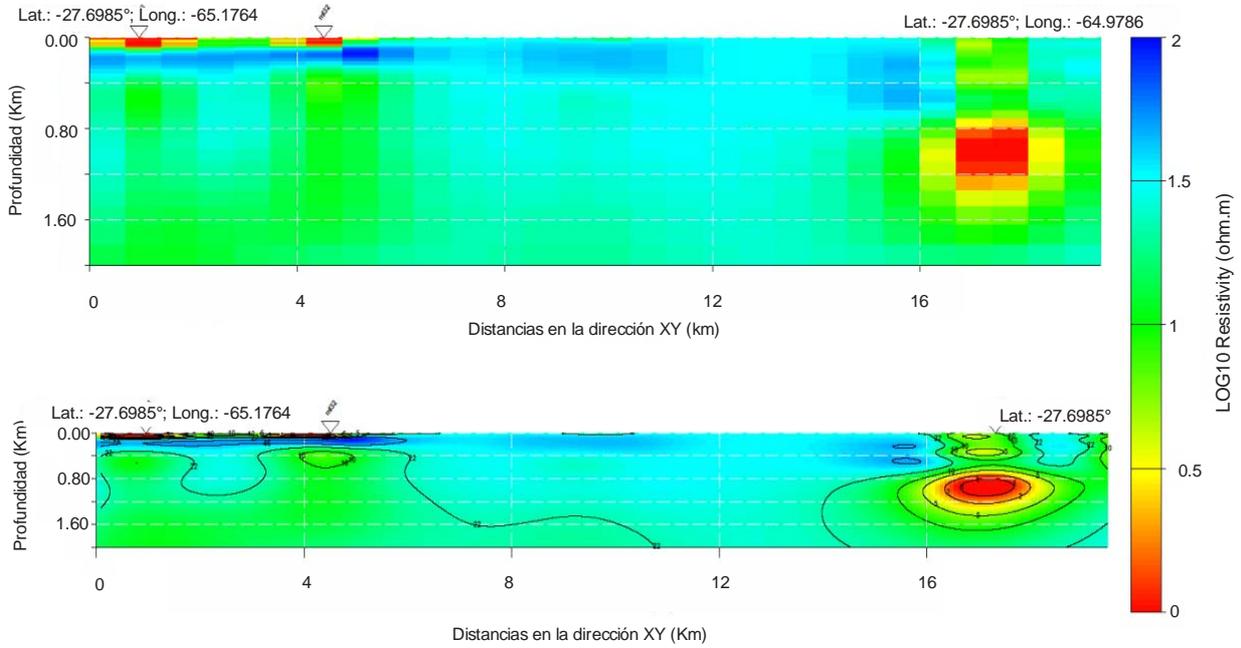


Figura 17a. Pseudosección D donde se muestran las anomalías con contornos en bloque (según procesado crudo) y con contornos suavizados (por reproceso de la gráfica).

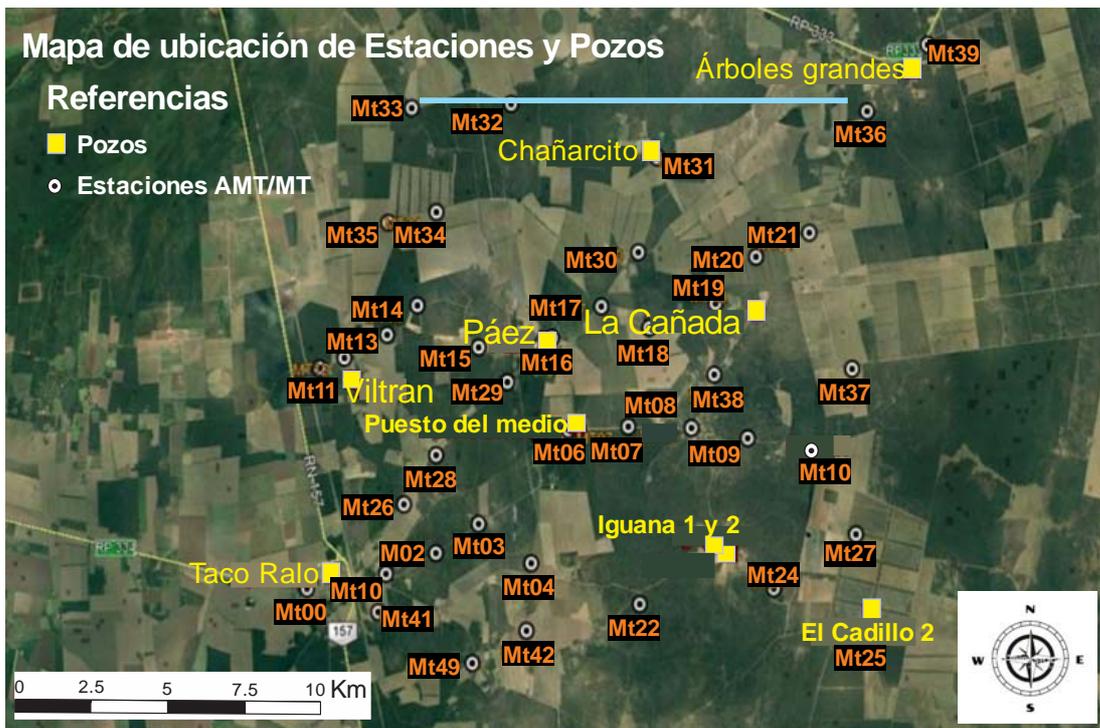


Figura 17b. Imagen satelital donde se observa la ubicación de la línea geoelectrica que constituye la Pseudosección D.

PSEUDOSECCIÓN E

La Fm. Guasayán se profundiza en sentido noroeste, bajo el control estructural del graben de Ter-

mas de Río Hondo. Se vaticina que en este ámbito, el emplazamiento del complejo sedimentario con sus acuíferos, estaría probablemente a mayor profundidad y presentando mayores espesores. (Figura 18a).

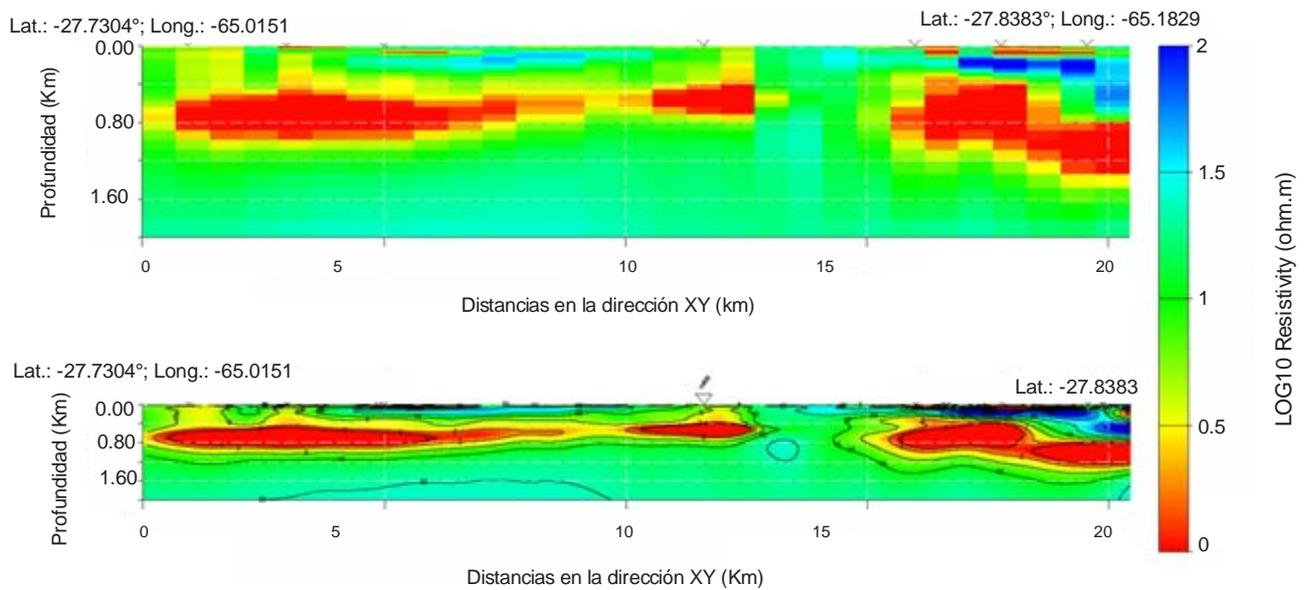


Figura 18a. Pseudosección E. donde se muestran las anomalías con contornos en bloque (según procesado crudo) y con contornos suavizados (por reproceso de la gráfica). Se profundiza la Fm. Guasayán (Mioceno) hacia el NE debido a razones estructurales.

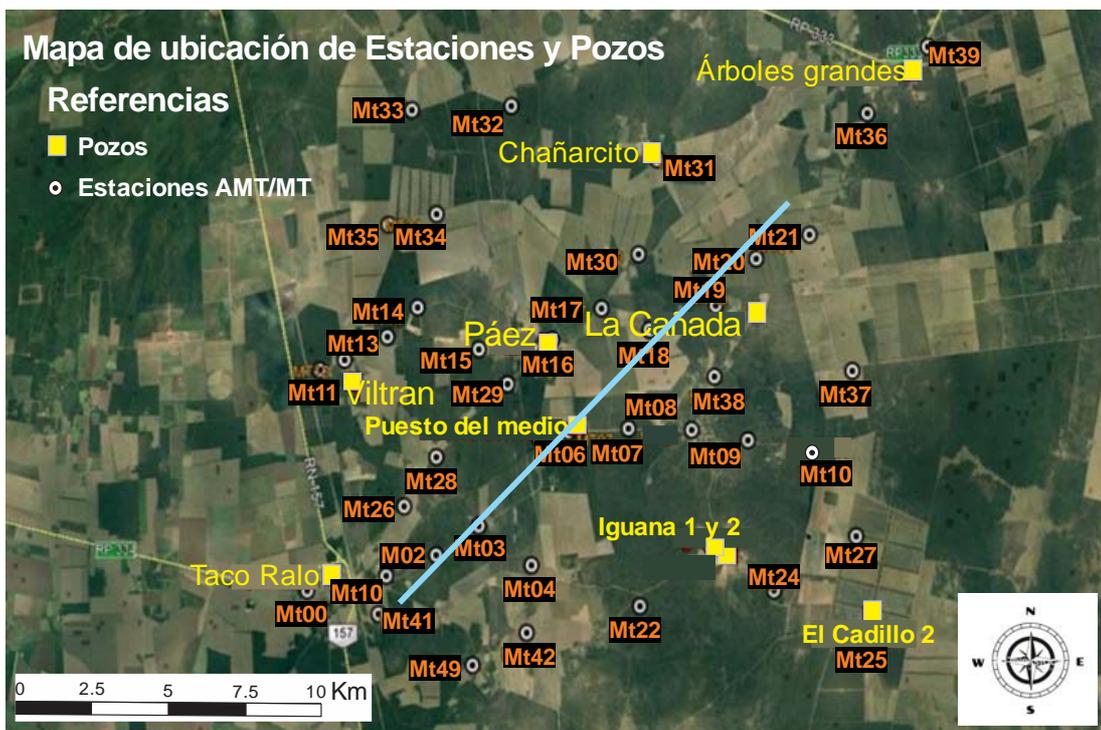


Figura 18b. Imagen satelital donde se observa la línea geoelectrica que conforma la Pseudosección E.

PSEUDOSECCIÓN F

En esta pseudosección la flecha señala al basamento situado más cerca de la superficie y por otra parte se aprecia a la electrounidad atribuida a la Fm. Guasayán del Mioceno con adelgazamientos. Una suposición válida sería que en dicho sector (flanco de un bloque ascendido?) se presente una falla.

Este sería un escenario estructural óptimo para la fuga de calor convectivo. En campo se avaló esta situación con la presencia de pozos con aguas termales surgentes que evidenciarían un claro control estructural del sistema geotermal. Tanto el *hangingwall* como el *footwall* de este fallamiento constituirían zonas de interés geotérmico en cuanto a la existencia de gradientes anómalos. (figura 19a).

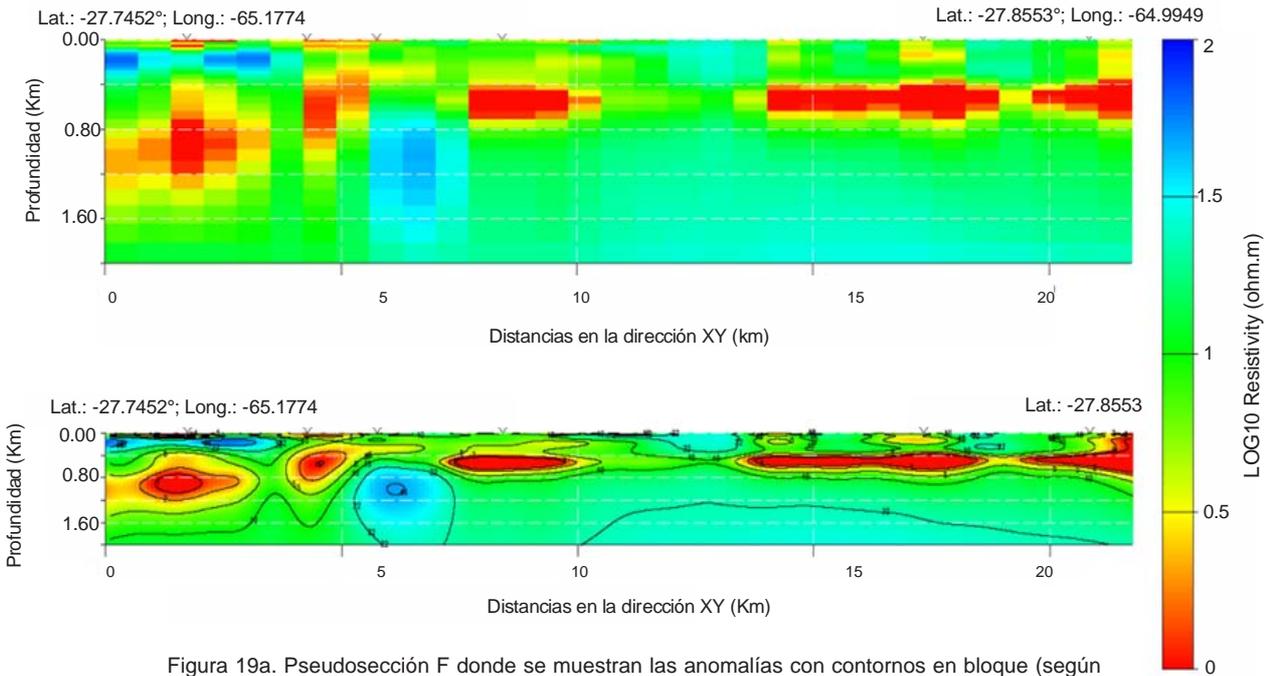


Figura 19a. Pseudosección F donde se muestran las anomalías con contornos en bloque (según procesado crudo) y con contornos suavizados (por reproceso de la gráfica).



Figura 19b. Imagen satelital que muestra la línea geoelectrica que despliega a la Pseudosección F.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En carácter de conclusiones se menciona que los estudios desarrollados en esta etapa de la exploración han permitido esbozar un Modelo Conceptual Preliminar Hidrogeológico, básico y conexo a ello una interpretación geotérmica elemental del sistema. Al respecto han sido identificados dentro de la región donde yace el campo geotermal tres escenarios geológicos influyentes sobre el sistema. El correspondiente a la cuenca sudeste de Tucumán, el que da marco al sector oriental de la Sierra de Guasayán y el circunscripto al graben de Termas de Río Hondo.

El método AMT-MT ha alcanzado sus objetivos iniciales en cuanto a observar rasgos geológicos de interés geotérmico y la deducción de un marco termodinámico asociado que condiciona al régimen geotermal.

Desde el punto de vista hidrogeológico la Formación Las Cañas de edad pliocena conforma la unidad acuífera por excelencia de toda la cuenca, dado su volumen, transmisibilidad y capacidad para la convección del calor profundo. Su respuesta geoeléctrica no ha sido lo suficientemente precisa como para dar una señal de ubicuidad exacta en la secuencia electroestratigráfica. La misma surgió de la interpretación comparativa entre las resistividades halladas (identificada por ende, como una unidad de resistividad media-conductiva) dentro de la secuencia sedimentaria asociada. En tal sentido su acuífero, representado por la Fm. Guasayán de edad miocena, sí se mostró como una electrounidad conductiva de señal robusta y que actuó como un horizonte guía para deducir en adelante la posición espacial dentro de la cuenca, del mencionado acuífero plioceno. Faltaría definir con mayor detalle su distribución espacial.

Las unidades sobreyacentes a la Fm. Las Cañas actuarían de acuitardos. Están formadas por areniscas, limolitas y arcillas loessoides de edad pleistocena y contienen acuíferos erráticos de escaso espesor. El método elegido para el relevamiento a esta escala regional no presentó la resolución geoeléctrica suficiente como para discriminar estos niveles.

En cuanto a la electrounidad asociada al basamento ha sido sencilla su identificación debido a su contraste de resistividad (alta resistividad). La morfología del perfil basamento y sus bloques dislocados se dedujo a partir de la disposición suprayacente del electroconductor correspondiente la unidad miocena.

Es de destacar la necesidad futura de estudiar con mejor detalle el control estructural que actúa sobre el diseño del reservorio termal, no solo en el ámbito de la cuenca sudeste de Tucumán, sino también en el sector de Termas de Río Hondo, donde este sector presentaría diferencias hidrogeológicas comportándose como un subsistema termal.

Desde el punto de vista termodinámico la hipótesis sobre el origen del calor cuenta con antecedentes de investigación geofísica profunda que ya han sido comentados en el capítulo de antecedentes. Pero cabe aquí concluir que los medios materiales representados por las unidades litológicas se constituirían en los únicos agentes de recepción, almacenaje y transmisión de tal energía calórica. Las fallas y fracturas serían solo vías de circulación de fluidos calientes y del calor mismo. Y el agua dentro del acuífero predominante, actuaría como elemento de convección por excelencia.

El esquema sería entonces un calor ascendente por conducción dentro del basamento, con un nivel mioceno inmediato sobreyacente, que debido a su composición pelítica, rica en glauconitas y otros silicoaluminatos de hierro y magnesio colaboraría en la transmisión calórica. Por arriba, las unidades terciarias son las portadoras del acuífero de convección termal que conformaría el sistema geotérmico.

En cuanto a la implicancia del fenómeno térmico en las respuestas del campo eléctrico y magnético sobre la litología, el calor contribuiría a la reducción de la resistividad, especialmente sobre la unidad miocena. La ionización de sus omnipresentes componentes salinos, la distinguen geoeléctricamente del resto de las formaciones.

En lo concerniente a qué factores espaciales resultarían favorables para el almacenaje del calor o su disipación, esencialmente será la morfología profunda de la cuenca la que determina el rango de favorabilidad. Una gran cubeta con profundidades máximas de 3 km y flancos más superficiales hacia la Sa. de Aconquija al occidente y la Sierra de Guasayán al oriente (Sosa Gomez J. y Georgieff S., 2014), conforma el marco geológico que distribuye el calor al sistema.

Entonces, los ambientes más propicios en enfocar la exploración geotérmica para hallar mejores temperaturas de reservorio, serían:

- Un sector de la cuenca cuyo marco estructural demuestre que el tectonismo habilitó una importante densidad de rutas de ascenso del calor.

- El basamento proterozoico a profundidades someras donde se evidencien mayores gradientes geotérmicos conexos.
- Sectores donde la Fm. Guasayán tenga poco espesor.
- Zonas con poca densidad de estructuras holocenas secundarias que disipen el calor (zonas de fugas del sistema termal). Es decir aquellas que confinen calor.
- El conjugado de todos estos factores, como se evidenció en el pozo surgente de la Comuna de Yánima, dpto. La Cocha al pie de la Sierra de Aconquija, donde a solo 150 m de profundidad se registra una temperatura de 41,8°C. Allí por ejemplo se presentan fallas profundas donde ascienden fluidos geotermales, el basamento caliente se halla subsuperficial, presenta poco espesor el nivel mioceno y el acuífero plioceno recargado está más próximo a la masa de calor profundo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Avellaneda, S., Falcon, C., 2015. Patrimonio hidrogeológico-geotermal en el piedemonte sud-occidental de la provincia de Tucumán. Serie Monográfica y Didáctica. Facultad de Ciencias Naturales e IML. San Miguel de Tucumán. Vol. 54 p.109-109.
- Baldis, B., Demicheli, J., Febrer, J., Fournier, H., García, E., Gasco, J.C., Mamani, M., Pomposiello, M.C., 1983. Magnetotelluric result along a 1200 km long deep with an important geothermal area at its north-west profile end in the provinces of Tucumán and Santiago del Estero in Argentina. *Acta Geodaet. Geophysics et Mountanist.* 18 (4). 489 – 499. Hungría.
- Cahill, T. E. y Isacks, B. I., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *J. Geophysics Res.*, 97, 17.503-17.529.
- Cengel, Y., Boles, M. 2011. *Termodinámica*. 7ma. Edición. Ed. McGraw-Hill Companies, Inc. USA.
- Delhaye, R., Jones, A.G., Rath, V., Reay, D., Smyth, A., 2015. The IRE THERM Project: Magnetotelluric Assessment of Sedimentary Basins in Northern Ireland as Possible Geothermal Aquifers. *Proceedings World Geothermal Congress Melbourne, Australia.*
- Falcón, C. M., Avellaneda, S. C., 2016. Geotermometría y Modelo Geotérmico del Extremo Sureste de la Provincia de Tucumán, Argentina. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea.
- Favetto A., Pomposiello, M.C., Guevara, L., 2017. Relevamiento Geofísico del Sector Sudeste del Distrito Geotermal Cuenca Río Sali – Dulce. Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS-CONICET) - SEGEMAR. Informe Especial.
- Febrer, J., Baldis, B., Gasco., Mamani, M., Pomposiello, C. y Fournier, M. 1982. La Anomalía Geotérmica Calchaquí en el Noroeste Argentino: Un Nuevo Proceso geodinámico asociado a la subducción de la placa de Nazca. *Acta Quinto Congreso Latinoamericano de Geología*, T. III, Buenos Aires.
- Fendek, M., Daniel, S., Grand, T., Kultan, V., 2015. Delineation of Geothermal Aquifers by Magnetotelluric Methods in Besenova – Lucky Area, Northern Slovakia. *Proceedings World Geothermal Congress Melbourne, Australia*, 19-25.
- Gegenhuber, N., 2015. Petrographic Coded Model Correlations to Derive a Thermal Conductivity-Log. 2015. *Proceedings World Geothermal Congress Melbourne, Australia*, 19-25.
- Guevara, L., Favetto, A. y Pomposiello, M. C., 2018. 3-D magnetotelluric inversion for geothermal exploration in Socompa volcanic zone, NW Argentina. Abstract 24th EM Induction Workshop, Helsingør, Denmark.
- Martín, A., Palazzo, R., 2016. Procesos tectónicos y su relación con los acuíferos hidrotermales del Centro Oeste de la Provincia de Santiago del Estero. V Congreso Argentino de Hidrogeología, Catamarca, págs. 15-40. Buenos Aires.
- Miranda, F. Pesce, A., 2015. Sondeos de temperatura para la caracterización del gradiente geotérmico en el área Villa Río Hondo, Santiago del Estero. Informe Preliminar. SEGEMAR.
- Miró, R., 2008. Los Acuíferos Termales de la Región de Río Hondo, Provincia de Santiago del Estero y Tucumán, Argentina; su potencial geotérmico. SEGEMAR Córdoba.
- Newman, G. A., Hoversten M., Gasperikova, E., and Wannamaker, P. E.. 2005. 3D Magnetotelluric characterization of the COSO Geothermal Field. Conference: 30th Workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, CA, USA.
- Newman, G. A., Lindsey, N.J., Gasperkova, E., Bertrand, E. A. y Caldwell, T. G., 2015. The Importance of Full Impedance Tensor Analysis for 3D Magnetotelluric Imaging the Roots of High Temperature Geothermal Systems: Application to the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Proceedings World Geothermal Congress Melbourne, Australia.*
- Niasari, S. W., Muñoz, G., Kholid, M., Suhanto, E., Ritter, O., 2015. 3D Inversion of Magnetotelluric Data from the Sipoholon Geothermal Field, Sumatra, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress Melbourne, Australia.*
- Pomposiello, M. C., Favetto, A., Guevara, L., 2017. Proyecto Geotérmico Cuenca V. Alberdi – V. Río Hondo. Prospección Geofísica AMT/MT de detalle Primera Etapa. INGEIS – CONICET, SEGEMAR Informe inédito.
- Pomposiello, M. C., Favetto, A., Sainato, C., Booker, J. y Shanghui, Li., 2002. Imaging the sedimentary basin of the Tucuman Plain in the Northern Pampean Range Argentina. *Journal of Applied Geophysics* 49, 47-58.
- Pomposiello, M. C., Galindo, G y Sainato, C., 2000. Modelo Geotérmico y Evaluación del Recurso en la Llanura Tucumana- Santiagueña. IN: XX reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas CD-ROM. 175-179.
- Puchulu, M. E., 2011. Variación de la profundidad y composición de la capa freática salina en la llanura deprimida de la Provincia de Tucumán. 2ª Reunión de la Red Argentina de Salinidad, Tucumán, organizada por la RAS y la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la UNT.

- Sosa Gómez, J., Georgieff, S. M., 2014. Una aproximación al subsuelo de Tucumán. En: Moyano, S.; Puchulu, M. E.; Fernández, D.; Aceñolaza, G; Vides, M. E.; Nieva, S. (Eds.), Geología de Tucumán. Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán, pp. 00-00.
- Tineo, A., Falcón, C., García, J., D'Urso, C., Galindo, G. y Rodríguez, G., 1998. Capítulo en Hidrogeología en «Geología de Tucumán». Publicación Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de la Provincia de Tucumán.
- Tineo, A., Ponti, N. y Ruiz, A., 2007. Identificación de fuentes de agua subterránea en el sudoeste de la provincia de Tucumán. V Congreso Argentino de Hidrogeología, Paraná, Entre Ríos.
- Vergara, G., Hidalgo, M., Balegno, M., 1997. Perfil Perfil geotermométrico entre Juan Bautista Alberdi y Villa de Río Hondo (Provincias de Tucumán y Santiago del Estero, Argentina). Boletín Geológico; (6-7): 175-181.

ANEXO

| UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MEDICIÓN | | | | |
|-------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------|
| Estación | latitud | longitud | x (Posgar) | y (Posgar) |
| MT00 | 27°50'11.3" | 65°12'21.9" | 3578212 | 6921391 |
| MT01 | 27°49'56.76" | 65°10'36.12" | 3581059 | 6921820 |
| MT02 | 27°49'36.12" | 65°09'32.28" | 3582866 | 6922447 |
| MT03 | 27°49'6.6" | 65°08'35.8" | 3584413 | 6923343 |
| MT04 | 27°49'46.9" | 65°07'26.9" | 3586293 | 6922083 |
| MT06 | 27°47'31" | 65°06'36.7" | 3587692 | 6926261 |
| MT06bis | 27°47'30.5" | 65°06'23.1" | 3588064 | 6926272 |
| MT07 | 27°47'28.3" | 65°05'18.1" | 3589844 | 6926330 |
| MT08 | 27°47'30.1" | 65°03'54.9" | 3592119 | 6926256 |
| MT09 | 27°47'41.1" | 65°02'41.1" | 3594135 | 6925905 |
| MT10 | 27°47'52.92" | 65°00'59.93" | 3596908 | 6925520 |
| MT12 | 27°46'15.9" | 65°11'31" | 3579649 | 6928628 |
| MT13 | 27°45'52.7" | 65°10'34.8" | 3581197 | 6929335 |
| MT14 | 27°45'22.9" | 65°09'54.6" | 3582300 | 6930242 |
| MT15 | 27°46'6.2" | 65°08'34.4" | 3584489 | 6928895 |
| MT16 | 27°45'57" | 65°06'57.9" | 3587134 | 6929161 |
| MT17 | 27°45'25.6" | 65°05'52.6" | 3588923 | 6930120 |
| MT18 | 27°45'47.3" | 65°04'49.9" | 3590641 | 6929428 |
| MT19 | 27°45'23.7" | 65°03'22.6" | 3593033 | 6930158 |
| MT20 | 27°44'35.1" | 65°02'30.3" | 3594510 | 6931607 |
| MT21 | 27°44'11.3" | 65°01'18.4" | 3596438 | 6932338 |
| MT22 | 27°50'29.5" | 65°05'4.3" | 3590188 | 6920740 |
| MT23 | 27°49'29.3" | 65°03'30.5" | 3592761 | 6922581 |
| MT24 | 27°50'14.5" | 65°02'8" | 3595013 | 6921175 |
| MT25 | 27°51'1.7" | 65°00'8.1" | 3598278 | 6919709 |
| MT26 | 27°48'46" | 65°10'13.8" | 3581736 | 6923993 |
| MT27 | 27°49'19.7" | 65°00'29.6" | 3597714 | 6922839 |
| MT28 | 27°47'56" | 65°09'31.1" | 3582913 | 6925521 |
| MT29 | 27°46'42" | 65°07'56.9" | 3585515 | 6927781 |
| MT30 | 27°44'30.3" | 65°05'3.8" | 3590266 | 6931818 |
| MT31 | 27°42'53.5" | 65°04'38.3" | 3590998 | 6934777 |
| MT32 | 27°41'57.8" | 65°07'50" | 3585754 | 6936535 |
| MT33 | 27°42'1.2" | 65°10'0.7" | 3582177 | 6936456 |
| MT34 | 27°43'47.7" | 65°09'29" | 3583023 | 6933167 |
| MT35 | 27°43'58.2" | 65°10'32.4" | 3581284 | 6932854 |
| MT36 | 27°42'7.8" | 65°00'2.2" | 3598572 | 6936125 |
| MT37 | 27°46'30.9" | 65°00'23.7" | 3597918 | 6928033 |
| MT38 | 27°46'35.8" | 65°03'24.9" | 3592967 | 6927922 |
| MT39 | 27°41'.2" | 64°58'42.4" | 3600781 | 6938195 |
| MT40 | 27°51'28.7" | 65°08'45" | 3584133 | 6918967 |
| MT41 | 27°50'35.8" | 65°10'48.5" | 3580758 | 6920624 |
| MT42 | 27°50'56" | 65°07'33.5" | 3586095 | 6919961 |

