

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOELECTRICOS (1D) COMO APOYO EN LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS SUPRABASALTICOS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

Silva Busso, Adrián^{1,2}, Masú Javier², Machado Patricio³ y Cosentino José³

¹ DSH - Instituto Nacional del Agua (INA)

² Dpto. Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Buenos Aires

³ Universidad Tecnológica Nacional Regional Concordia, Entre Ríos

RESUMEN

La prospección de acuíferos en la provincia de Entre Ríos acusa la falta de un estudio integrador que permita orientar la exploración y mejorar los resultados de la misma. Los métodos geoelectrónicos han sido ampliamente empleados en la región para la prospección de acuíferos someros y termales profundos. Sin embargo, no han sido interpretados regionalmente sobre la base de un modelo hidrogeológico conceptual de correlación entre las respuestas resistivas del subsuelo. Este estudio presenta una propuesta de interpretación en esa dirección analizando la respuesta resistiva de los acuíferos de la Sección Suprabasáltica en toda la provincia. Se determinan seis unidades resistivas y proponen valores resistivos guía para cada una de ellas correlacionándolas con la hidrogeología local en cada caso en función de la información hidrogeológica disponible del subsuelo entrerriano. Se concluye en una propuesta de regionalización y sectorización de las diferentes unidades resistivas.

Palabras Clave: Geoelectrónica, Hidrogeología, Acuíferos

ABSTRAC

The aquifers prospecting in the province of Entre Rios has a lack of an integrated study, to guide the exploration and improve the results of the same. Geoelectrical methods have been widely used in the region to explore shallow and deep thermal aquifers. However, they have been interpreted regionally from a conceptual hydrogeological model that includes the correlation between soil resistivity responses. This study shows a proposal for interpretation in that direction by analyzing the resistive response of aquifers in the Suprabasáltica Section throughout the province. Six resistive units are identified and propose resistive values guide for each one, correlating them with the local hydrogeology in each case, depending on the available subsurface hydrogeological information. We have concluded in a proposal of regionalization and segmentation of the different resistive units.

Keywords: Geoelectric, Hydrogeology, Aquifers

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Este estudio realiza, sobre la base de perforaciones preexistentes, el conocimiento hidrogeológico actual y el apoyo de métodos geoelectrónicos, un modelo hidrogeológico conceptual de correlación entre las respuestas

resistivas del subsuelo y los acuíferos de la Sección Suprabasáltica en diferentes zonas de la provincia de Entre Ríos. Existen diversos estudios geológicos e hidrogeológicos de diferente alcance regional en la provincia que mencionan el uso de estas técnicas y su posible interpretación para los niveles acuíferos Intra e Infrabasálticos (Acuífero Termal Guaraní) y que ha sido tema de discusión de diversos autores algunos inéditos, y otros publicados como Oleaga et.al (2007); Silva Busso, (1999); Bertolini y Toma (1992). En particular los Acuíferos Suprabasálticos destacan por su intenso uso, su importancia como fuentes de abastecimiento humano, su valor económico en el uso agrícola-ganadero, industrial e incluso su valor estratégico, si los consideramos vehiculizadores del desarrollo regional dada su gravitación en el producto bruto provincial y nacional (Silva Busso y Amato, 2009). Sin embargo, casi se carece en la bibliografía de menciones acerca de la aplicación e interpretación de métodos geoelectricos en dichos acuíferos, siendo estos métodos los más empleados (sino los únicos) en la prospección del recurso agua subterránea. La información obtenida para este estudio a partir de la aplicación de métodos geoelectricos es original, pero no debe olvidarse que su interpretación depende de la geología conocida y los modelos vigentes en el momento de su actual interpretación. Sobre la base de lo expuesto la correlación e interpretación entre la respuesta resistiva del subsuelo con un adecuado modelo hidrogeológico, consecuente con la información disponible, justifica plenamente el objetivo de este estudio.

AREA DE ESTUDIO

Territorialmente este estudio comprende a la provincia del Entre Ríos (figura 1). El relieve presenta un gradiente muy ondulado y la zona se encuentra modelada y surcada por infinidad de cursos fluviales y pequeñas cañadas. El proceso fluvial es el agente geomorfológico más importante como moderador del paisaje de la región.



Figura 1. Área de estudio. Provincia de Entre Ríos

La Provincia está dividida en dos regiones climáticas: una pequeña franja al norte de la provincia que corresponde al clima subtropical húmedo

de llanura y otra que cubre el resto de su territorio y corresponde al clima templado húmedo de llanura. Debido a la diversidad de factores pedogenéticos concurrentes y el grado de incidencia de cada uno de ellos en situaciones particulares y alternativas reflejadas en la morfogénesis de los suelos, hace que esta provincia, como pocas en el país, exhiba un verdadero catálogo de suelos. Dentro de su territorio se encuentran hasta hoy 8 de los 10 Órdenes que contempla la clasificación taxonómica del sistema norteamericano vigente (Soil Survey Staff, 1975).

METODOLOGÍA

La cuenca Chacoparanense, en la región de Entre Ríos, se caracteriza por una marcada ausencia de afloramientos de edades inferiores al cuaternario por lo tanto gran parte de la información geológica de apoyo a este estudio provendrá de los pozos y las obras de captación de agua subterránea de diversos estudios en puntos específicos de la provincia.

La recopilación bibliográfica ha consistido en el análisis de las publicaciones regionales más importantes sobre hidrogeología de los últimos treinta años. La mayor parte de dicha información es difícil de recuperarla plenamente para los objetivos propuestos, por lo tanto, se considerará que la información integrada será válida en el contexto y en el momento que se realice este estudio.

Para la interpretación se han recopilado datos de perforaciones provenientes de diferentes fuentes (Santi y Bianchi, 2004; Santi y Auge, 2002; Santi, 2002; Silva Busso, 1999; Santi et.al., 1995; SNGM, 1965) y se ha revisado los planos de perforaciones de agua y descripciones geológicas reinterpretando la información redefiniendo la nomenclatura y los límites estratigráficos a las concepciones más modernas y recientes (Fernández Garrasino, 2008; Fernández Garrasino y Rezoagli, 2008; Fernández Garrasino, 2005; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004; Silva Busso, 1999; Aceñolaza, 2007; Aceñolaza 2000; Filí et.al., 1993, Iriondo, 1980).

Como se ha mencionado se propone en este estudio correlacionar la información hidrogeológica con el estudio de campo aplicando métodos geoelectricos sobre los niveles geológicos más someros y establecer un modelo de correlación. Los métodos geoelectricos son de rápida y eficaz aplicación y conceptualmente se basan en la medición de la resistividad del subsuelo. Esta magnitud (resistividad ρ) es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado. Las rocas se comportan como conductores de resistividad muy variable, debida principalmente a los cambios litológicos y el hecho de que sus poros están rellenos de fluidos (aire y agua). La resistividad depende de diversos factores, uno de ellos es la salinidad del agua contenida por los sedimentos; otros factores importantes, tales como el tipo de sedimento, variaciones litológicas y e incluso anisotropías direccionales consecuentes de estructuras geológicas. Las corrientes eléctricas que interesan a la prospección no recorren conductores lineales, sino que recorren medios tridimensionales.

El problema se aborda desde la suposición de que el subsuelo se compone de varias capas, cada una de ellas con distintas características, en las cuales la resistividad es constante y que están separadas entre sí por superficies planas. Los datos se toman desde la superficie del terreno y dan

como resultado una resistividad ficticia que dependerá de las resistividades verdaderas de cada capa y de las distancias entre los electrodos. Esta cantidad se conoce como resistividad "aparente" (ρ_a) que es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones y que se toma como base para la posterior interpretación. La etapa interpretativa del método consiste en determinar la resistividad "verdadera" (ρ_v) aplicando métodos de ajuste de curvas patrón a la curva de campo (diagráfias) empleando un modelo de capas previamente definidos sobre la base de la geología local en cada sondeo. Luego se correlaciona el modelo de capas resistivas verdaderas (ρ_v) con la hidrogeología local. Las ventajas del método residen principalmente en que se lee y analiza igual que en cualquier parte del mundo. Se ha empleado el Método Schlumberger que consiste en un dispositivo electrónico lineal, en este caso simétrico, en el que la distancia MN es muy corta con respecto a la AB. El mismo es muy práctico para la realización de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) porque las curvas obtenidas son expresivas y sensibles a las características del corte geoelectrico sobre el que se efectuaron las mediciones. Como los valores de ΔV disminuyen de estación a estación, se necesita que se efectúen "empalmes", es decir aumentos de la distancia entre M y N. Este procedimiento provoca "saltos" en los valores de resistividad que se deben corregir a fin de conseguir una curva continua. Es un método conocido, probado y aceptada desde hace más de 100 años y con una justificación científica que lo convierte en universal (Orellana, 1982; Custodio y Llamas, 1983). El mismo es método válido para cualquier tipo de estudio o confrontación de la información obtenida que siempre puede volver a ser interpretada. Este estudio requirió de 5 campañas de campo realizadas durante el primer semestre del 2011 dividiendo el territorio provincial en aproximadamente 5 secciones sin otro objeto que facilitar la logística y movilidad de la tarea. La primera involucró los departamentos de Federal, Feliciano, Federación y Concordia; la segunda los departamentos de San Salvador, Villaguay, La Paz y Paraná; La tercera los departamentos de Diamante Victoria Nogoyá y Tala; la cuarta los departamentos de Colón, Uruguay y Gualaguaychú y finalmente la quinta involucro los departamentos de Gualaguay e Islas el Ibicuy. Las tareas de campo han consistido fundamentalmente en dos: la ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y la revisión de la geología de afloramientos, canteras y pozos.

Los SEV se realizaron en aquellos lugares donde la escasez de datos de pozo era muy significativa y tuvieron como objetivo completar en forma indirecta y mediante interpretación la posible hidroestratigrafía de profundidad. Para ello se realizaron también SEV paraméricos, es decir, cercanos a pozos de geología e hidrogeología conocida (dada la influencia de la salinidad del agua en el método). Así, fue posible realizar 43 SEV superando ampliamente nuestras expectativas logístico-operativas.

Posteriormente, se realizó en gabinete la interpretación geofísica primero e hidrogeológica después cuyos resultados se exhiben en este estudio. A lo largo de la lectura de este trabajo se debe tener presente que este método es una aproximación al conocimiento mediante modelos y es susceptible de ser falsado en el futuro a la luz de nuevos datos, metodologías e incluso interpretaciones de las que hoy no se disponen, continuando con ciclo que dé lugar al incremento del conocimiento científico.

ANECEDENTES GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS DEL SUBSUELO ENTRERRIANO

Hidroestratigrafía Regional

La geología y estratigrafía de la cuenca Chacoparanense Argentina (que involucra a la Provincia de Entre Ríos) comienza a ser conocida prácticamente desde las primeras perforaciones de la Dirección de Geología, Minas e Hidrogeología (Actual Subsecretaría de Minería) con el objetivo de brindar abastecimiento de agua al Ferrocarril a principios de siglo. La Hidroestratigrafía de la región entrerriana puede ser tan compleja como la estratigrafía, pero a los fines y alcances de este trabajo consideraremos la hidroestratigrafía relacionada a los principales acuíferos de la región de estudio porque estos en particular caracterizan este estudio. Recientemente pueden citarse aportes interpretativos de información geológica con objetivos energéticos (Silva Busso et.al., 2011) e hidrogeológicos como los vertidos en el estudio de Santi et.al., (1995); Silva Busso (1999), Auge y Santi (2002); Santi (2002); Santi y Bianchi (2004). En principio, se reconocen las siguientes unidades hidroestratigráficas en territorio provincial:

Basamento Hidrogeológico

El basamento cristalino en la región De composición ígneo – metamórfico, aflora en la zona suroccidental de la República Oriental del Uruguay, en algunas islas e islotes en la zona de desembocadura del Río Uruguay y en la isla de Martín García, no aflora en la provincia de Entre Ríos. Sin embargo, diversas perforaciones en el sudeste alcanzaron el basamento cristalino a profundidades relativamente someras. Esta es la unidad acuífuga basal de los sistemas acuíferos que se desarrollan por encima del mismo.

Sección Infrabasáltica

Las sedimentitas continentales de la sección Infrabasáltica también han sido atravesadas por las captaciones de agua termal dado que ninguno de estos términos formacionales aflora en territorio entrerriano. La geología del subsuelo región oriental de la provincia, en particular las Formaciones Serra Geral, Botucatú y Piramboiá (de edades comprendidas entre Triásico- Jurasico medio), su correlato con la geología del la R.O. Uruguay y los aspectos hidrogeológicos de estas unidades (que algunos autores denominan Acuífero Guaraní) fue estudiada por Silva Busso (1999) y diversas publicaciones posteriores (Silva Busso et.al., 2002; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004). Tras el desarrollo del Proyecto Acuífero Guaraní, (cuyo principal área de estudio fue Brasil, Paraguay y Uruguay y muy tangencialmente abarco aspectos geológicos o hidrogeológicos en Argentina), se pueden incluir algunos aportes relacionados con detalles de la litología de las secciones Interbasáltica e infrabasáltica (Aguirre et.al, 2007) que no modifican sustantivamente la estratigrafía propuesta previamente para esas unidades.

Sección Intrabasáltica

El complejo tecto-efusivo regional conocido bajo la denominación de F Serra Geral (Hausen, 1919) de edades comprendidas entre Jurasico medio Cretácico medio posee gran extensión regional. Frecuentemente se ha

entendido por varios autores a la Formación Serra Geral como solo a las secuencias volcánicas, aunque Silva Busso (1999) incluye las sedimentitas intercaladas como un miembro clástico (Solari). El Miembro Posadas (Gentili y Rimoldi, 1979) constituye las unidades basálticas que contienen interestratificadas las areniscas descriptas. Ambos miembros son acuíferos. El primero es clástico, (Mbo. Solari y Acuífero Solari) de composición arena fina y probable origen eólico es importante en la región porque constituye uno de los horizontes de aporte del Sistema Acuífero Termal (Silva Busso, 1999). El segundo es fisurado (Mbo. Posadas y Acuífero Arapey en ROU) y es un importante acuífero en la Rep. Oriental del Uruguay.

Sección Suprabasáltica

Constituye el conjunto de acuíferos hallable en los sedimentos dispuestos sobre los basaltos de la F. Serra Geral de edades comprendidas desde el Cretácico superior al reciente y donde se considera fundamentalmente a la F. Paraná como horizonte guía como ocurre en Buenos Aires y Santa Fe (Sala et.al, 1983).

Sección Suprabasáltica- Hipoparaniana

Se reconoce una sucesión sedimentaria de origen mayoritariamente continental y edades comprendidas entre el Cretácico superior y el Paleógeno inclusive. Está dividida en varias formaciones de hasta 350 m espesor y constituye un conjunto de areniscas, limos y arcillas castañas, rojas y rosadas reconocidas como Formaciones Fray Bentos, Puerto Yerúa, Asencio y hacia occidente Formación Olivos probablemente, que presenta varios niveles acuitados y algunos acuíferos clásticos y fisurados de variable salinidad y muy poco conocidos a la actualidad. Algunos de ellos como el Acuífero Puerto Yerúa adquieren importancia en algunas ciudades entrerrianas del litoral uruguayo.

Sección Suprabasáltica- Paraniana:

De origen marino y edad Mioceno (Neógeno), se encuentra sobreimpuesta sobre la anterior, constituida por arcillas verde azuladas y verdes con intercalaciones arenosas y abundantes fósiles marinos, predominando los sedimentos acuicludos y existiendo algunas intercalaciones acuíferas de muy buen rendimiento. Se extiende ampliamente en la región de la Cuenca Chacoparanense y su particular litología y extensión permite considerarla un verdadero horizonte guía para la hidroestratigrafía (como ocurre con la F. Serra Geral). A excepción de las zonas donde la altura relativa del basamento ha controlado la transgresión Miocena en la región oriental entrerriana.

Sección Suprabasáltica- Epiparaniana:

Es la tercera sección acuífera que por su accesibilidad y características acuíferas resulta la más explorada. Se desarrolla en toda el área de estudio a excepción de las áreas donde aflora el basamento de roca dura. En Entre Ríos constituye depósitos de sedimentos acuíferos, de granulometría variable desde gravas (F. Salto Chico) hasta arena media a fina con e intercalaciones de niveles arcilloso (F. Ituzaingó). Son niveles correlacionales con la Formación Salto (Bossi, 1966) y Formación Puelches

(Döering 1882) continentes del Acuífero Puelches (Santa Cruz, 1972) en Buenos Aires y Santa Fe. Son los principales acuíferos de la provincia de edades Plio-pleistocenas. En Entre Ríos y por encima de estos hacia el oeste se superponen las F. Hernandarias, Tezanos Pintos, Alvear y otras de edades cuaternarias y que pueden contener acuíferos más restringidos (aunque su comportamiento en general es de acuitardos) y de explotación subordinada. Hacia el este se encuentra la F. Ubajay, aunque de litologías psamíticas e incluso psefíticas su importante cantidad de material limo arcilloso en la matriz limita sus posibilidades acuíferas y también es de uso subordinado. La hidroestratigrafía de la tabla 1 se presenta en base al trabajo de Santa Cruz y Silva Busso, (1999) aunque actualmente se encuentra en revisión.

Estratigrafía	Hidroestratigrafía	Tipo
Formación Hernandarias y/o Tezanos Pintos, Ubajay, otros.	SUPRABASALTICA Epiparaneana	Acuitardos y Acuíferos
Formación Ituizangó y/o Salto Chico	SUPRABASALTICA Epiparaneana	Acuíferos
Formación Paraná ²	SUPRABASALTICA Paraneana	Acuíferos y Acuícludos
Formación Fray Bentos y Arroyo Avalos	SUPRABASALTICA Hipoparaneana	Acuitardos y Acuícludos
Formación Puerto Yerúa ¹	SUPRABASALTICA Hipoparaneana	Acuíferos fisurados
Formación Serra Geral (Mbo. Posadas)	INTRABASALTICA (Basáltica)	Acuífero fisurado
Formación Serra Geral (Mbo Solari)	INTRABASALTICA (Clástica)	Acuífero
Formaciones Botucatú, Piramboía y otras relacionadas.	INFRABASALTICA (Clástica)	Acuífero y Acuitardos
Paleozoico y Basamento	BASAMENTO HIDROGEOLOGICO	Acuífugo

Tabla 1. Hidroestratigrafía propuesta para la comarca entrerriana. ¹ Acuíferos relacionados con al estratigrafía de la región oriental de Entre Ríos y la Rep. del Uruguay. ² Ausente del registro en la Región Oriental de Ente Ríos.

La región se caracteriza de otras en que el control estructural adquiere mayor importancia sobre el comportamiento hidráulica e hidroquímico de los acuíferos Infrabasálticos e Intrabasálticos (Silva Busso, 1999). Probablemente la influencia de este control alcance al paleógeno y al neógeno (Silva Busso et.al., 2011) posiblemente condicionando la geometría de los acuíferos. Sobre los Sedimentos Fluviales Pli-pleistocenos – actuales y según Filí et. al., (1997) y Filí y Tujchneider, (1977) este control de las estructuras de profundidad es verificable en el Arroyo Feliciano y muy posiblemente en los principales cursos fluviales de la provincia de Entre Ríos. Sin embargo, el reciente estudio de Silva Busso et.al., (2011) muestra que no se manifiestan control estructural profundo en dichos sedimentos y los cursos fluviales entrerrianos, donde los cambios glacioeustáticos del cuaternario parecen haber tenido mayor influencia.

RESULTADOS

Datos de los Sondeos Eléctricos Verticales

Se han usado métodos geoelectricos para determinar, a partir de su interpretación, la posible ocurrencia en profundidad de las unidades reconocidas. Debe tenerse presente que las respuesta resistiva del terreno involucra el conjunto agua+roca, el uso de pozos paramétricos (SEV realizado cerca de pozos de geología conocida) y el conocimiento hidrogeológico regional por parte del interprete son las dos principales fortalezas de la interpretación de esta información.

Una vez concretada la densidad de las mediciones (distancia entre centros de SEV contiguos) y su posición en función de las zonas donde no existía información y los pozos paramétricos elegidos se efectuaron las tareas de campo mediante la realización de SEV con el uso de un Terrámetros (dispositivo más fiable que el resistímetro ya que mide la ΔV y ΔI reales calculando la ρ_a) y con largos de ala (AB/2 final) a 320 metros del centro del tenido. Las curvas de campo obtenidas fueron en general de buena calidad ya que no aparecieron datos anómalos y los empalmes se resolvieron sin problemas.

Luego, se elaboraron los datos obtenidos interpretándolos, primeramente con curvas patrón para usarlas de referencia y luego con programas de computación, para obtener la distribución de resistividades en el subsuelo y así poder traducirlas a los cortes hidrogeológicos que se necesitaban como resultado. La información recopilada de las descripciones litológicas de pozos perfiles litológicos de afloramientos y canteras es utilizada para el ajuste paramétrico de las respectivas posiciones medidas y para una mejor interpretación global del esquema geológico de la zona.

Considerando esto último la tabla 2 nos da una aproximación al porcentaje de SEV donde fue posible interpreta cada unidad geológica considerada y que resultan útiles en cada caso para la confección cartográfica y la interpretación geoelectrica.

Formaciones	Porcentaje %
Hernandarias, Ubajay, Talavera y otras	100
Ituzaingo y Salto Chico	100
Paraná	100
Fray Bentos	51
Olivos Ascencio y otros	28
Puerto Yeruá	28
Serra Geral	7
Basamento	0

Tabla 2. Representatividad de la información geoelectrica en la interpretación

Como el tendido es constante en longitud la profundidad de alcance es también constante (entre 150-180mbbp) lo que significa que la altimetría de las unidades en el subsuelo condicionaran la respuesta resistiva. No obstante, todos los SEV atraviesan las secuencias cuaternarias. Por esta razón y al igual que los datos de las perforaciones esto nos determina que los niveles más profundos son más difíciles de alcanzar en los SEV, pero al

menos aumenta la densidad de información favoreciendo la representatividad de la interpolación y una correlación más adecuada de la información. Se realizaron un total de 43 sondeos eléctricos verticales (SEV) en todo el territorio provincial. El mapa de la figura 2 muestra la distribución geográfica de los SEV en conjunto con los afloramientos y pozos paramétricos.

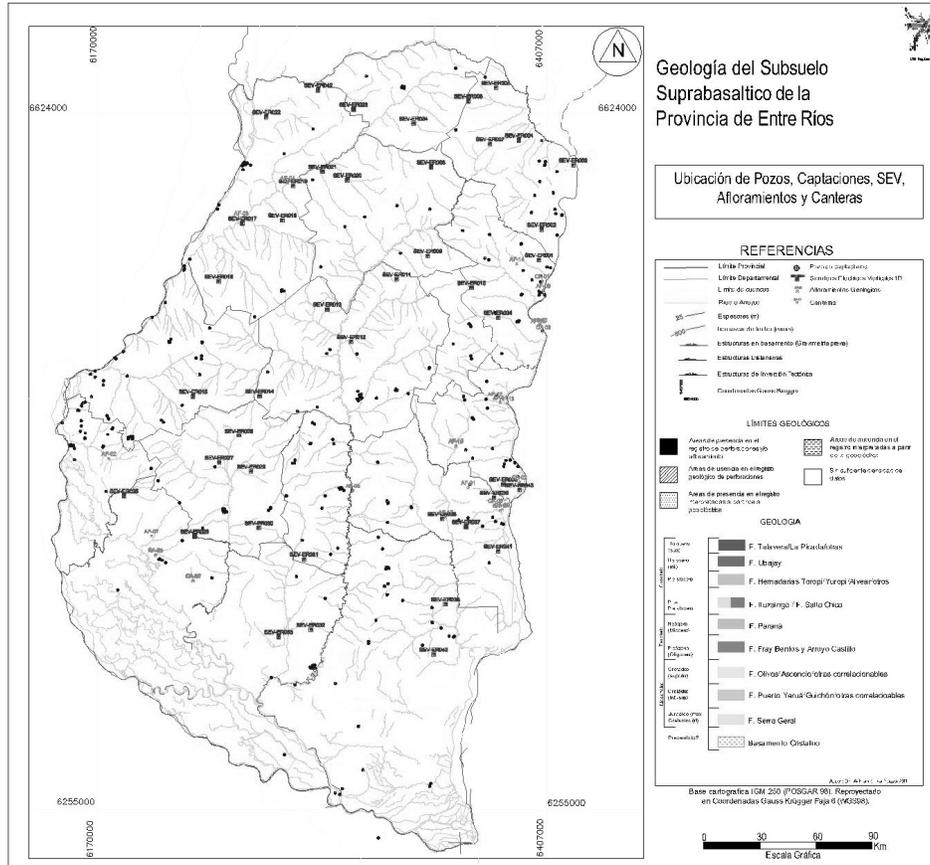


Figura 2. Distribución de los SEV y de los pozos y canteras

Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Los SEV realizados alcanzan para apoyar una caracterización y exploración preliminar con miras a ser empelados como una forma indirecta de determinar la estratigrafía del subsuelo. El concepto consiste en interpretar la disposición de los niveles resistivos en profundidad y correlacionarlos arealmente con los demás y conjuntamente con los datos de pozo, afloramiento y canteras. Las diagráfias de los SEV realizados han permitido interpretar la disposición de los niveles resistivos en cada sitio sondeado. En tal sentido se han identificado hasta seis paquetes o capas resistivas. La distribución de los horizontes resistivos en superficie y profundidad es muy variable en espesores, profundidades y en la salinidad de las aguas de los sedimentos. Este hecho dificultará la interpretación porque evidencia un ambiente con cambios no solo geológicos sino hidroquímicos que no pueden ser correlacionados adecuadamente dada que en algunos sitios no se conoce la hidrogeología con suficiente detalle o por la falta de pozos paramétricos. No se ha recurrido a la reinterpretación o análisis de las campañas de SEV

profundas realizadas en su momento como apoyo a lo pozos termales debido a que los tenidos fueron realizados con otros propósitos exploratorios más profundos y poseen poca resolución en las profundidades de interés en este estudio. Las unidades resistivas se han interpretado tentativamente bajo los siguientes criterios:

- ✓ La zona no saturada es relativamente poco potente.
- ✓ La zona saturada contiene aguas que son normalmente dulces, aunque en algunos casos pueden ser salobres razón por la cual puede cambiar la respuesta resistiva de una misma unidad.
- ✓ Las unidades más profundas poseen mayor dispersión y escasez de información los que hace más subjetivas las interpretaciones y más expuestas a errores.

A continuación se detalla la interpretación geoelectrica de las unidades resistivas por los SEVs.

Unidad Resistiva I

Esta unidad resistiva ha sido reconocida en todos los SEV realizados. Para su mejor interpretación es conveniente separarla en dos Subunidades las denominaremos Subunidad Ia y Ib. Esta separación se fundamenta en el contraste resistivo de la toda la Unidad I como puede verse en la distribución modal de las observaciones presentado en la figura 3.

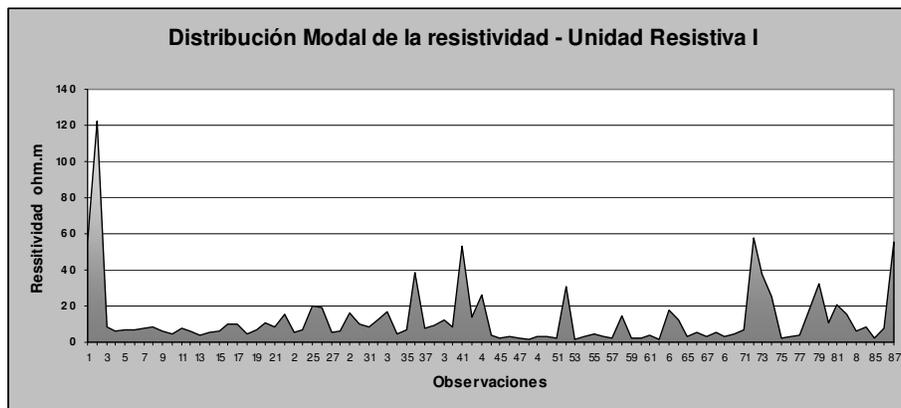


Figura 3. Distribución modal de la resistividad en la Unidad Resistiva I

La Subunidad Ia posee un espesor promedio de 6.5 m alcanzando un máximo de 32.8 m y un mínimo de 1.6 m. Las resistividades calculadas oscilan entre 1.4 ohm.m de valor mínimo a 30.7 ohm.m de valor máximo con un promedio de 7.3 ohm.m. Esta respuesta resistiva correspondería a facies clásticas finas, probablemente limos a limos arcillosos con intercalaciones arenosas muy finas. Incluyen en general a niveles edafológicos en conjunto, escasa potencia de la zona no saturada y con niveles saturados por agua. Esta unidad resistiva contiene el nivel acuífero libre que a lo largo de las diferentes épocas del año su espesor varía en relación con las precipitaciones locales. Puede incluir depósitos evaporíticos y calcretes carbonáticos que confieren variaciones locales que pueden ser muy

significativas. También la respuesta esta en dependencia de la salinidad del acuífero libre que suele ser más alta en la zona norte de la provincia.

La Subunidad Ib posee un espesor promedio de 4.6 m alcanzando un máximo de 10.4 m y un mínimo de 1.4 m. Las resistividades calculadas oscilan entre 4.81 ohm.m de valor mínimo a 122.6 ohm.m de valor máximo con un promedio de 34.01 ohm.m. Esta respuesta resistiva correspondería a facies clásticas psamíticas, probablemente arenas finas a medianas aunque con intercalaciones arcillosas. Al igual que el caso anterior incluyen en general a niveles edafológicos en conjunto, escasa potencia de la zona no saturada y con niveles saturados por agua. Esta unidad resistiva contiene el nivel acuífero libre que a lo largo de las diferentes épocas del año su espesor varia en relación con las precipitaciones locales. La respuesta esta en dependencia más de cambios litológicos que de la salinidad del acuífero libre que suele ser de buena calidad. Aparentemente su distribución esta restringida a la región del litoral oriental de la provincia.

Unidad Resistiva II

Esta unidad resistiva ha sido reconocida en todos los SEV realizados. Para su mejor interpretación es conveniente separarla en dos Subunidades las denominaremos Subunidad IIa y IIb. En este caso esta separación no puede fundamentarse en el contraste resistivo de la toda la Unidad II porque los valores son similares, sino que se fundamente en los pozos paramétricos donde se conoce la litología que acompaña a cada respuesta resistiva. La Unidad Resistiva II subyace en todos los casos a la Unidad Resistiva I mencionada previamente. Sobre la base de estos pozos paramétricos la Subunidad IIa posee un espesor promedio de 41.5 m alcanzando un máximo de 93.7 m y un mínimo de 7.6 m. Las resistividades calculadas oscilan entre 2.4 ohm.m de valor mínimo a 95.20 ohm.m de valor máximo con un promedio de 23.90 ohm.m. Esta respuesta resistiva correspondería a facies clásticas psamíticas, probablemente arenas medianas a gruesas aunque con intercalaciones arcillosas estas son de poca potencia y escasa extensión regional. Esta unidad resistiva contiene un acuífero (a veces libre, semilibre y a veces semiconfinado) infrayacente cuyos cambios litológicos (arcillas) y de salinidad le confiere variaciones locales que pueden ser muy significativas. En general tenderemos a aceptar que la respuesta resistiva esta en dependencia más de cambios litológicos que de la salinidad del acuífero que suele ser de buena calidad. La Subunidad IIb posee un espesor promedio de 45.53 m alcanzando un máximo de 91.6 m y un mínimo de 8.9 m. Las resistividades calculadas oscilan entre 17.5 ohm.m de valor mínimo a 39.1 ohm.m de valor máximo con un promedio de 20.1 ohm.m. Esta respuesta resistiva correspondería a facies clásticas predominantemente psefíticas, probablemente gravas y arenas medianas aunque con intercalaciones arcillosas de poca expresión. Esta unidad resistiva contiene un acuífero (a veces libre, semilibre y a veces semiconfinado) infrayacente cuyos cambios litológicos (arcillas) le confiere variaciones locales que pueden ser significativas. En general tenderemos a aceptar que la respuesta resistiva esta en dependencia más de cambios litológicos que de la salinidad del acuífero que suele ser de buena calidad. Puede presentar acuñamiento lateral y correspondería a sedimentos clásticos más finos en zona saturada y no saturada. Su distribución esta restringida a la región del litoral oriental de

la provincia. Independientemente de esta subdivisión la Unidad Resistiva II puede considerarse representativa de litologías similares entre ambas subunidades.

Unidad Resistiva III

Esta unidad resistiva ha sido reconocida en todos los SEV realizados a excepción de los SEV 1, 2, 3, 6, 8, 24, 34, 35, 36, 40, 41 y 43. Esta Unidad Resistiva III subyace en todos los casos a la Unidad Resistiva II mencionada previamente, a excepción del SEV 25 que lo hace sobre la Unidad Resistiva I. Sobre la base de estos pozos paramétricos la Unidad III posee un espesor promedio de 85 m alcanzando un máximo de 137.2 m y un mínimo de 20.6 m. Las resistividades calculadas oscilan entre 1.3 ohm.m de valor mínimo a 19.4 ohm.m de valor máximo con un promedio de 5.65 ohm.m. Esta respuesta resistiva correspondería a facies clásticas finas, mayormente arcillas con intercalaciones arenosas finas.

En algunos casos puede las facies psamíticas pueden alcanzar las decenas de metros de espesor. Esta unidad resistiva posee un potente acuitardo, aunque en algunas regiones del sudeste entrerriano suele contener un acuífero (a veces libre, semilibre y a veces semiconfinado) suprayacente a las arcillas que incluso contendría aguas dulces. También en afloramiento se ha observado a esta unidad silicificada y/o con presencia de silcretos. Este cambio litológico (arenas, silcretos, etc.) y de salinidad le confiere variaciones locales que pueden ser muy significativas y se reflejan en un aumento de la resistividad. En general tenderemos a aceptar que la respuesta resistiva está en dependencia más de cambios litológicos que de la salinidad del acuífero que suele ser las más de las veces salobre y en algunos casos probablemente salada. Su distribución está restringida a la región del litoral occidental paraneano, centro y norte de la provincia.

Unidad Resistiva IV

Esta unidad resistiva no ha sido reconocida en todos los SEV, solo se incluye los SEV 4, 5, 6, 8, 16, 17, 18, 20, 24, 26, 35, 36, 40, 41, 42 y 43. Esta Unidad Resistiva IV subyace a la Unidad Resistiva III mencionada previamente, a excepción de los SEV 24, 36, 40 y 41. También subyace a la Unidad Resistiva II en los SEV 6, 8, y a la Unidad Resistiva I en el SEV 35 y 43. La Unidad IV poseería un espesor promedio de 60.4 m alcanzando un máximo de 115.7 m y un mínimo de 23.9 m. Las resistividades calculadas oscilan entre 1.5 ohm.m de valor mínimo a 119.3 ohm.m de valor máximo con un promedio de 38.37 ohm.m.

Dada la escasez de afloramientos y pozos paramétricos es difícil definir claramente esta respuesta resistiva. Aquí se la considerará relacionada a facies clásticas finas, mayormente limos que con intercalaciones arenosas fina de poca potencia y expresión lateral. Fuertemente calcetizada hacia la base puede contener intracalstos de origen volcánico, como se ha observado en cantera. Esta unidad resistiva también posee un potente acuitardo, aunque en y rara o difícilmente puede contener un acuífero, de contenerlo sus aguas probablemente sean salobres. Si bien serían los cambios litológicos lo que le confiere las variaciones resistivas, a escala local pueden observarse descensos de este valor muy significativos que podrían reflejar la presencia de algún acuitardo salobre. En general tenderemos a aceptar que

la respuesta resistiva esta en dependencia más de cambios litológicos. Su distribución es discontinua, mayoritariamente presente en el levante entrerriano aunque la escasa información y su profundidad hacia poniente hacen esta observación muy subjetiva.

Unidad Resistiva V

Esta unidad resistiva no ha sido reconocida en todos los SEV, solo se incluye los SEV 7, 8, 22, 24, 34, 35, 40, 41, 43. La misma subyace a varias unidades previas. A la Unidad Resistiva IV lo hace en los SEV 8, 24, 35 y 43, a la Unidad Resistiva III en los SEV 7 y 22, y a la Unidad Resistiva I en el SEV 34. En este estudio esta a Unidad Resistiva V solo se ha atravesado por completo en el SEV 34 con espesor de 65.4 m.

Las resistividades calculadas oscilan entre 5.4 ohm.m de valor mínimo a 613.4 ohm.m de valor máximo con un promedio de 211.31 ohm.m. Dada la escasez de afloramientos y pozos paramétricos es difícil definir claramente esta respuesta resistiva. Aquí se la considerara relacionada a facies clásticas psefíticas, mayormente arenas medianas con intercalaciones limosas o arcillos y poca extensión lateral. En algunos casos se lo descripio como conglomerado (pozos en al cuenca del Arroyo Feliciano) o gravas (pozos en al Cuenca del Río Gualaguaychú).

Se ha observado en afloramiento y pozos fuertemente calcetizada y silcretizada. Esta unidad resistiva puede también contener un acuífero complejo, en parte clástico y en parte fisurado (explotado en alunas zonas) con aguas que suelen ser de dulces a salobres cuando es más profundo. Se considera que serian los cambios salinos los que le confiere las variaciones resistivas. Su distribución es discontinua, mayoritariamente presente en el levante entrerriano muy restringido a l zona costera del margen derecho del Río Uruguay. También se lo ha descripto en la cuenca del Arroyo Feliciano.

Unidad Resistiva VI

Esta unidad resistiva no ha sido reconocida en todos los SEV, solo se incluye los SEV 1, 2, 3 y 34. La misma también subyace a varias unidades previas. A la Unidad Resistiva V lo hace en el SEV 34, a la Unidad Resistiva II en el SEV 2, y a la Unidad Resistiva I en el SEV 1 y 3. En este estudio esta a Unidad Resistiva VI no se ha atravesado por completo solo se alanzo su techo con resistividades calculadas oscilan entre 26.2 ohm.m de valor mínimo a 783.22 ohm.m de valor máximo con un promedio de 184.7 ohm.m.

Dada la escasez de afloramientos y pozos paramétricos es difícil definir claramente esta respuesta resistiva. Aquí se la considerara relacionada a las rocas ígneas volcánicas, muy potentes y de gran extensión lateral. Se las ha observado en afloramiento y cantera muy fisuradas y alteradas, razón por la cual esta también es poseedora un potente acuífero complejo en parte clástico y en parte fisurado con aguas que suelen ser de dulces y salobres e incluso saladas cuando es más profundo. Se considera que serian los cambios salinos los que le confiere las variaciones resistivas. Su distribución involucraría casi todo el territorio de la provincia de Entre Ríos al norte el delta paraneano.

La tabla 3 presenta un resumen de Los valores promedio de resistividad y espesor de las unidades resistivas mencionadas.

Unidad Resistiva	Resistividad ohm.m	Espesores (m)
Ia	1.4 - 30.7	1.6 - 32.8
Ib	4.8 - 122.6	1.4 - 10.4
Ila	2.4 - 95.2	7.6 - 93.7
IIb	17.5 - 39.1	8.9 - 91.6
III	1.3 - 19.4	20.6 - 137.2
IV	1.5 - 119.3	23.9 - 115.7
V	5.4 - 613.4	65.4?
VI	26.2 - 783.22	?

Tabla 3. Resumen de las características promedio de las Unidades Resistivas

Correlación entre Hidroestratigrafía y Geoeléctrica – Áreas Resistivas

En la zona de estudio se identifican claramente seis Unidades Resistivas que deben ser correlacionadas con un modelo estratigráfico regional. La correlación propuesta a continuación intenta ese vínculo interpretativa fundamental para completar una visión actualizada del subsuelo entrerriano. Debe tenerse presente en todo momento que las Unidades Resistivas I II y III poseen más pozos paramétricos, afloramientos y/o canteras lo que hace más fiable las interpretaciones y correlaciones.

Las Unidades Resistivas IV, V y VI no poseen las mismas ventajas por lo que en el futuro, a la luz de nuevos datos, pueden estar sujetas a modificaciones interpretativas. Esas unidades corresponderían a unidades geológicas que contendrían acuíferos o acuitardos con aguas salobres e inclusive salinos que conferirían pocas posibilidades de explotación. En función de lo expuesto y lo interpretado se resume la siguiente correlación geológica regional:

Formación Hernandarias, Alvear, Toropí-Yupoí, otras relacionadas

Estas unidades estarían definidas fundamentalmente por la Unidad Resistiva Ia del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 5mbbp hasta los 38 mbbp y una profundidad promedio de 16 mbbp.

Formación Ubajay

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva Ib del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 2mbbp hasta los 13 mbbp y una profundidad promedio de 7 mbbp.

Formación Ituzaingó

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva Ila del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 17mbbp hasta los 112 mbbp y una profundidad promedio de 65 mbbp.

Formación Salto Chico

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva IIb del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 11mbbp hasta los 125 mbbp y una profundidad promedio de 77 mbbp.

Formación Paraná

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva III del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 49mbbp hasta los 193 mbbp y una profundidad promedio de 131 mbbp.

Formación Fray Bentos

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva IV del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 4mbbp hasta los 193 mbbp y una profundidad promedio de 85mbbp.

Formación Puerto Yerúa y otras correlacionables

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva V del estudio geoelectrico. La profundidad de la base es muy variable desde los 12 mbbp hasta los 116 mbbp y una profundidad promedio de 77mbbp. Dada la falta de datos confiables la respuesta resistiva podría incluir unidades las arcillas de la F. Asencio o la F. Olivos, eventualmente estas podrían ser asimiladas por el método, la geometría del tendido.

Formación Serra Geral

Esta unidad estaría definida fundamentalmente por la Unidad Resistiva VI del estudio geoelectrico. No se ha reconocido la profundidad de la base se ha tomado registro del techo de la misma a profundidades comprendidas entre 2 y 11 mbbp, o sea prácticamente en zonas de afloramiento.

El cuadro de la tabla 4 resume las características geológicas supuestas sobre la base de la correlación entre el estudio geoelectrico y la estratigrafía regional.

Unidad Resistiva	Unidad Formacional	Profundidad mbbp (intervalo)
Ia	Hernandarias (otras)	5 – 38
Ib	Ubajay	2 - 13
IIa	Ituzaingó	17 – 112
IIb	Salto Chico	11 - 125
III	Paraná	49 - 193
IV	Fray Bentos (otras)	4 - 193
V	Puerto Yerúa (otras)	12 - 116
VI	Serra Geral	?

Tabla 4. Correlación entre Unidades Resistivas e Hidroestratigrafía

Las áreas resistivas se asocian en función de un modelo de capas resistivas común en toda la región considerada. Este modelo de capas se propone como guía interpretativa de cada área. Su alcance en profundidad no supera los 150-170 mbbp y esta interpretación es solo válida para ese intervalo. Las áreas se pueden dividir en:

Área A:

Fundamentalmente localizada sobre la banda noroccidental del Río Uruguay y en la región más oriental del Delta Paraneano con un área estimada de 5100Km² presenta un arreglo de tres capas de resistividades altas donde el SEV 3 de la figura 4 puede considerarse como representativo del respuesta regional involucrando las Unidades Resistivas I, II y VI. Esta

ultima en la zona del Delta Paraneano puede corresponder al Basamento Cristalino (Silva Busso y Amato, 2005).

Área B:

Localizada en la zona sudoccidental de la provincia hacia las costa del Río Paraná y rodeada por el Área D posee un área estimada de 2720Km² presenta un arreglo de 2 capas de resistividades moderadas a bajas donde el SEV 25 de la figura 4 puede considerarse como representativo de la respuesta regional involucrando las Unidades Resistivas I y III.

Área C:

Localizada en la zona norte y la región centro oriental de la provincia lindante a la costa del Río Uruguay con un área total estimada de 7530Km² presenta un arreglo de hasta 4 capas de resistividades moderadas a bajas donde el SEV 8 de la figura 5 puede considerarse como representativo de la respuesta regional involucrando las Unidades Resistivas I, II, IV y V.

Área D:

Es la mayor de la provincia, localizada en la zona centro norte y su occidental fundamentalmente lindante con todas las anteriores, incluso hallándose en forma restringida en la zona central del Area B. Poseería un área total estimada de 65890Km² presenta un arreglo de hasta 4 capas de resistividades moderadas a bajas donde el SEV 17 de la figura 5 puede considerarse como representativo de la respuesta regional involucrando las Unidades Resistivas I, II, III y IV y en alguna casos la unidad V suele reemplazar a la IV.

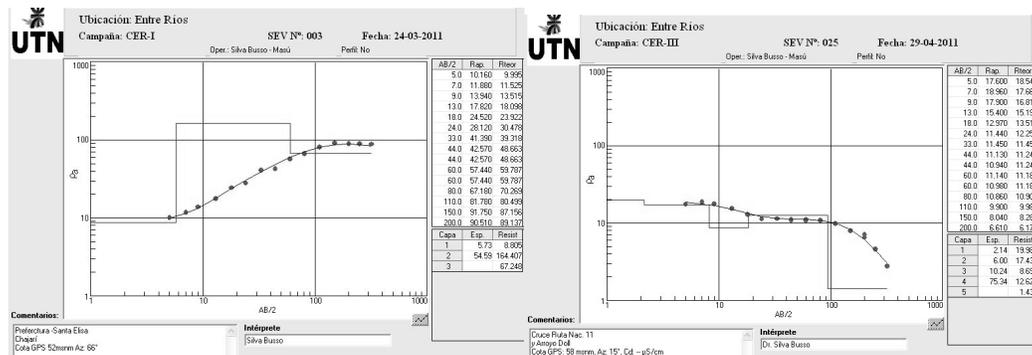


Figura 4. SEV 3 Característico del Área A y SEV 25 característicos del Área B

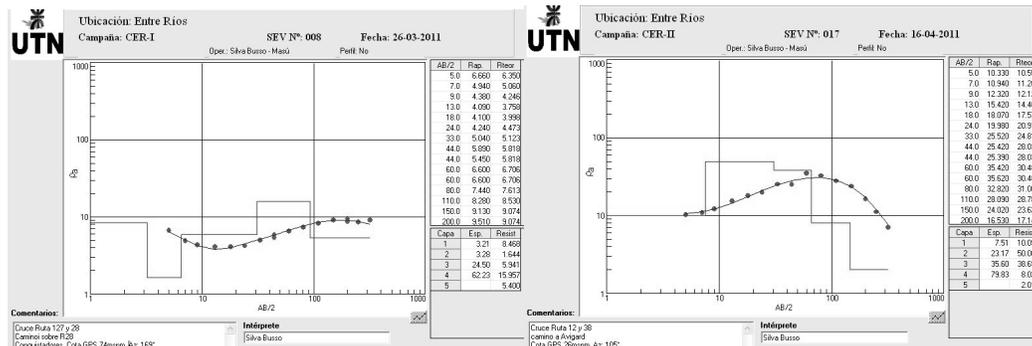


Figura 5. SEV 8 Característico del Área C y SEV 17 característicos del Área D

Sobre la base de esta interpretación se han empelado los datos de las diagráfías y los datos interpretados de la tabla 3 y 4 para completar la regionalización de información presentada en el mapa de la figura 6.

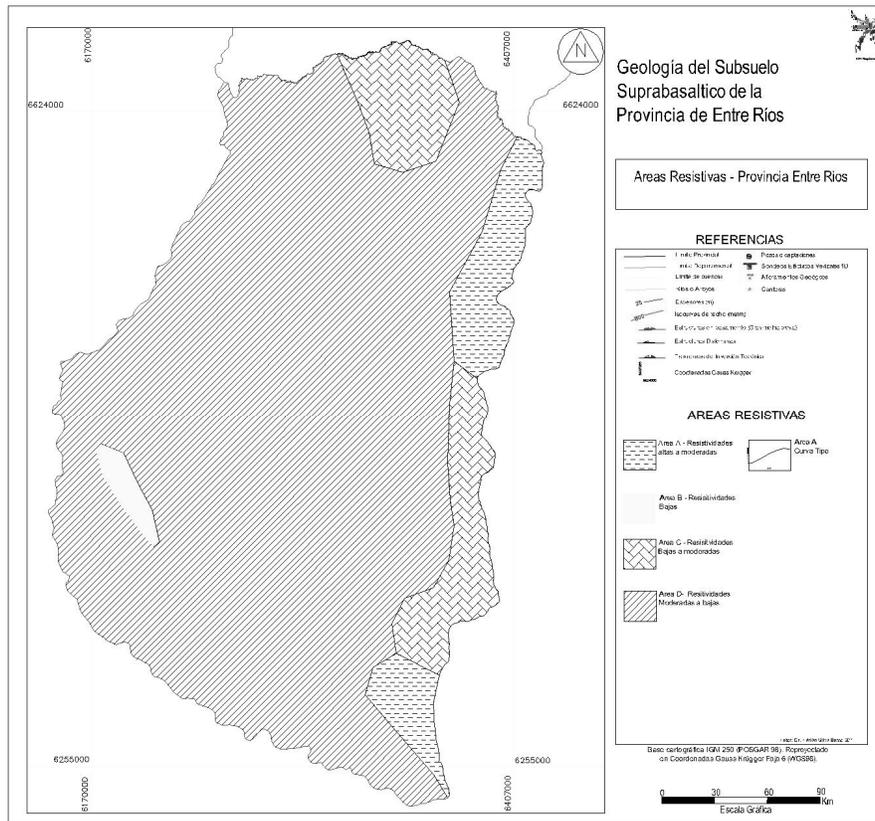


Figura 6. Sectorización de la respuesta Resistiva – Áreas Resistivas

CONCLUSIONES

En principio es importante mencionar que la información geológica aflorante y del subsuelo que es la base de este estudio es escasa, fragmentaria, dispersa y en muchos casos de compleja validación. En este contexto, la combinación de la interpretación de datos de perforación y afloramiento complementariamente con la campaña realizada de sondeos eléctricos verticales permitió al menos nivelar y compensar la distribución de datos que luego fueron empleados en la interpretación de los resultados presentados. Este aspecto metodológico fue eficaz y dio un resultado metodológico satisfactorio dado que permitió regionalizar la respuesta resistiva de los métodos geoelectrónicos y la hidroestratigrafía permitiendo, a partir de este enfoque regional, ser útil como guía prospectiva del agua subterránea en las diferentes comarcas de la provincia.

AGRADECIMIENTOS

Esta información fue generada en el Marco del convenio YPF-UTN Concordia. Los autores agradecen la participación y la ayuda en las tareas de campo de Enzo Kloster y Alberto Palacios alumnos de la UTN regional

Concordia que cumplieron muy diversas tareas con absoluta diligencia y eficiencia. También a la Lic. Alicia Rossi docente de la UTN regional Concordia quien nos acompañó al trabajo de campo en canteras y afloramientos en el sudoeste entrerriano.

BIBLIOGRAFIA

Oleada A., Azarte J., Corbo F., Larenca G., 2007. Investigación Geofísica de la Estructura Geológica de la Cuenca Chacoparanense, en un área centrada en las Ciudades de Salto (Ur) y Concordia (Ar). Acuífero Guaraní – Avances para su Gestión Sustentable, AIHSUD, Montevideo, Uruguay.

Silva Busso A., Machado P., Cosentino J., 2011. Propuesta de Control de las Estructuras del Subsuelo sobre la Geología Terciario-Cuaternaria y su Relación con la Geomorfología Fluvial en la Provincia de Entre Ríos. Convenio YPF-UTN, Facultad Regional Concordia, Concordia, Entre Ríos, Argentina (Inédito).