

Este artículo puede ser usado únicamente para uso personal o académico. Cualquier otro uso requiere permiso del autor o editor.

El siguiente artículo fue publicado en *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(1): 165-181 (2014); y lo puede consultar en <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/>



Geofísica para la localización de Agua Subterránea en Ambientes Volcánicos Áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México

Héctor López-Loera^{1,*}

¹ División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., Camino a la Presa San José 2055, Lomas 4ª sección, San Luis Potosí, S.L.P., 78216.

* hector.lopez@ipicyt.edu.mx

Resumen

Uno de los problemas más importantes en zonas áridas es el relacionado con la exploración y aprovechamiento de agua subterránea. En este trabajo se presenta el método magnético aéreo y terrestre como herramienta para la localización de zonas asociadas con permeabilidad (fracturamiento) mediante la interpretación de lineamientos y dominios magnéticos aéreos y terrestres. A partir de estas interpretaciones, se emplean métodos eléctricos por medio de secciones y sondeos eléctricos verticales para verificar si las zonas se correlacionan con humedad en el subsuelo. En los casos en que se cumplen ambas condiciones de permeabilidad y humedad, se consideran zonas con altas probabilidades para la localización de agua subterránea en las zonas áridas de la Mesa Central Mexicana. Se presenta la aplicación de estos métodos en una zona rural del Estado de San Luis Potosí, en donde existen problemas con la localización de estos recursos.

Palabras clave: Geofísica, magnetomería aérea, magnetometría terrestre, resistividad, zonas áridas de la Mesa Central Mexicana, agua subterránea.

Abstract

One of the most important problems in arid zones is the one related to the exploration and exploitation of groundwater. This paper presents the air and ground magnetic method as a tool for locating zones associated with permeability (fracturing), by means of the interpretation of alignments and of air and ground domains. Based on these interpretations, electrical methods by sections and vertical electrical soundings are used to verify if the zones are correlated to the moisture underground. If both permeability and moisture are met, they are considered as zones with high probability of locating groundwater in the Mexican Central Mesa arid zones. The application of this methodology is presented in a rural population in the State of San Luis Potosí, where problems with the location of these resources exist.

Keywords: Geophysics, aeromagnetism, magnetometry, susceptibility, resistivity, arid zones of the Mexican Central Mesa, groundwater.

1. Introducción

La localización de agua subterránea es un tema de prioridad a nivel nacional y mundial. La gran fragilidad en la disponibilidad de agua para diversos usos, es un problema que muchas de las veces se aborda con estudios geológicos y algunas veces con la aplicación de sondeos eléctricos verticales (SEVs), teniendo en ciertos casos éxito (Keller y Frischknecht, 1966; Orellana, 1972; Kirch, 2009). El problema se presenta cuando la información geológica no es suficiente para ubicar con alta certidumbre los pozos, dando por resultado pozos secos. Este problema es frecuente en zonas volcánicas áridas en donde la cubierta aluvial impide observar las posibles estructuras contenedoras de agua subterránea. Aquí se presenta una metodología para la localización de este recurso en zonas volcánicas áridas, en especial en la Mesa Central de México. La metodología está basada en un conocimiento básico de la geología, en el estudio del campo magnético (aéreo y terrestre) y de la aplicación del método eléctrico de resistividad, en dos modalidades, secciones y SEVs (Orellana, 1972).

La metodología se aplicó para resolver un grave problema de desabasto de agua en la población rural, La Dulcita, municipio de Villa de Ramos, del Estado de San Luis Potosí, ubicada al NW de la capital potosina y cercana al estado de Zacatecas (Figura 1). La Dulcita contaba para 2005 con una población del orden de los 750 habitantes (INEGI, 2010), y se abastecía de un pozo, ubicado a 5 km

al sur, que daba un gasto menor a 1 lt/seg., lo cual era completamente insuficiente para la población. Dentro y en las cercanías de La Dulcita, la Comisión Estatal de Agua (CEA) del Estado de San Luis Potosí, había perforado tres pozos resultando todos ellos secos.

Las rocas que constituyen los acuíferos se caracterizan por presentar dos propiedades físicas: porosidad y permeabilidad y por contener agua (*e.g.* Freeze y Witherspoon, 1967; Tindall y Kunkel, 1999). La metodología que se presenta permite ubicar zonas y grado de fracturamiento y medir si estas pueden estar asociadas con humedad desde la superficie.

2. Descripción del área de trabajo

La geología del área en la zona bajo estudio está representada, principalmente, por depósitos de aluvión, en las cercanías de la zona, hacia el sur de la población La Dulcita, se pudieron observar unos lomeríos relacionados con rocas volcánicas basálticas, estos no sobrepasan los 15 m de altura sobre el nivel del terreno (Figura 2). Al este de la zona existen afloramientos de la Formación Caracol, del Cretácico Superior (Labarthe y Aguillón, 1986) formando lomeríos que sobresalen de las planicies (Figura 3). Consiste de lutitas de color verdoso, en ocasiones gris muy oscuro. En la zona de Villa de Ramos aflora un intrusivo granodiorítico de gran extensión, que tiene un rumbo casi

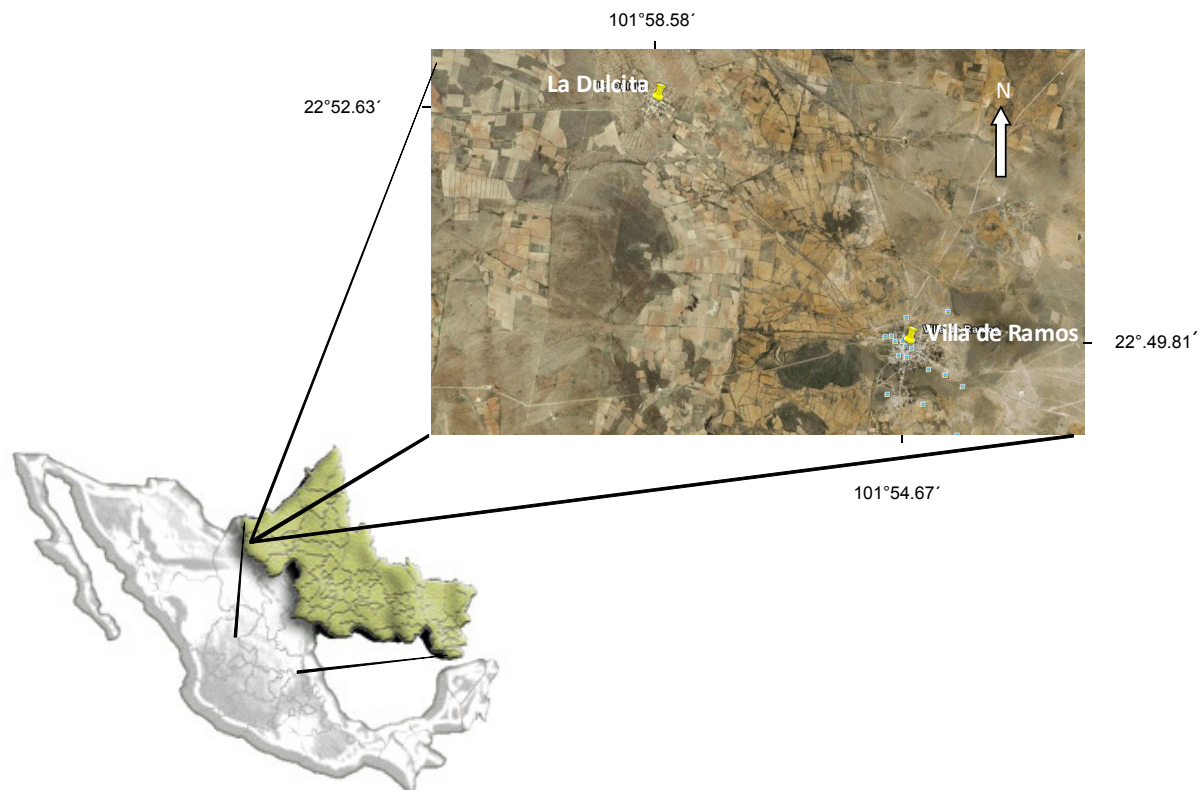


Figura 1. Imagen de satélite en donde se ubica la zona de La Dulcita, Municipio de Villa de Ramos, en el Estado de San Luis Potosí, México.

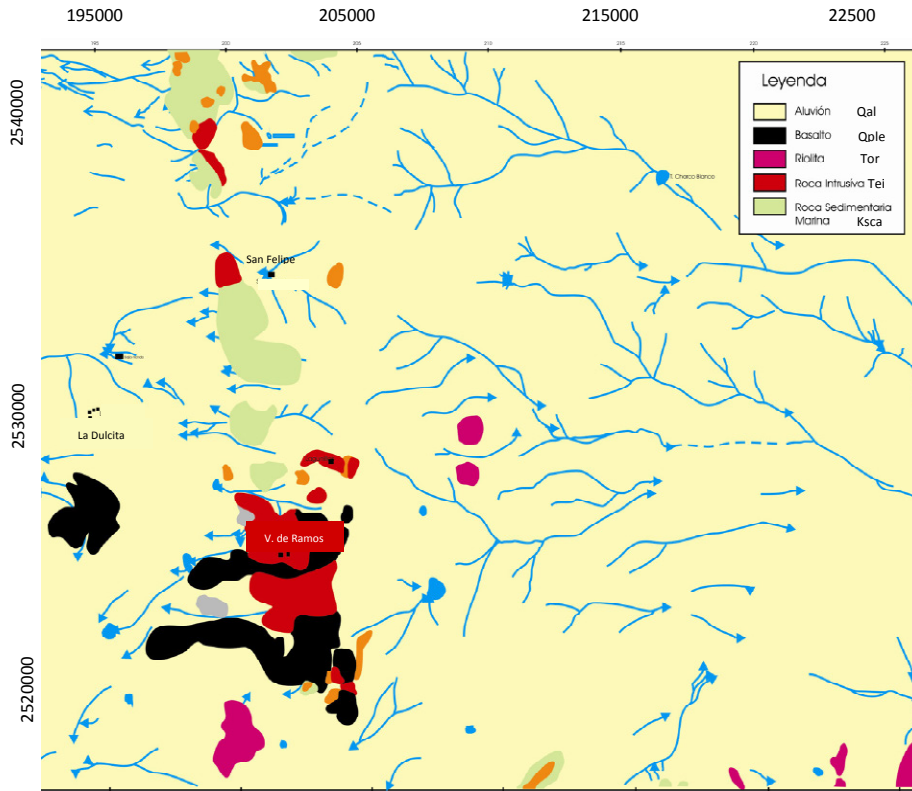


Figura 2. Mapa geológico de la zona de Villa de Ramos, modificado de Labarthe y Aguillón, 1986.

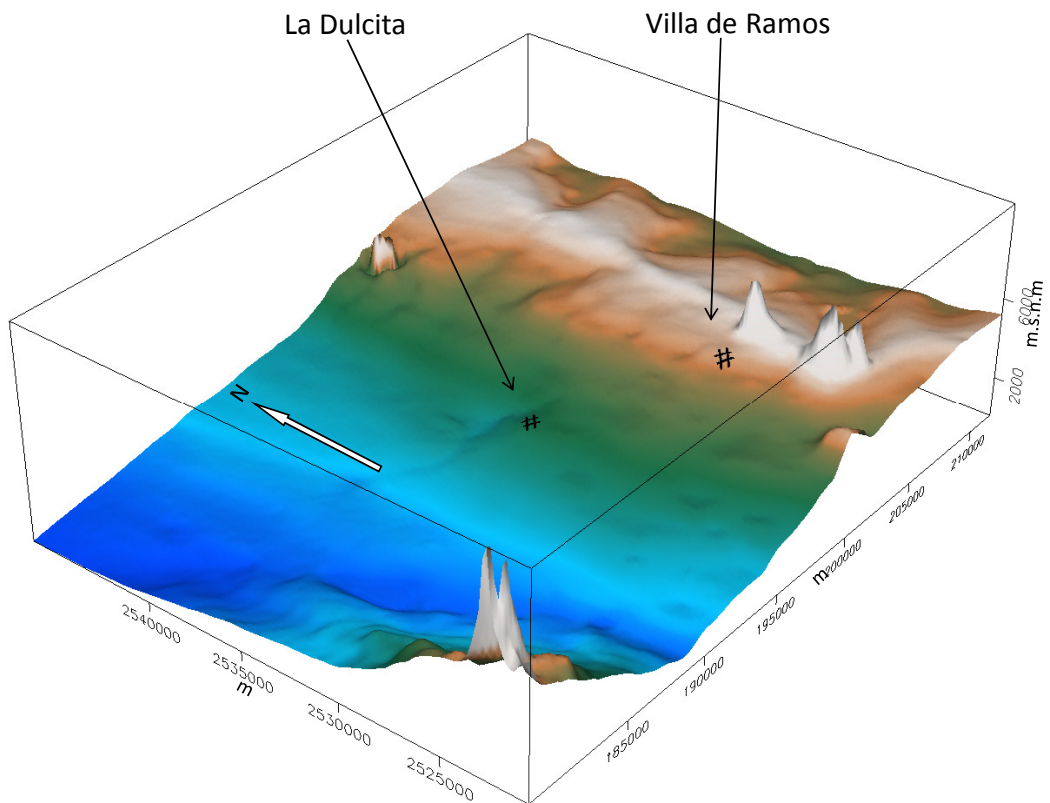


Figura 3. Modelo digital del terreno en donde se ubica La Dulcita y Villa de Ramos, San Luis Potosí, México.

norte-sur y que constituye un pilar tectónico, que en algunas zonas presenta mineralización. También al norte de Villa de Ramos existen afloramientos de rocas sedimentarias marinas (Labarthe y Aguillón, 1986).

La zona de La Dulcita se ubica en una fosa tectónica en donde la base debe estar representada por rocas sedimentarias marinas y probablemente flujos de lava basáltica.

3. Metodología

3.1. Estudio Geológico

Primeramente, se realiza una recopilación de la información geológica ya existente, en el Estado de San Luis Potosí, el Instituto de Geología de la UASLP, tiene algunas zonas cartografiadas geológicamente y el Servicio Geológico Mexicano es otra fuente de investigación geológica muy importante. Una vez recopilada la información existente, se realiza un reconocimiento geológico del área, con el fin de ubicar las unidades geológicas que pueden existir en la zona bajo estudio y se conforma un modelo digital de elevación (Figura 3), un mapa geológico del área y un modelo diagramático idealizado en donde se indiquen las principales estructuras y unidades geológicas existentes (Figura 4).

3.2. Estudio Geofísico

El estudio geofísico comprende varias etapas, en primer lugar se analiza la información aeromagnética de la zona bajo investigación. Esta se realiza aplicando una serie de algoritmos matemáticos (filtros) a los datos aeromagnéticos, que permitan resaltar ciertos rasgos y desestimar otros. Los filtros aplicados son: el IGRF (siglas en inglés), que es el Campo Geomagnético de Referencia (NOAA, 2010), el cual se calcula cada cinco años y se deberá aplicar el

inmediato inferior a la fecha del estudio aéreo (p.ej. el vuelo aeromagnético, nuestra zona de estudio se realizó en 1995, el IGRF que se debe sustraer es el de 1990) (Urrutia-Fucugauchi y Campos-Enríquez, 1993). A los valores de intensidad del Campo Magnético Total (CMT), que son los que se obtienen al volar, se les resta la contribución del dipolo principal, que existe en el núcleo terrestre, obteniéndose así, los valores del campo magnético residual (CMR; Ecuación 1).

$$\text{CMT} - \text{IGRF} = \text{CMR} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Debido a que el Campo Magnético es un vector, (se define por: magnitud, sentido y dirección), las anomalías magnéticas en estas latitudes están desplazadas de las fuentes que las producen, es por eso que otro de los algoritmos matemáticos que se debe aplicar, es un filtro que simula nuestra área de estudio se localiza en el polo, en donde la inclinación magnética es de 90° y la declinación es 0°. Este algoritmo llamado de Baranov y Naudy (1964) es mejor conocido como Reducción al Polo Magnético (CMRP) y nos asegura en teoría, que las anomalías magnéticas se ubicarán sobre las fuentes que las producen. La matriz de datos, así generada, es la base para la aplicación de otros filtros o algoritmos matemáticos.

En zonas volcánicas áridas una de las oportunidades que existen para localizar agua subterránea son los acuíferos confinados en fallas. Si lo que deseamos conocer son zonas de fractura y/o fallas y/o contactos en las unidades geológicas, un filtro que nos orienta bastante es el Henderson y Zietz (1949) conocido como Derivadas Verticales de 1^{er} ó 2^{do} grado, ya que nos van a indicar las zonas de altos gradientes las cuales normalmente están asociadas a las estructuras geológicas anteriormente mencionadas. Otros de los filtros aplicados a la información aeromagnética es el de Henderson (1970) que nos permite cambiar el plano de observación, al elevarnos, las altas frecuencias tienden a atenuarse y a resaltar las bajas frecuencias, que están asociadas con la estructura geológica del subsuelo. A este filtro se le conoce como Continuación Ascendente del

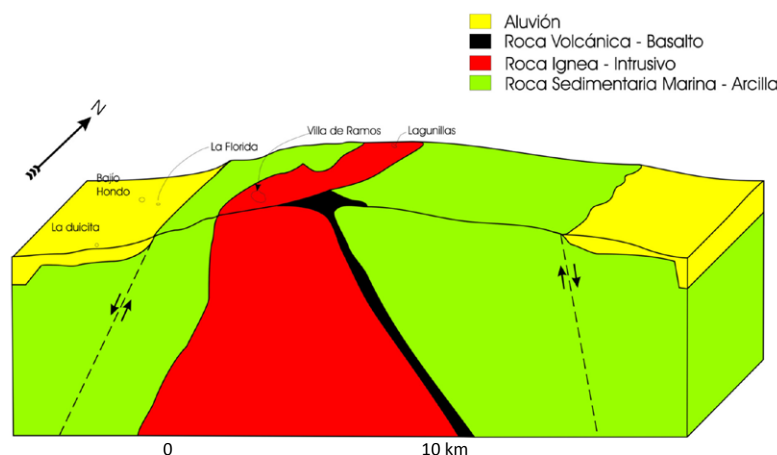


Figura 4. Bloque diagramático idealizado de la geología de la zona de La Dulcita-Villa de Ramos, San Luis Potosí, México.

Campo Magnético.

Con el análisis de las configuraciones magnéticas de cada uno de estos filtros se está en condiciones de interpretar la ubicación de zonas de permeabilidad superficial y a profundidad (Henkel y Guzmán, 1977; López-Loera y Urrutia-Fucugauchi, 1996).

El siguiente paso en la metodología, después de analizada la información aeromagnética, es realizar un levantamiento de magnetometría terrestre en las zonas que hayan presentado alguna posibilidad de estar asociadas con fracturamiento y/o fallamiento y/o contactos geológicos (Babu *et al.*, 1991; López-Loera *et al.*, 2010). A esta etapa se le denomina Verificación de Anomalías.

La dirección de los perfiles magnéticos terrestres deberá ser en lo posible perpendicular a la estructura que se infiera. El procesamiento y análisis de la información terrestre es similar a la realizada a la información aeromagnética, se obtiene un CMR a partir del CMT, posteriormente se genera un CMRP y a este campo se les aplican los filtros de derivadas y continuaciones ascendentes.

El análisis de la información magnética es hasta cierto punto sencilla. Este método se fundamenta en que toda la Tierra se comporta como un gran imán que estuviera en el centro de esta (McElhinny, 1973; Tarling, 1983), y para una zona en específico, se considera que la fuerza del Campo Magnético (**H**) es la misma y que el valor de la intensidad magnética va a estar en función de la susceptibilidad magnética de las rocas (*k*; Ecuación 2), la cual se define como la capacidad de estas para adquirir magnetización, tal que:

$$\mathbf{I} = k \mathbf{H} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Esta magnetización **I** constituye la magnetización inducida. Adicionalmente, se tienen los efectos de la magnetización remanente. En rocas volcánicas e intrusivas, esta magnetización puede ser de mayor intensidad que los efectos inducidos (Urrutia, 1977; Tarling, 1983). Si consideramos que una roca volcánica contiene ferromagnesianos y está sin fracturamientos, nos generará una respuesta magnética caracterizada por tener una anomalía representada por un alto y un bajo magnético. Es decir, la respuesta magnética, tiene un lado positivo y uno negativo. Si hacemos el símil que la roca es un imán, y la fracturáramos en dos partes, nos generarían dos anomalías, que tendrán dos altos y dos bajos en una secuencia, alto-bajo-alto-bajo magnéticos y así sucesivamente. Si tenemos una zona ligeramente fracturada y/o afallada, nos dará una respuesta magnética con altos y bajos secuenciados, con frecuencias medias, pero si tenemos una zona con fracturamiento y/o fallamiento alto, nos dará una respuesta magnética caracterizada por altas frecuencias y por una serie de altos y bajos secuenciados (López-Loera *et al.*, 2010). Estas zonas las interpretamos como áreas en donde dos de tres de las propiedades que identifican a los acuíferos están presentes, ya que tienen porosidad y permeabilidad.

Una vez identificadas las zonas con permeabilidad secundaria en las rocas volcánicas, el siguiente paso en

la metodología es probar que las zonas estén asociadas a humedad, lo cual se logra con la aplicación de los métodos eléctricos, en nuestro caso empleamos corriente continua.

Los métodos eléctricos de corriente continua tienen como base la ley de Ohm (Orellana, 1972; Ecuación 3) la cual establece que la resistencia es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica:

$$R = V / I \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde R (Ohm, Ω) es la resistencia eléctrica, V (Volts) el potencial e I (Amp) es la corriente eléctrica.

La relación anterior (Ecuación 3) es válida para cualquier circuito eléctrico, en estudios del subsuelo la relación cambia ya que la resistencia es función de la naturaleza y de la geometría del conductor (Ecuación 4), en nuestro caso la Tierra:

$$R = \rho L / S, \quad \rho = R S / L \quad (\text{Ecuación 4})$$

Ecuación en la que ρ representa la naturaleza del conductor y se denomina resistividad, L es la longitud en ml y S la sección del conductor en m². Si reemplazamos y despejamos tenemos que:

$$\rho = V S / I L \quad (\text{Ecuación 5})$$

En exploración geoelectrica la resistividad del subsuelo normalmente se mide con un arreglo electródico de cuatro electrodos siendo los electrodos AB los electrodos de emisión (corriente) y MN los electrodos de potencial, en este caso la resistividad (Ecuación 6) está dada por:

$$\rho_a = V / I * 2\pi K \quad (\text{Ecuación 6})$$

Siendo K el factor geométrico (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN) del arreglo electródico, el subíndice "a" en la resistividad, indica que el valor calculado es aparente.

La resistividad es una propiedad inversa de la conductividad eléctrica y en exploración sus unidades son el ohm por metro (Ω m).

En exploración geoelectrica se estudia la variación de la resistividad horizontalmente por medio de perfiles en los cuales se mueve el arreglo electródico todo en conjunto a las diferentes estaciones, siendo estas equiespaciadas, o bien, se puede estudiar la variación vertical de la resistividad por medio de sondeos eléctricos verticales (SEVs), en un punto determinado, para esto se van abriendo crecientemente los electrodos de corriente (AB) y los electrodos de medición o de potencial se abren sólo cuando los valores medidos son muy pequeños (dispositivo electródico Schlumberger), de tal manera que en los datos existen uno o dos puntos con diferente abertura MN para los mismos valores de AB, es decir, hay un traslape o "cluth" durante la medición del SEV (Keller y Frischknecht, 1966).

Una forma rápida de conocer el comportamiento eléctrico del subsuelo en una zona dada, es realizar perfiles de resistividad eléctrica a dos aberturas de electrodos, por ejemplo a 200 m y 400 m de abertura de los electrodos de corriente con el dispositivo electródico Schlumberger (AB/2 a 100 m y 200 m). De esta manera tenemos un conocimiento de la variación de la resistividad eléctrica en una dirección horizontal.

Si la resistividad a ambas separaciones de electrodos se comporta similar, implicará que toda la zona escaneada eléctricamente es la misma. Si la resistividad del perfil generado con abertura electródica mayor es superior que la generada a menor abertura, indicará que a profundidad la posibilidad de detectar humedad es nula. Por el contrario, si la resistividad es menor a mayor abertura electródica, tendremos que las posibilidades de detectar humedad son mayores. Si los perfiles de resistividad aparente muestran un comportamiento irregular, tendremos mayores posibilidades de detectar un contraste resistivo en donde la resistividad a mayor abertura cambie de más resistivo a menos resistivo, esto nos indicará, que la zona bajo estudio tiene un área en el subsuelo, en donde la corriente circula con mayor facilidad y será una zona en donde se deba estudiar la variación de la resistividad con la profundidad, lo cual se realiza con el sondeo eléctrico vertical (SEV; Jakubovskii y Liajov, 1980).

Los SEVs se deben interpretar cualitativa y cuantitativamente. En la primera de estas se debe definir la morfología de la curva SEV (Orellana y Mooney, 1966; Orellana, 1972), la cual para estar asociada con humedad, necesariamente debe tener una correlación con curvas tipo H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), la cual nos indica que existe un contraste de resistividad menor entre la capa central y las que lo encajonan. Las curvas SEVs también pueden ser KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$), QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) o alguna de las curvas que muestren una porción tipo H.

La interpretación cuantitativa se realiza mediante un software comercial que permite realizar una inversión de los datos de resistividad (Ghosh, 1971). Es conveniente realizar un SEV en pozos en donde su columna estratigráfica sea conocida, de tal manera que los SEVs se puedan calibrar.

Una vez efectuadas las etapas anteriores, las zonas que se escogen para realizar perforaciones deben tener una respuesta magnética que se correlacione con una zona fracturada (permeabilidad) y los métodos eléctricos (resistividad) con una zona que tenga una relación con una área húmeda, representada por un contraste resistivo que contenga un mínimo entre dos máximos de resistividad.

4. Resultados

El procedimiento descrito anteriormente se aplica a una zona ubicada en la Mesa Central de México, en específico a una población rural llamada La Dulcita, del municipio de Villa de Ramos, San Luis Potosí.

4.1. Magnetometría Aérea

El área bajo estudio fue volada por el Servicio Geológico Mexicano, utilizando un avión Islander BN2-A21, equipado con un magnetómetro Geometrics G-822, de bombeo óptico de vapor de cesio, con una sensibilidad de 0.25 nT, con un sistema de adquisición de datos Picodas P-101, cámara de video Automax, 35 mm. Se empleó un magnetómetro

Geometrics G-826 A, con una sensibilidad de 1 nT como estación base. También se utilizó un radar altímetro Sperry.

El rumbo de las líneas de vuelo fue N-S, con una distancia entre líneas de vuelo de 1000 m y a una altura sobre el nivel del terreno de 300 m, la navegación se controló con un sistema Ashtech GG24 GPS y a los datos se les sustrajo el campo de referencia IGRF 1990.

La intensidad del Campo Magnético Total en la porción central era de 44,858 nT, con una inclinación de 50° 43' y declinación de 8° 13' para 1995.

El análisis del comportamiento del Campo Magnético, se inició con la generación del mapa del CMR, (Figura 5), el cual como se mencionó en párrafos anteriores, se obtiene al sustraer al Campo Magnético Total el IGRF. Teniendo como base el CMR se calculó el CMRP, (Figura 6). En la porción W del CMRP se observa una franja (“trend”) de altos magnéticos (color rojo) que representan el límite W de una zona del graben que existe con una dirección general N-S y que se caracteriza en el mapa con anomalías asociadas a bajos magnéticos (color azul). Hacia la porción central se muestran dos “trends” de anomalías magnéticas con dirección NE-SW y NNW-SSE, que posiblemente estén asociados geológicamente con el intrusivo múltiple “El Socorro” (Labarthe y Aguillón, 1986). El área de La Dulcita se localiza en el primer escalón del graben y se observan lineamientos (Figura 7) con dirección N-S y E-W hacia su porción W, que pueden estar asociados geológicamente con zonas de fallas y/o fracturamiento y/o contactos. El área investigada en general muestra lineamientos aeromagnéticos preferenciales en una dirección N-S, existiendo también en dirección NE-SW, siendo escasos los que muestran dirección NW-SE.

El área de La Dulcita en el mapa de dominios aeromagnéticos (DAM), zonas que muestran susceptibilidades magnéticas similares (Figura 8), se ubican entre los límites de los DAM I, II y IX, lo cual nos permite interpretar posibilidades de la existencia de permeabilidad en las zonas de los contactos.

El área analizada en general muestra la existencia de hasta 10 DAMs, caracterizados cada uno por mostrar diferentes amplitudes y longitudes de onda. La zona en donde se extrae el agua para la población de La Dulcita, está correlacionada con el DAM II que se asocia a una zona de fosa tectónica, caracterizada por valores bajos de magnetismo. El graben está limitado por el DAM I al W y al E por los DAMs III y IV. En el DAM I se ubicó un pozo altamente productivo para la zona (16 lts/seg), se localiza a una distancia del orden de los 2.3 km en dirección SW de La Dulcita, fuera de los límites ejidales.

4.2. Magnetometría Terrestre

A partir de la interpretación de la información aeromagnética, se programaron cuatro secciones magnéticas terrestres con estaciones de lectura del Campo Magnético Total (CMT) cada 20 metros, utilizándose dos

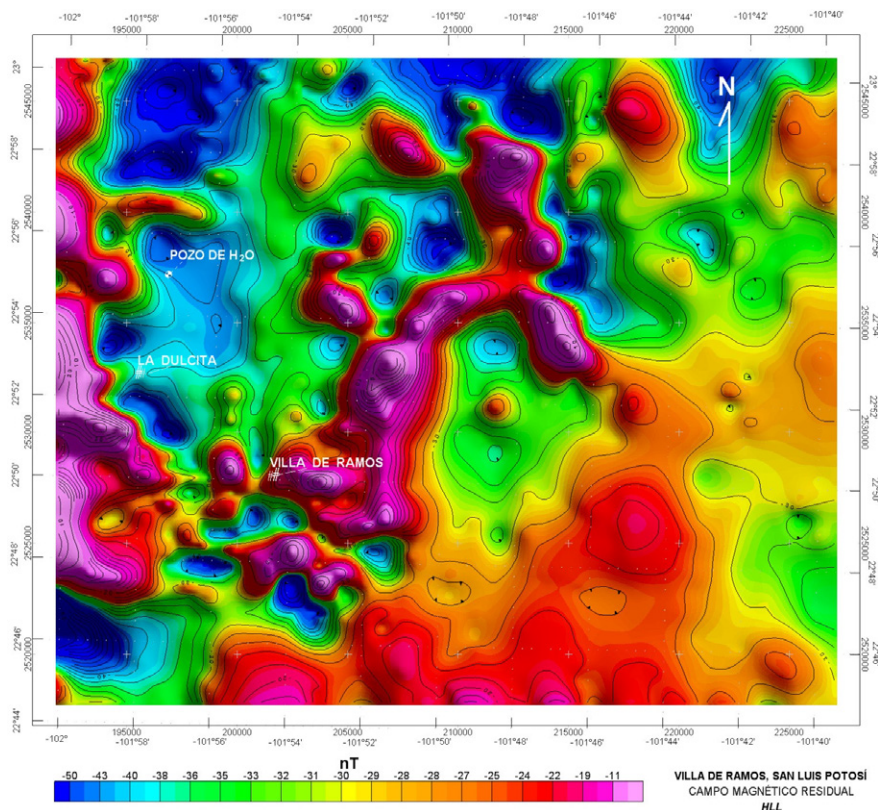


Figura 5. Mapa que muestra la configuración del campo magnético residual de la zona de La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México.

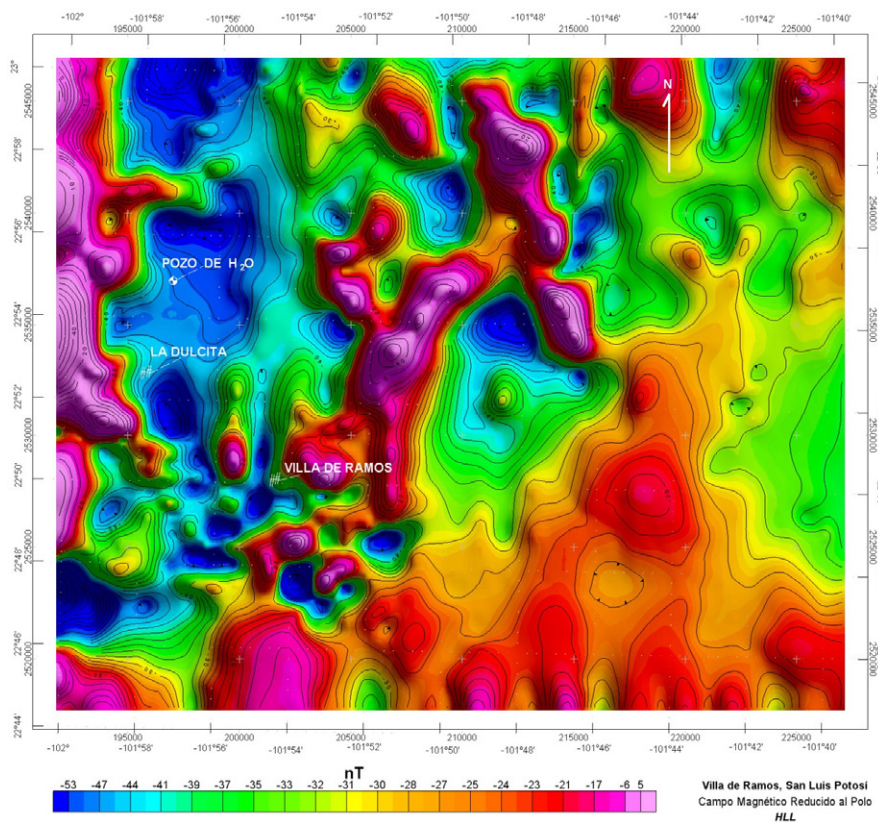


Figura 6. Mapa que muestra la configuración de isovalores del campo magnético reducido al polo de la zona de La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México.

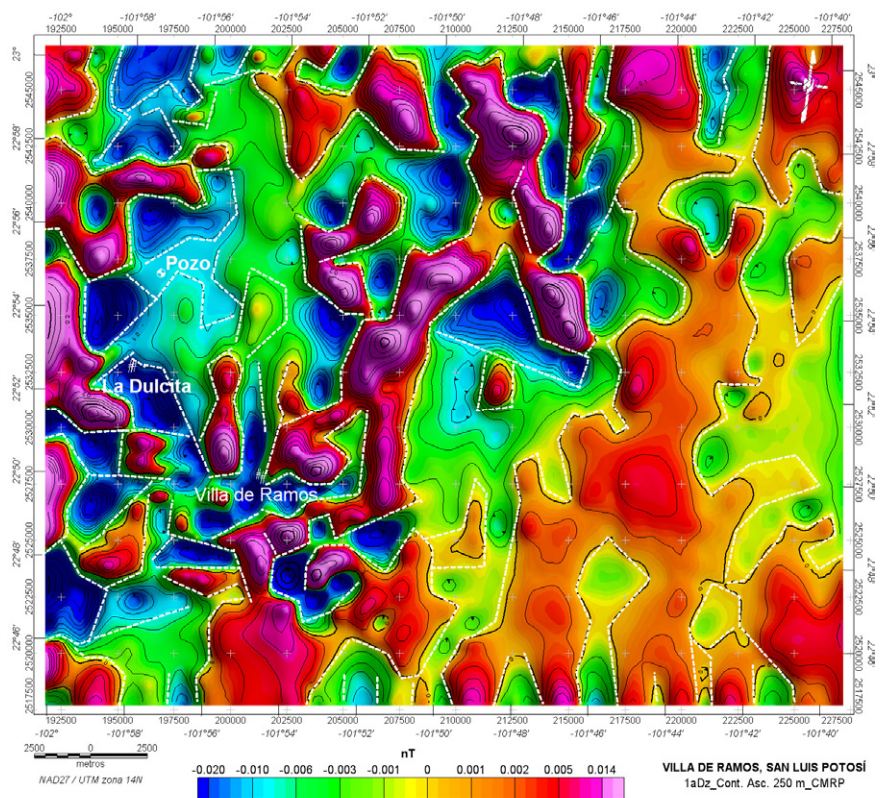


Figura 7. Mapa en donde se observan los lineamientos magnéticos teniendo como base la configuración de la primera derivada vertical continuada ascendientemente 250 m del campo magnético reducido al polo.

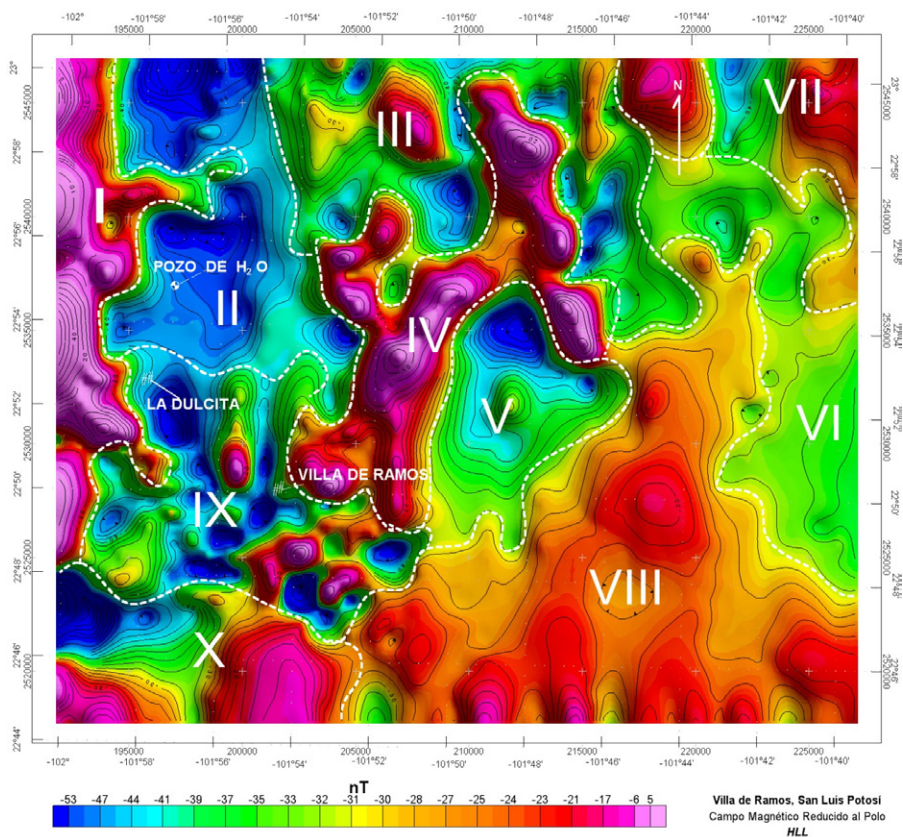


Figura 8. Mapa de los dominios aeromagnéticos (DAMs) interpretados en la configuración del campo magnético reducido al polo.

magnetómetros GEM-GSM-19 y Geometrics G-856 A para realizar las mediciones, a las cuales se les corrigió por deriva horaria y diaria y se obtuvo un residual por medio de sustraerle al CMT un polinomio de grado cero.

Dos de las secciones tuvieron direcciones NW-SE y dos NE-SW (Figura 9) quedando la población de La Dulcita en la parte central de dichos perfiles.

La sección magnética 1 (Figura 10), muestra cuatro

Dominios Magnéticos Terrestres (DMT), el primero de la estación 0 a la 54, caracterizado por una serie de anomalías magnéticas relacionadas con longitudes de onda corta (20 a 40 m), frecuencias altas y amplitudes del orden de los 160 nT, se correlacionó geológicamente con una zona altamente fracturada, ya que los gradientes horizontales dan valores de hasta 11 nT/m. El DMT 2, se localiza entre las estaciones 55 y 78, se define por presentar un campo magnético normal, en

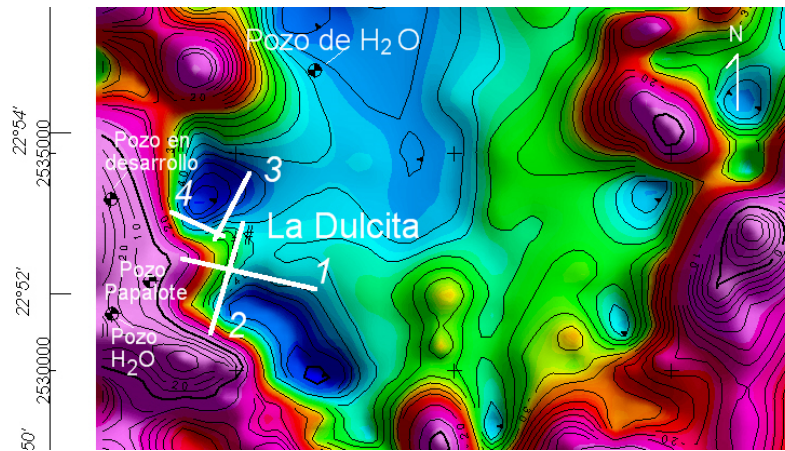


Figura 9. Mapa en donde se observa la localización de las secciones magnéticas terrestres. El pozo de agua que aparece al norte del mapa es donde la población de La Dulcita se abastece con un gasto menor a 1 lt / seg. El pozo de agua que aparece al SW es un pozo con un gasto de 25 lts / seg. El Pozo Papalote resultó estéril porque se quedaron cortos en la perforación.

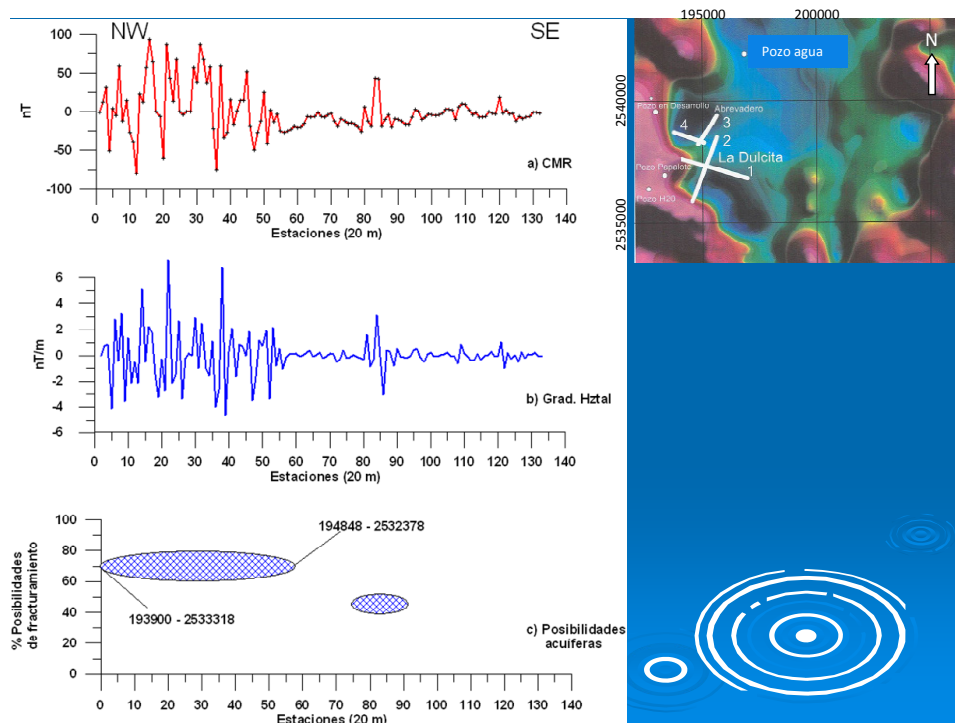


Figura 10. Sección magnética terrestre 1, con una dirección NW-SE, en donde se grafica en a) el campo magnético residual (CMR); en b) el gradiente horizontal del CMR y en c) se muestra una interpretación cualitativa del porcentaje de probabilidades de asociación con fracturamiento en el subsuelo. Los números que aparecen en los límites del elipsoide indican las coordenadas entre las que se ubica la zona. Obsérvese cómo es la respuesta magnética de un terreno fracturado en el subsuelo (estaciones 0-55).

donde no se observan zonas anómalas. El DMT 3 se ubica entre las estaciones 79 y 87 y muestra una zona anómala limitada por dos anomalías magnética que tienen amplitudes de 33 nT y 65 nT y gradientes horizontales de 2.6 nT/m y 6 nT/m respectivamente. Se correlaciona geológicamente con una zona de posibilidades de fracturamiento mediano. El DMT 4 está limitado entre las estaciones 88 y 135, en general muestra un campo magnético discretamente perturbado en donde no se considera con posibilidades de asociarse a profundidad con permeabilidad.

La sección magnética 2 se ubica hacia porción E de La Dulcita (Figura 9), presenta cinco DMTs (Figura 11), el primero limitado entre las estaciones 0 y 32, muestra un comportamiento normal del CMR, en donde se distinguen zonas magnéticamente anómalas. El DMT 2 se ubica entre las estaciones 33 y 45 y tampoco muestra zonas de altas frecuencias que se puedan correlacionar con efectos de fracturamiento a profundidad. El DMT 3 se localiza entre las estaciones 46 y 84, se identifica por presentar una respuesta magnética caracterizada por anomalías con longitudes de onda de corta (60 a 100 m), frecuencias altas y amplitudes del orden de los 28 nT a 41 nT y gradientes horizontales de 2.7 nT/m a 2.3 nT/m respectivamente. Se correlaciona con una zona con posibilidades medias de asociarse a la existencia de permeabilidad secundaria. El DMT 4 se identifica entre las estaciones 85 y 113 y presenta longitudes de onda corta (20 a 80 m) frecuencias altas y amplitudes de 18 nT a 29 nT y gradientes horizontales de 0.4 nT/m a 1.5 nT/m respectivamente. Se asocian geológicamente a

una zona con posibilidades medias de correlacionarse con permeabilidad en el subsuelo. El DMT 5 está delimitado entre las estaciones 114 a 133, se caracteriza por mostrar longitudes de onda corta (20 a 40 m), frecuencias altas y amplitudes de magnetización de 54 nT hasta 160 nT, con gradientes horizontales de 6.5 nT/m hasta 14.7 nT/m, se correlaciona geológicamente con una zona que presenta un fuerte fracturamiento y por lo tanto permeabilidad.

La sección magnética 3 se sitúa en las inmediaciones NW de La Dulcita (Figura 9), muestra dos DMT (Figura 12). El primer dominio se ubica entre las estaciones 1 y 16, se identifica por presentar una serie de anomalías magnéticas que se caracterizan por mostrar longitudes de onda corta (20 a 100 m), frecuencias altas y amplitudes de 32 nT a 107 nT y gradientes horizontales de 2.9 nT/m a 7.6 nT/m, que se correlaciona con posibilidades medias de estar asociado en el subsuelo con fracturamiento. El segundo DMT se localiza de la estación 17 a la 75, en general muestra un campo magnético normal en donde la posibilidad a correlacionarse con fracturamiento a profundidad es nulo.

La sección magnética 4 localizada en las afueras de La Dulcita, porción NW (Figura 9), muestra dos DMT (Figura 13), ninguno de los dos de interés para asociarse con zonas fracturadas en el subsuelo.

4.3. Métodos Eléctricos

Se realizaron dos secciones eléctricas de resistividad aparente, polarización inducida y potencial natural con

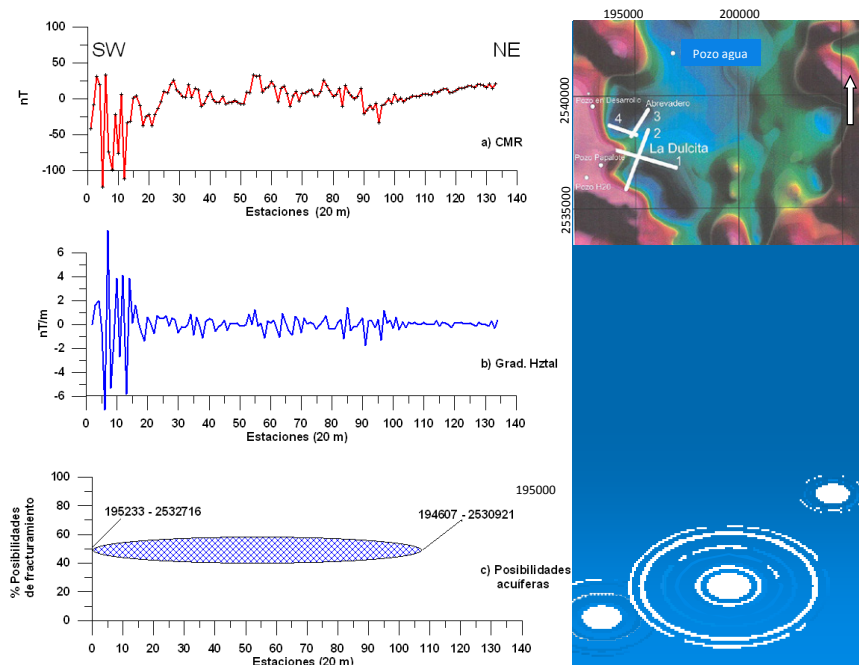


Figura 11. Sección magnética terrestre 2, con una dirección NE-SW, en donde se grafica en a) el campo magnético residual (CMR); en b) el gradiente horizontal del CMR y en c) se muestra una interpretación cualitativa del porcentaje de probabilidades de asociación con fracturamiento en el subsuelo. Los números que aparecen en los límites del elipsoide indican las coordenadas entre las que se ubica la zona. Obsérvese cómo se muestra una zona magnéticamente “sana”, sin fracturamiento en el subsuelo (estaciones 0 a 35).

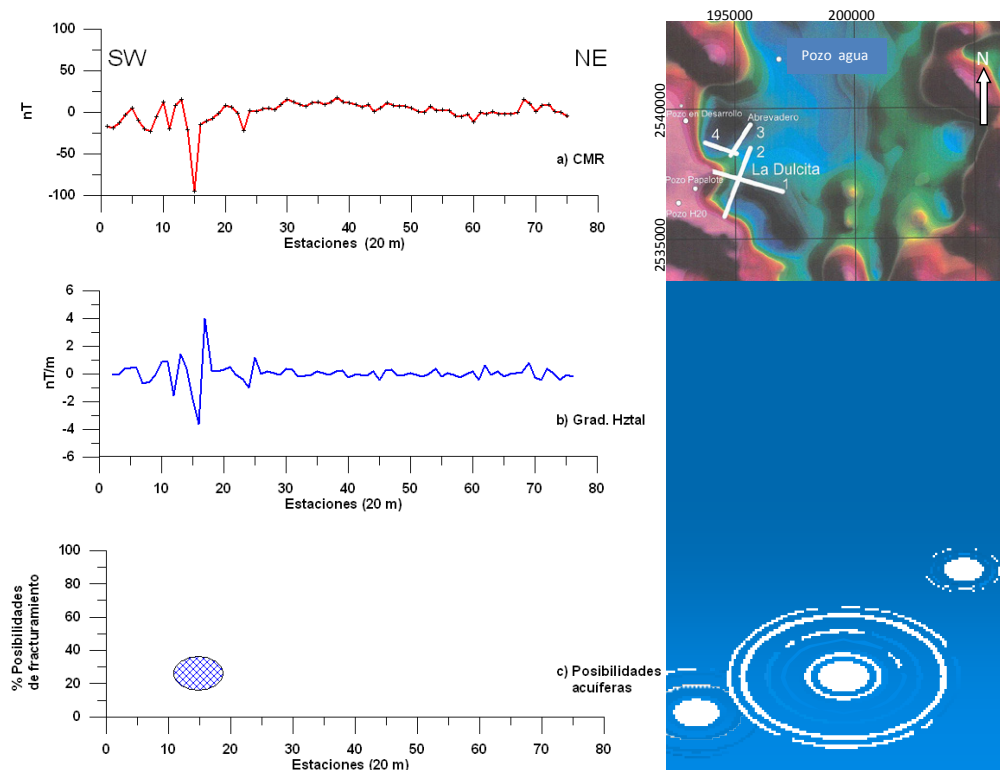


Figura 12. Sección magnética terrestre 3, con una dirección NE-SW, en donde se grafica en a) el campo magnético residual (CMR); en b) el gradiente horizontal del CMR y en c) se muestra una interpretación cualitativa del por ciento de probabilidades de asociación con fracturamiento en el subsuelo. Los números que aparecen en los límites del elipsoide indican las coordenadas entre las que se ubica la zona. Obsérvese la respuesta magnética asociada a una zona de falla entre las estaciones 14 y 16.

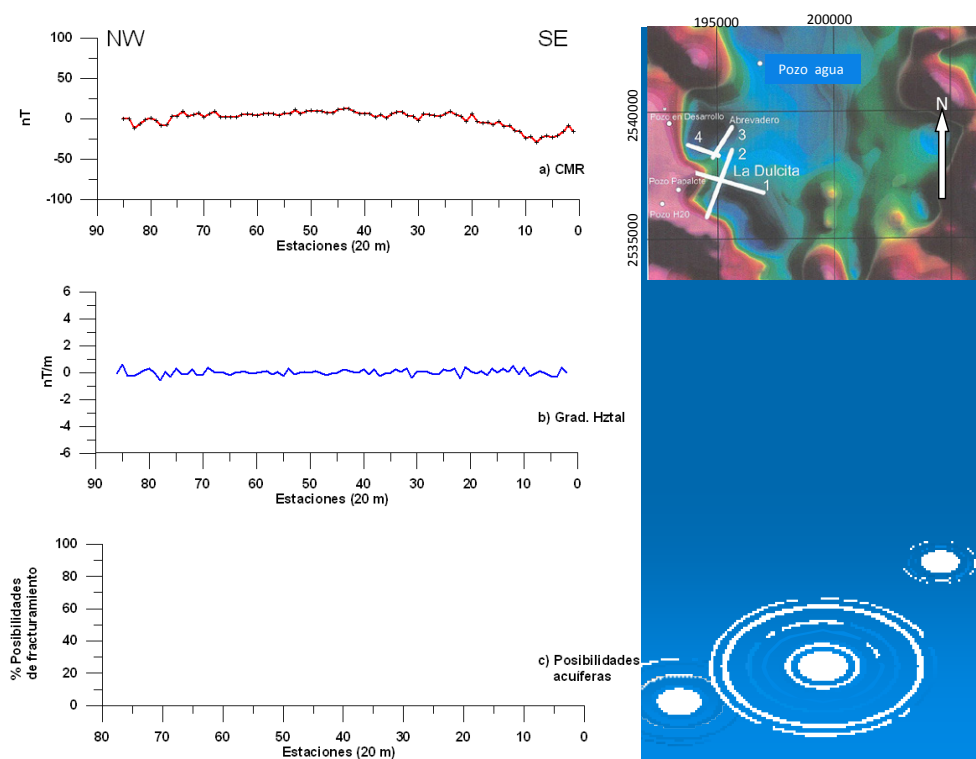


Figura 13. Sección magnética terrestre 4, con una dirección NW-SE, en donde se grafica en a) el campo magnético residual (CMR); en b) el gradiente horizontal del CMR y en c) se muestra una interpretación cualitativa del por ciento de probabilidades de asociación con fracturamiento en el subsuelo.

el dispositivo electródico tipo Schlumberger (Figura 14), utilizando dos separaciones de electrodos $AB/2 = 100$ y 200 m y un equipo de resistividad Syscal R-2 (Figura 15). Las secciones se hicieron en las mismas direcciones que los perfiles magnéticos 1 y 2, que eran los que mostraban más posibilidades de asociarse con fracturamiento en el subsuelo.

La sección eléctrica W-E, muestra en lo general un incremento de la resistividad con la profundidad exceptuando dos áreas, de la estación 400 a la 500 y en la 750 en donde la conductividad es mayor. La polarización inducida en estos perfiles muestra en lo general una disminución de la cargabilidad, exceptuando dos áreas de la estación 450 a la 500 y en la 750 en donde la cargabilidad tiende a incrementarse. El potencial espontáneo se observa que disminuye en general con separaciones mayores de $AB/2$ (Figura 16).

La sección eléctrica S-N, presenta valores de resistividad aparente menores a profundidad en su mayor parte, exceptuando de la estación 450 a la 550 en donde existe un pequeño incremento de la resistividad a separaciones mayores de $AB/2$. Los valores de cargabilidad en la polarización inducida se observan contrastantes a lo largo de la sección, se incrementan a separaciones mayores de $AB/2$ en las áreas de la estación 0 a la 150, 350, de la 550 a la 900 y en la estación 1100. El potencial espontáneo (PE) en esta sección tiene un comportamiento similar a ambas separaciones de electrodos entre las estaciones 0 y 550, en donde a mayores separaciones de $AB/2$ los valores (mV) se incrementan ligeramente, de la estación 600 a la 900, los valores disminuyen para $AB/2 = 200$ m y de la estación 950 a la 1300 el PE es cambiante (Figura 17).

4.3.1. Sondeos Eléctricos Verticales

Se realizaron cinco sondeos eléctricos verticales (SEVs), con aberturas máximas de los electrodos de corriente ($AB/2$) de 1500 y 2000 m, ubicándose cuatro de ellos en zonas identificadas (magnetometría) con posibilidades de asociarse con permeabilidad a profundidad. Uno de los SEV se realizó sobre un pozo productor que se localizaba a 2.3 km al SW de La Dulcita y que geológicamente se ubicaba en la zona del bloque hundido y aeromagnéticamente se asocia al DAM I y que sirvió como calibrador para las interpretaciones.

La interpretación cualitativa de la morfología de los SEVs dio por resultado que el pozo productor estaba asociado a una curva tipo KQH (SEV 4), de los cuatro SEVs restantes dos eran de la familia QQH (SEV 2 y 5), uno era HKQH (SEV 1) y el otro HKH (SEV3).

Los SEVs se procesaron e interpretaron con el programa comercial Resix Plus que resuelve el problema inverso basado en el método de Ghosh del filtro inverso (Ghosh, 1971). Cada uno de los SEVs se comparó con el SEV (4) del pozo productor (Figuras 18 y 19).

En la Figura 18 se puede observar que los datos interpretados en el SEV 4 (KQH), pozo productor y calibrador, nos indica claramente que en la base del

acuífero se tiene una unidad arcillosa ($2 \Omega m$) y que este se correlaciona con la resistividad de $28.69 \Omega m$ y con un espesor de 170.4 metros, de ahí que el pozo de un gasto de 16 lts/seg. En esta comparación, el SEV 1 (HKQH), muestra un horizonte ($23.23 \Omega m$) con un espesor de 33.5 m, con posibilidades de asociarse con una unidad arenosa con contenido de humedad y a una profundidad del orden de los 24 m. El SEV 2 (QQH) muestra una unidad con una resistividad de $18.65 \Omega m$ a una profundidad menor a 3 m y con un espesor del orden de los 30 m.

En la Figura 19 se presentan los resultados de interpretar los SEVs 3 y 5, también se comparan con el SEV 4 (pozo). El SEV 3 (HKH) muestra la existencia de una unidad geológica ($53.20 \Omega m$) confinada por dos horizontes arcillosos (4 y $3 \Omega m$) a una profundidad del orden de los 61 m y con un espesor de 34 m que es de interés ya que presenta muy buen contraste resistivo y la unidad puede ser un horizonte de basalto fracturado. El SEV 5 (QQH) muestra un horizonte posiblemente asociado con una unidad arcillo-arenoso ($14.8 \Omega m$) a una profundidad de los 15 m y con un espesor de 29 m. Se interpreta una gran capa (> 700 m) de arcilla ($9.2 \Omega m$) que inicia a una profundidad del orden de los 45 m.

5. Resultados y Conclusiones

Una vez analizada e interpretada la información, se localizó en las cercanías al área de La Dulcita y dentro del ejido, una zona que cumple con los parámetros asociados a un acuífero. Aeromagnéticamente muestra la existencia de lineamientos en direcciones N-S y E-W y se interpreta que se ubica en el primer escalón de una estructura de graben, representado en mapa aeromagnético por los bajos magnéticos (color azul) la zona de la fosa y por altos magnéticos (color rojo) los hombros del graben. El área de La Dulcita se sitúa en los límites de tres dominios aeromagnéticos, lo cual ya nos indica de que en las mediciones magnéticas terrestres necesariamente deberíamos de tener un contraste de susceptibilidad magnética, la cual se verá reflejada con diferencias notables en la amplitud del Campo Magnético.

Las secciones magnéticas terrestres, nos marcan las zonas que se pueden asociar con permeabilidad y las zonas que no tienen asociación con esta propiedad física. El simil de imán es la base para la interpretación del fracturamiento en el subsuelo, si no está fracturado nos generará una anomalía simple, si está fracturado nos dará una serie de anomalías caracterizadas por las altas frecuencias. El cálculo del gradiente horizontal del Campo Magnético es completamente resolutivo para poder observar zonas fracturadas (permeables) de zonas relativamente sanas. En la sección magnética 1, se muestran claramente los diferentes comportamientos físicos que existen en el subsuelo, en la primera porción una zona altamente fracturada y contrastada con el resto de la sección, lo cual nos indica que las susceptibilidades magnéticas de cada uno de los dominios

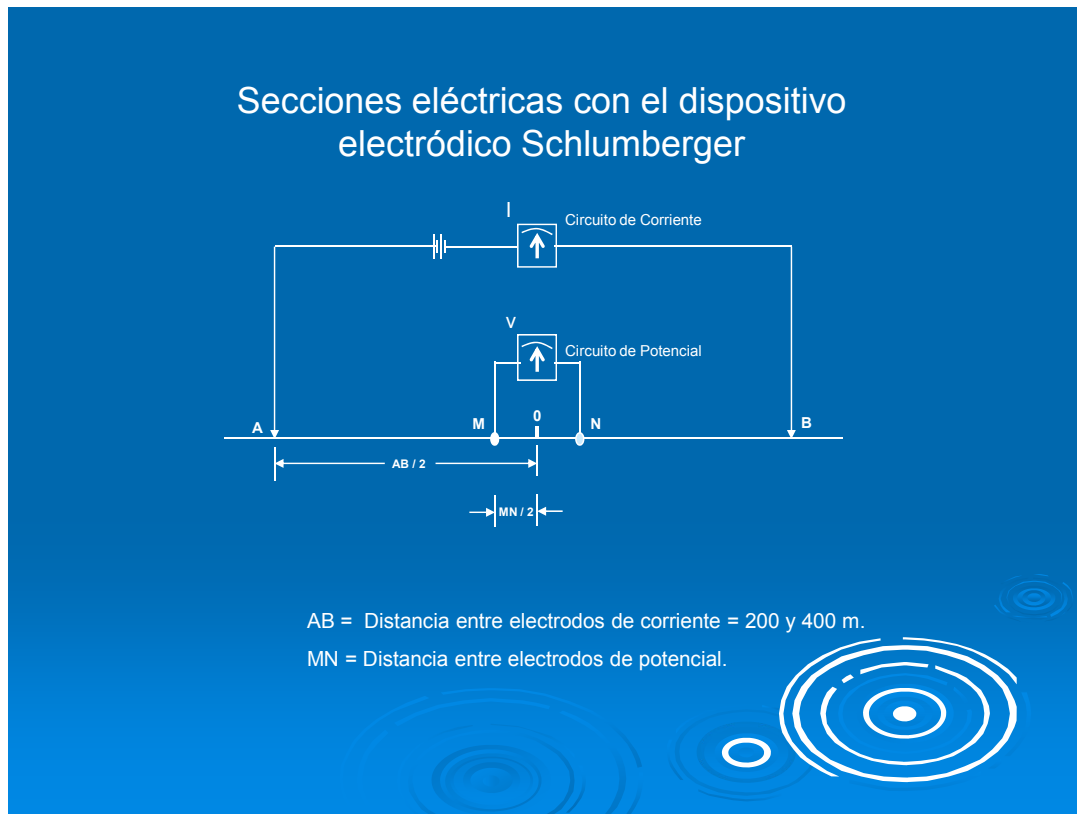


Figura 14. Diagrama de la configuración electródica Schlumberger, utilizada para la realización de las secciones y sondeos eléctricos verticales (SEVs). Las aberturas máximas de los SEV's fueron de $AB/2$ de 1500 y 2000 m.

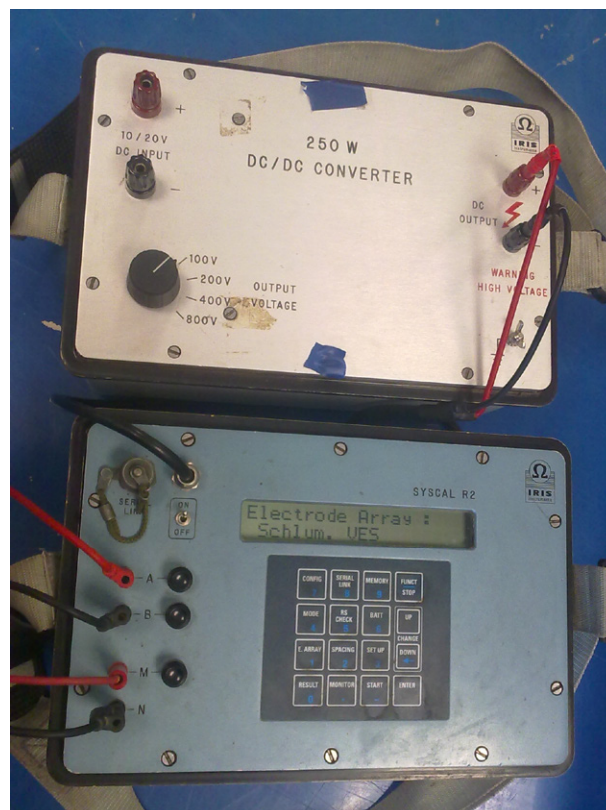


Figura 15. Instrumental eléctrico utilizado para las secciones y sondeos eléctricos verticales.

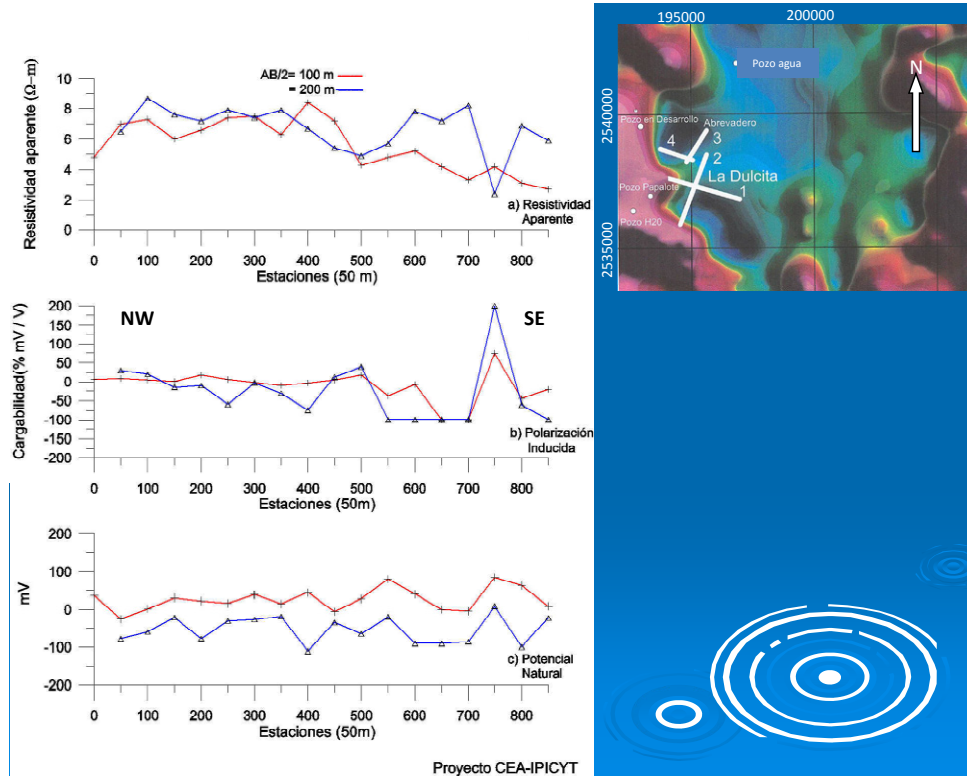


Figura 16. Sección eléctrica 1, con una dirección NW-SE, en donde se grafica en a) la resistividad aparente; en b) la polarización inducida y en c) el potencial natural. Estos perfiles eléctricos se ubicaron sobre las zonas que mostraban altas frecuencias (fracturamiento, permeabilidad) en el perfil 1 (Figura 10) de magnetometría.

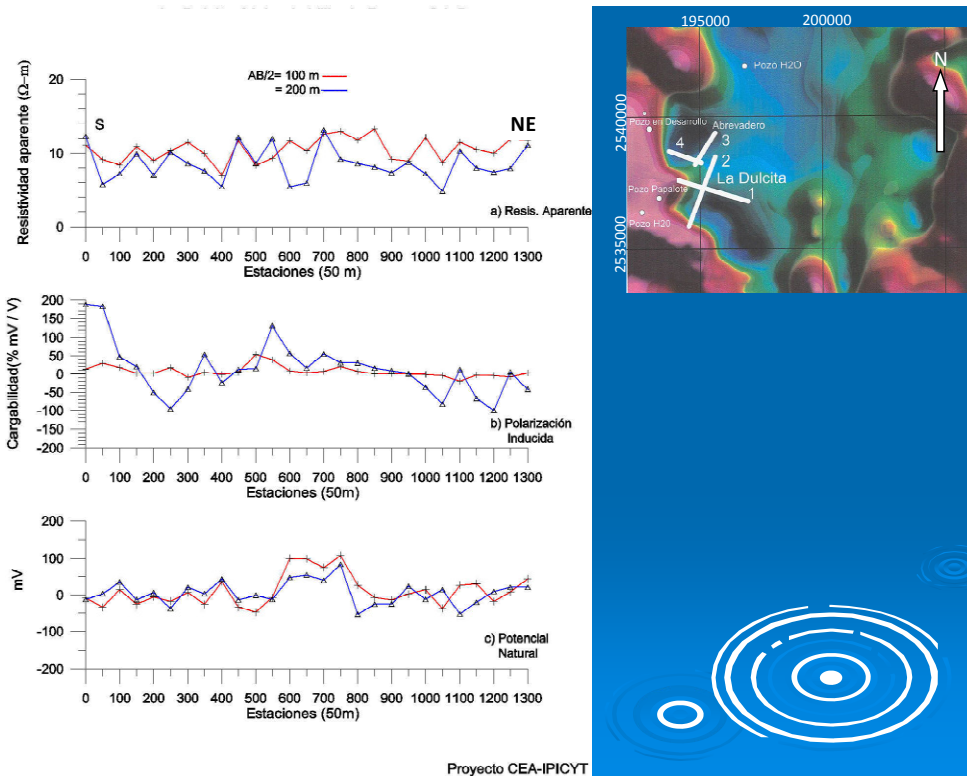


Figura 17. Sección eléctrica 2, con una dirección NE-SW, en donde se grafica en a) la resistividad aparente; en b) la polarización inducida y en c) el potencial natural. Se ubica sobre la sección magnética 2.

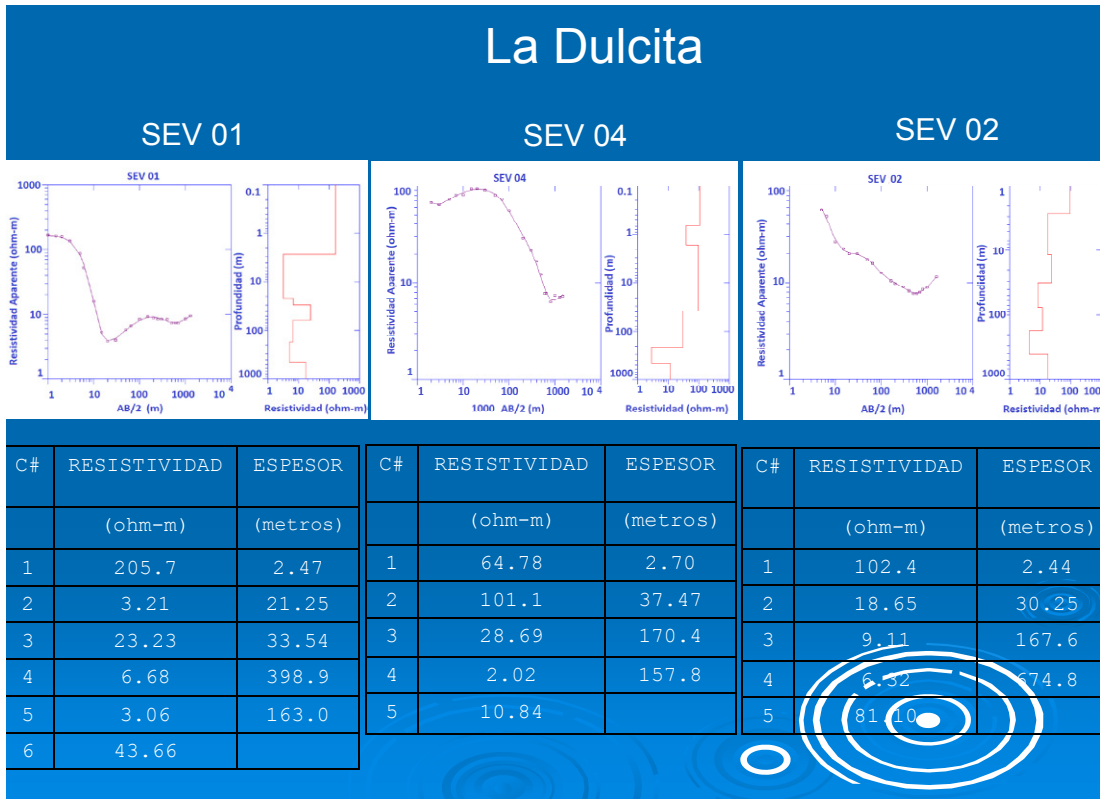


Figura 18. Gráficas de los sondeos eléctricos verticales (SEVs) 1 y 2 y su comparación con el SEV 4, relacionado con un pozo con un gasto del orden de los 25 lts / seg. Nótese el espesor (170.4 m) correlacionado con el horizonte acuífero (28.7 Ωm) posiblemente debido a una unidad arenosa, suprayaciendo a un horizonte arcilloso (2 Ωm).

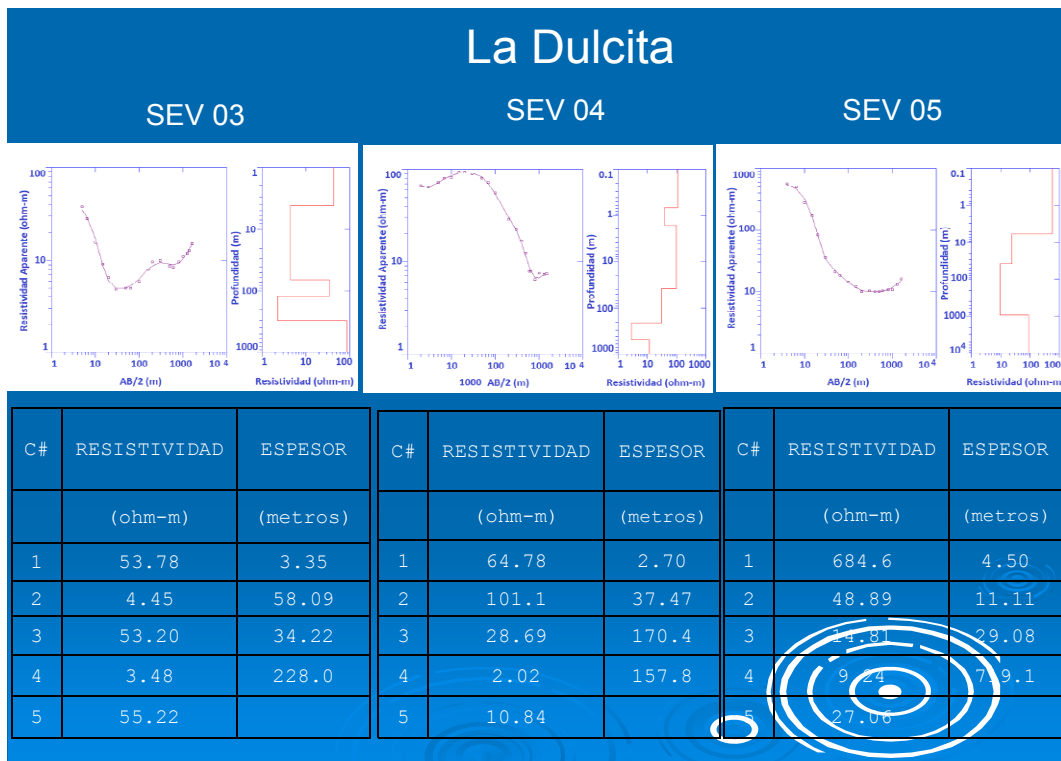


Figura 19. Gráficas de los sondeos eléctricos verticales (SEVs) 3 y 5 y su comparación con el SEV 4, relacionado con un pozo, con un gasto del orden de los 25 lts / seg. Obsérvese que el SEV 3, muestra una secuencia de unidades geológicas (~ 53 Ωm) confinadas por horizontes arcillosos (3 - 4 Ωm), mientras que el SEV 5 muestra una disminución de la resistividad hasta profundidades del orden de los 700 m.

magnéticos terrestres están asociados a unidades diferentes.

Con el magnetismo aéreo y terrestre se pudo encontrar zonas con altas posibilidades de estar asociado a fracturamiento (permeabilidad).

Con las secciones eléctricas se pudo escanear rápidamente las zonas con posibilidades de estar asociadas con permeabilidad y verificar si podían estar asociadas también con humedad. El tener un pozo productor, es clave para facilitar la interpretación de los sondeos eléctricos verticales, los cuales necesariamente para estar asociados con humedad deberán tener como parte de su morfología una porción tipo H.

En la zona que se interpretó con mayores posibilidades de asociarse a una permeabilidad y humedad en el subsuelo (Figura 20), se realizó una perforación por parte de la Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí, encontrándose un gasto de 4 lt/seg, si se considera que anteriormente habían perforado tres pozos secos se puede decir que la metodología empleada cumplió con el objetivo.

El ojo entrenado del geólogo de campo, se ve reforzado con esta metodología que utiliza instrumentos científicos, cuya función es detectar contrastes en las propiedades físicas (susceptibilidad magnética y resistividad) de las rocas que se encuentran ocultas bajo la superficie y sin lugar a dudas,

su empleo incrementará el porciento de pozos perforados exitosos.

Agradecimientos

Este proyecto se realizó con el apoyo de la Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí y del COPOCYT-SLP. Se agradece la participación del Ing. Víctor J. Martínez Ruíz en la realización del bloque geológico diagramático y en la ejecución en el campo de algunos de los sondeos eléctricos verticales. También se agradece al Ing. David E. Torres Gaytán su contribución en la preparación del presente trabajo. Agradezco profundamente los comentarios y sugerencias en las versiones primarias del artículo realizadas por los revisores de la revista por el Dr. Jaime Urrutia-Fucugauchi y de otro revisor anónimo.

Referencias

Babu, H.V.R., Rao, N.K., Kumar, V.V., 1991, Bedrock topography from magnetic anomalies - An aid for groundwater exploration in hard-rocks terrains: Geophysics, 56, 07, 1051-1054.

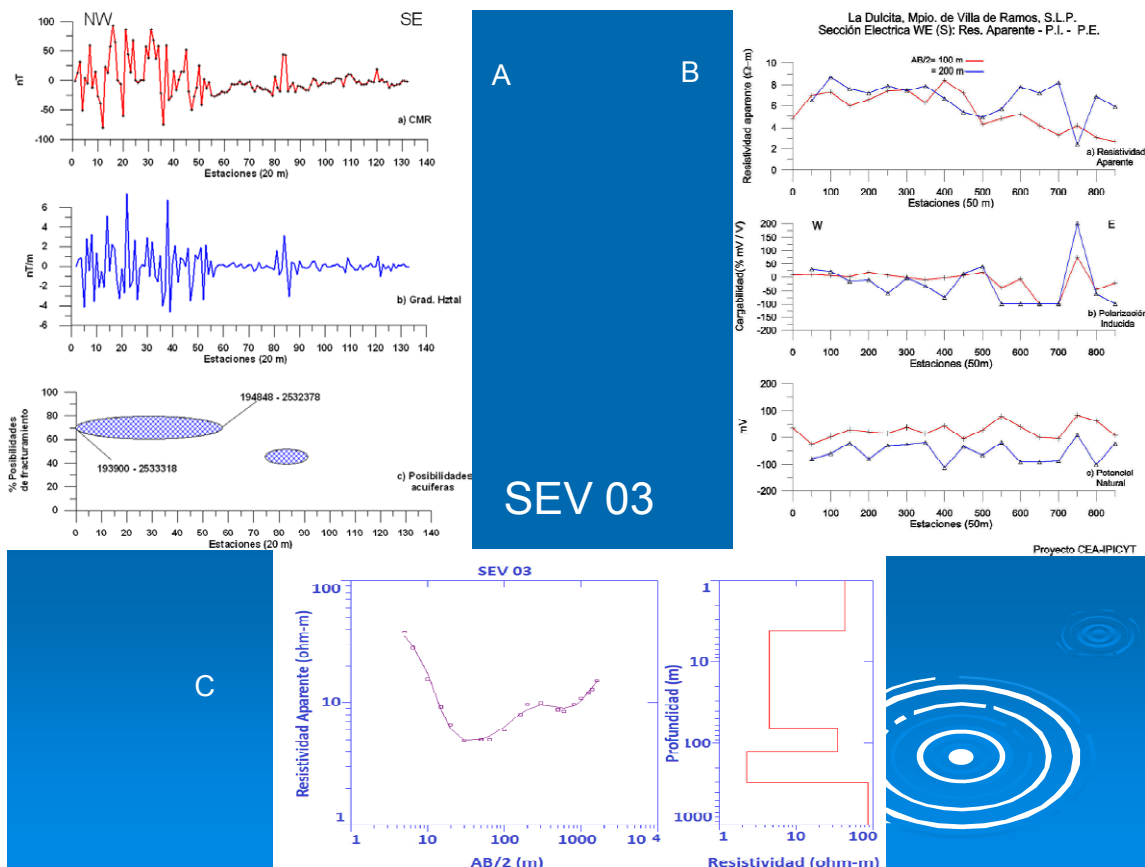


Figura 20. Se muestran las gráficas que apoyan la existencia de una zona fracturada y con humedad en el subsuelo. La gráfica de intensidad de magnetismo (A), muestra una zona claramente fracturada hacia la porción NW de la sección. En la sección geoelectrica (B), se observa hacia la estación 400 un contraste en la resistividad, disminuye a aberturas de $AB/2 = 200m$ respecto a $AB/2 = 100m$. El SEV 3 (C), muestra asociación con curvas tipo H.

- Baranov, V., Naudy, H., 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole: *Geophysics*, 29, 67-79.
- Freeze, R.A., Witherspoon, P.A., 1967, Theoretical analysis of regional groundwater flow, Part 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variations: *Water Resour Research*, 3, 623-634.
- Ghosh, D.P., 1971, Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontal stratified Earth: *Geophysical Prospecting*, 19, 4, 769-775.
- Henderson, R.G., 1970, On the validity of the use of upward continuation integral for total magnetic intensity data: *Geophysics*, 35, 916-919.
- Henderson, R.G., Zietz, I., 1949, The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields: *Geophysics*, 14, 508-516.
- Henkel, H., Guzmán, M., 1977, Magnetic features of fractures zones: *Geoexploration*, 5, 173-181.
- Iakubovskii, I.U.V., Liajov, L.L., 1980, *Exploración Eléctrica*: Editorial Reverté, S.A., 421 p.
- INEGI, 2010. <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/bise/mexicocifras/default.aspx?ent=24>, consultado julio de 2010.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*, Pergamos Press, 317 p.
- Kirch, R., 2009, *Groundwater Geophysics: A tool for Hydrogeology*, Springer, Second Edition, 548 p.
- Labarthe, H.G., Aguillón, R.A., 1986, *Cartografía Geológica 1:50,000, Hojas: Salinas y Villa de Ramos, Estados. De San Luis Potosí y Zacatecas. Folleto Técnico 106*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, 52 p.
- López-Loer, Urrutia-Fucugauchi, J., 1996, Geophysical study of faulting associated with the Colima Volcanic Complex: *Volcan de Colima, Fifth International Meeting: Colima, Mexico, January 22-26, 1966, Abstract Volume: Colima, University of Colima*.
- López-Loera, H., Urrutia-Fucugauchi, J., Alva Valdivia, L.M., 2010, Magnetic characteristic of fracture zones and constraints on the subsurface structure of the Colima Volcanic Complex, western México: *Geosphere*, 6, 1, 35-46.
- McElhinny, M.W., 1973, *Paleomagnetism and plate tectonics*: Cambridge Earth Science Series, 358 p.
- NOAA, 2010, <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, consultado agosto 2010.
- Orellana, E., 1972, *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continúa*, Biblioteca Técnica Philips, Paraninfo, 523 p.
- Orellana, E., Mooney, H.M., 1966, Master tables and curves for Vertical Electrical Soundings: *Interciencia*, 125 p.
- Tarling, D.H., 1983, *Paleomagnetism. Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology*: Chapman and Hall Ltd, 379 p.
- Tindall, J.A., Kunkel, J.R., 1999, *Unsaturated Zone Hydrology for Environmental Scientists and Engineers*, Prentice Hall, 625 p.
- Urrutia-Fucugauchi, J., 1977, Importancia del magnetismo remanente natural en la interpretación de las anomalías magnéticas: *Boletín Asociación Mexicana de Geofísicos De Exploración*, 18(4), 83-116.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Campos-Enríquez, J.O., 1993, Geomagnetic secular variation in central Mexico since 1923 AD and comparison with 1943-1990 IGRF models: *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 243-249.

Manuscrito recibido: Octubre 25, 2010.

Manuscrito corregido recibido: Agosto 10, 2011.

Manuscrito aceptado: Octubre 1, 2012.