



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD HIDROGEOLÓGICA EN  
LA PORCIÓN SUR ORIENTE DE LA CIUDAD DE SAN  
JUAN DEL RIO. QRO, CON LA APLICACIÓN DE  
MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS**

**T E S I S**

**PARA PRESENTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEOFÍSICO**

**PRESENTA:  
LUIS ALBERTO CASTILLO GONZÁLEZ**



**DIRECTOR DE TESIS: ING. F. ALEJANDRO ARROYO CARRASCO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIAS

*A mi madre María Luisa.*

*Por estar siempre en los buenos y malos momentos de mi vida. Gracias por esos consejos y valores que ayudaron a cultivar esos preciados dones de humildad, esperanza y fe, pero sobre todo por el inmenso amor que le dio un significado especial a mi vida.*

*¡Gracias por darme la vida!*

*¡Te amo mamá!*

*A mi padre Ignacio.*

*Por haber soportado mis errores y sonreído con mis triunfos, gracias por el cariño, la comprensión, la paciencia y el apoyo económico que me brindaste para culminar mi carrera profesional.*

*¡Gracias por estar siempre a mi lado papá!*

*¡Te amo papá!*

*A mis hermanos.*

*Ignacio, Sarahí y Daniela, por compartir conmigo los momentos buenos y malos que existen en la vida y de crecer juntos como una verdadera familia.*

*¡Gracias por ser mis hermanos!*

*A mis tíos Luis y Concepción.*

*A los que considero como mis padres, por la educación y la motivación que siempre me brindaron para emprender una carrera profesional.*

*¡Gracias por su apoyo, los amo!*

*A mi abuelo Lorenzo*

*A quien dios tiene a su lado, por esos momentos cuando estaba triste, por los fracasos de la vida de los cuales siempre, me enseñaste a levantarme y mirar hacia adelante llenándome de fe para conseguir mis metas.*

*A mis abuelas.*

*Herminia y Leonarda quienes siempre me han brindado cariño y apoyo, gracias por su amor incondicional.*

*A mis familiares.*

*Quienes siempre me impulsaron y fueron el motor para que concluyera una carrera profesional, en especial a mis tíos Pablo y Lourdes quienes siempre me motivaron a seguir estudiando, así como sus hijos Saúl, Diana y Jacqueline con quienes compartí mi infancia y adolescencia.*

*A mi amigo Andrés Limones.*

*Por ayudarme a encontrar la dirección de mi vida y por compartir sus conocimientos y experiencias de la vida, ¡Gracias amigo!*

*Ingeniero José Antonio Gutiérrez Zenteno.*

*Por el apoyo recibido para la elaboración de este trabajo de tesis y por haberme brindado la oportunidad de laborar en su compañía enseñándome la responsabilidad que conlleva el trabajo profesional.*

*Ingeniero Alejandro Arroyo.*

*A quien considero un excelente profesor y amigo, pero sobretodo una excelente persona gracias ingeniero por la paciencia, motivación, enseñanza durante el trabajo escolar y el trabajo de tesis.*

*A mis sinodales.*

*Al doctor Andrés Tejero, a los Ingenieros Javier Urbietta, Alberto Arias, Héctor Luis Macías, por sus valiosos comentarios y correcciones de este trabajo.*

*A mis amigos de la facultad.*

*A David con quien compartí el inicio de la carrera, y fue de gran ayuda para la conclusión de esta con sus consejos y enseñanzas.*

*A Yoel por su valiosa participación durante el desarrollo de este trabajo y por compartir el tiempo durante la carrera. Y por lo amigos que no nombre pero que fueron parte importante durante mi estadía en la facultad muchas ¡gracias!*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, y en especial a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad de pertenecer a una generación de triunfadores y gente productiva para el país. ¡Gracias!*

*A Dios.*

*Por concederme la dicha de alcanzar mis metas, por darme unos padres maravilloso y una familia agradable, por los momentos buenos y malos de la vida, por poner a gente adecuada en mí camino, pero sobre todo por conocer esas luz que lleno mi ser de dicha y felicidad. ¡Gracias señor por mirarme con buenos ojos!*

*En el camino de la vida siempre se consideran ambiciones de tipo material y de índole profesional, sin embargo la ambición verdadera es el deseo intenso de vivir útilmente y de caminar con humildad al amparo de la gracia de Dios.*

*Luis Alberto Castillo González.*



# Índice

## Resumen

### Capítulo I            **Introducción**

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Objetivos

### Capítulo II            **Marco geográfico de referencia**

- 2.1. Localización
- 2.2. Vías de Comunicación
- 2.3. Servicios
- 2.4. Hidrografía
- 2.5. Clima
- 2.6. Precipitación
- 2.7. Temperatura
- 2.8. Suelo
- 2.9. Vegetación

### Capítulo III            **Geología e hidrogeología**

- 3.1. Fisiografía
- 3.2. Geología
  - 3.2.1. Estratigrafía
  - 3.2.2. Estructuras geológicas presentes
  - 3.2.3. Geología del subsuelo
- 3.3. Hidrogeología
  - 3.3.1. Antecedentes hidrogeológicos de la zona de estudio
  - 3.3.2. Censo de pozos

### Capítulo IV            **Fundamentos teóricos del método electromagnético**

- 4.1. Principio fundamentales de los métodos electromagnéticos
  - 4.1.1. Ecuaciones de Maxwell
  - 4.1.2. Ecuación de onda
  - 4.1.3. Condiciones de frontera
  - 4.1.4. Solución de la ecuación de onda
- 4.2. Métodos electromagnéticos
  - 4.2.1. Generalidades del TEM
  - 4.2.2. Respuesta transitoria del campo electromagnético de un dipolo magnético vertical
  - 4.2.3. Parámetro físico de interpretación en el TEM
  - 4.2.4. Interpretación del TEM
- 4.3. Arreglos geométricos del TEM



## **Capítulo V Exploración geofísica**

- 5.1. Generalidades
- 5.2. Especificaciones del equipo
- 5.3. Procesamiento de información geofísica
- 5.4. Interpretación de los TEMs
  - 5.4.1. Corte geoeléctrico 1
  - 5.4.2. Corte geoeléctrico 2
  - 5.4.3. Corte geoeléctrico 3
- 5.6. Análisis de resultados

## **Capítulo VI Correlación hidrogeológica-geofísica**

## **Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones**

- 7.1. Conclusiones
- 7.2. Recomendaciones

## **Bibliografía**

## **Software**

## **Anexo**

(Interpretación de datos geofísicos)

## **Índice de figuras**

- Figura 2.1. Ubicación geográfica de San Juan del Río, Querétaro.  
Figura 2.2. Localización de la zona de estudio.  
Figura 2.3. Vías de comunicación.  
Figura 2.4. Hidrografía.  
Figura 2.5. Climas.  
Figura 2.6. Distribución de la precipitación.  
Figura 2.7. Distribución de la temperatura.  
Figura 2.8. Tipos de suelo.  
Figura 2.9. Tipos de vegetación.  
Figura 3.1. Fisiografía del estado de Querétaro.  
Figura 3.2. Mapa geológico.  
Figura 3.3. Imagen de Satélite del arreglo estructural del acuífero de San Juan del Río.  
Figura 3.4. Columna geológica.  
Figura 3.5. Sección geológica esquemática del área de estudio.  
Figura 3.6. Elevación al nivel estático para el año 2003.  
Figura 3.7. Profundidad del nivel estático del año de 2003.  
Figura 3.8. Plano de localización de pozos que se encuentran en el área de estudio.  
Figura 4.1. Fenómeno de inducción en el sondeo transitorio.  
Figura 4.2. Generación del campo magnético y las corrientes de Eddie.  
Figura 4.3. Forma de la corriente inyectada en la bobina transmisora.  
Figura 4.4. Señal del receptor (voltaje vs tiempo), por etapas.  
Figura 4.5. Resistividad.  
Figura 4.6. Configuraciones de TEM's.  
Figura 5.1. Localización de los TEM's en la zona de estudio.





- Figura 5.2. Equipo empleado.
- Figura 5.3. Procedimiento para el procesamiento de los datos geofísicos.
- Figura 5.4. Localización de los perfiles geoelectricos.
- Figura 5.5. Corte geoelectrico 1.
- Figura 5.6. Corte geoelectrico 2.
- Figura 5.7. Corte geoelectrico 3.
- Figura 6.1. Correlación geológica-geofísica.
- Figura 6.2. Sección geológica-geofísica esquemática

## Índice de tablas

- Tabla 3.1. Cortes litológicos de los pozos Cerro Gordo y El Rodeo.
- Tabla 3.2. Censo de pozos (abril de 2008).
- Tabla 5.1. Descripción de las unidades geoelectricas del perfil 1.
- Tabla 5.2. Descripción de las unidades geoelectricas del perfil 2.
- Tabla 5.3. Descripción de las unidades geoelectricas del perfil 3.
- Tabla 6.1. Integración de la información.



## Resumen

Con el propósito de complementar mi formación profesional y aplicar los conocimientos adquiridos en las aulas de clase, se desarrolló un trabajo que integra la geología, hidrogeología y geofísica encaminado a proponer un sitio favorable para la ubicación de una fuente de abastecimiento de agua subterránea.

Para la ejecución de este trabajo se realizaron actividades de recopilación, adquisición, análisis, procesamiento e integración de información que reforzaron mis competencias sobre geología, sondeo electromagnético en el dominio del tiempo, logística operacional y toma de decisiones, entre otras.

El trabajo de campo se realizó en la parte sur de la ciudad de San Juan del Río, lugar donde se pretende extraer un caudal adicional de 15 lps para satisfacer las necesidades de un nuevo desarrollo habitacional de 5,000 personas.

Para evaluar las condiciones del subsuelo se hizo uso de información de 7 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo de estudios anteriores y de 4 más en los que participé con bobinas coincidentes de 300x300m.

La zona de estudio se encuentra en un ambiente volcánico donde resaltan rocas basálticas e ignimbríticas, donde su permeabilidad es de media a baja, lo anterior se comprueba por un pozo existente en la zona con una profundidad de perforación de 400 m, con un nivel estático de 138 m y un dinámico en su prueba de aforo de 260 m.

La interpretación de los sondeos electromagnéticos identifica cinco unidades geoelectricas de las cuales la unidad C es la que actualmente aporta agua y se asocia a una ignimbrita. En cuanto a la unidad geoelectrica B, localizada sobre la unidad C se asocia a material arcilloso, por los bajos valores de resistividad que presenta y porque no aportó agua en la prueba de aforo –se abatió todo el espesor-. En cuanto a la unidad D, también presenta valores bajos y la unidad E presenta valores favorables para aportar agua. Esta última unidad se correlaciona con la unidad que se identifica, también a profundidad, en la zona del valle y que actualmente aporta agua para el abastecimiento de la ciudad.

El resultado del estudio indica que la zona tiene posibilidad de aportar el caudal solicitado y satisfacer las necesidades de agua para el desarrollo habitacional que se pretende construir. Sin embargo, es conveniente mencionar que la extracción de este caudal incidirá negativamente en el acuífero del valle de San Juan del Río, distorsionando la red de flujo natural que existe.

Se sugiere realizar la perforación de un pozo exploratorio a una profundidad de 600 m.



# Capítulo I Introducción

## 1.1. Antecedentes

Las grandes civilizaciones por mandato de sus dioses se establecieron en lugares donde existía agua -principalmente en la rivera de los ríos o en sitios cercanos a un cuerpo de agua superficial-, esto propició el desarrollo de la agricultura, ganadería, la pesca y en los dos últimos siglos la industria y los servicios. Sin el sustento del agua no sería posible la vida en el planeta de todas las especies que lo habitan, incluyendo al hombre.

A pesar de que vivimos en un planeta donde el agua es su principal componente, resalta que sólo el 3% es aprovechable para el desarrollo de la vida. Por otra parte el desmesurado crecimiento de la población ha generado la necesidad de contar cada vez con mayores volúmenes de agua, los cuales son directamente proporcionales al nivel de calidad de vida de los individuos (a mayor nivel social mayor consumo de agua). Por otro lado, el uso indiscriminado del agua crea situaciones adversas que ponen en riesgo la sustentabilidad del recurso y la vida en el planeta.

Para el caso de México, las ciudades con mayor desarrollo poblacional, industrial y agrícola se ubican en elevaciones superiores a los 1,400 metros sobre el nivel del mar (msnm). Esta situación origina que la disponibilidad de recurso sea a través del agua subterránea, lo cual requiere de la perforación de pozos a diferentes profundidades, en sitios con ambientes geológicos complejos.

Lo anterior implica la necesidad de realizar estudios hidrogeológicos a detalle para caracterizar y definir con mayor grado de certidumbre, la factibilidad de encontrar agua a mayor profundidad, que permitan sustentar la vida de las ciudades que la requieren.

El caso que se trata en este trabajo es recurrente, la mayoría de las poblaciones más importantes del país se ubican por arriba de la elevación antes mencionada, lo que hace necesario investigar y proporcionar los elementos técnicos suficientes que permitan una oportuna toma de decisiones en cuanto a perforar o no un pozo y sobre todo, a resolver la incógnita ¿Se contará con el volumen de agua suficiente para satisfacer la demanda?

La ciudad de San Juan del Río es un ejemplo de la situación descrita, se encuentra a una elevación superior a los 1,900 msnm y cercano al parteaguas continental. Es un centro de desarrollo poblacional importante que apoya la economía del estado de Querétaro. Por su ubicación, es atractivo para el desarrollo industrial y habitacional, situación que motiva a inmobiliarias a fijar su vista en esta zona y promover la construcción de nuevos desarrollos habitacionales. Su principal fuente de abastecimiento de agua se encuentra en el subsuelo.

Como parte del apoyo para la toma de decisiones en cuanto a perforar o no un pozo, es necesario realizar estudios indirectos que permitan proporcionar más elementos de juicio para interpretar la geología del subsuelo. Para estos estudios



se utiliza la exploración geofísica, y para el caso que nos ocupa, el método electromagnético, el cual permite caracterizar y definir la geometría y estructura del subsuelo con suficiente claridad.

Para este trabajo se tomó información de varios estudios geofísicos realizados en la zona, en los que se utilizó el método electromagnético en la modalidad de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM). Esta técnica geofísica proporciona contrastes de resistividad o conductividad a profundidad, que permiten asociarlos a los diferentes eventos geológicos que se presentan en el subsuelo.

Este método define con un mayor rango de certidumbre las condiciones del subsuelo, al caracterizar mejor los estratos a mayor profundidad. También, es necesario mencionar que se presentan limitaciones en cuanto a la profundidad de investigación, tanto por la capacidad de los equipos como del tipo de bobina utilizada para realizar la investigación.

El uso del TEM apoya a la definición de las condiciones geológicas con mayor detalle; sin embargo, origina que los costos de la exploración sean más elevados, con relación a otros métodos –por ejemplo el sondeo eléctrico vertical-, lo cual se justifica al contar con más elementos para la toma de decisiones.

Para cubrir el objetivo del trabajo de tesis fue necesario realizar diversas actividades. La primera correspondió a la adquisición y análisis de información de estudios preliminares que permitieron tener un marco de referencia geográfico e hidrogeológico de la zona. Después, se realizó un reconocimiento hidrogeológico para conocer las posiciones de los niveles estático y dinámico del agua subterránea y productividad de los pozos. Otra actividad del estudio fue la obtención de las propiedades físicas de las rocas –resistividad- lo que permitió caracterizar la geometría y definir la estructura del subsuelo. Se realizó el procesado e integración de la información con lo cual se definió un modelo conceptual de funcionamiento de las condiciones del subsuelo y permitió definir si la zona es o no productora de agua.

## **1.2. Objetivos**

Con base en información geofísica de 11 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo y un reconocimiento hidrogeológico realizado en la zona sur oriente del municipio de San Juan del Río, definir si el área tiene la capacidad de proporcionar agua en la cantidad suficiente para sustentar la construcción de un desarrollo habitacional para 5,000 personas.

## Capítulo II Marco geográfico de referencia

### 2.1. Localización

El área de estudio corresponde al territorio político del municipio de San Juan del Río. Se localiza al suroriente de la ciudad de Querétaro. Está limitada al Este por el Estado de México e Hidalgo, al Sur por el municipio de Amealco de Bonfil, al Oeste por el municipio de Pedro Escobedo y al Norte por el municipio de Tequisquiapan, enmarcado entre las coordenadas geográficas  $20^{\circ} 12'$  a  $20^{\circ} 34'$  de Latitud Norte y  $99^{\circ} 50'$  a  $100^{\circ} 12'$  de Longitud Oeste con una superficie de 25 km<sup>2</sup>. Está definida dentro de la carta topográfica de INEGI con clave, F14C77 (San Juan del Río) escala 1:50,000. **Figura 2.1.**

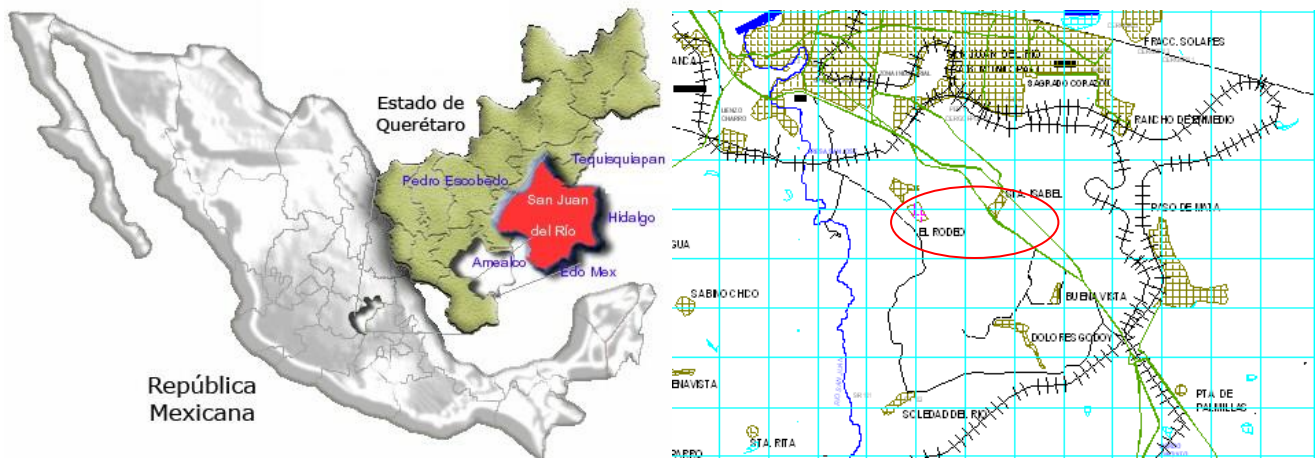


Figura 2.1 Ubicación geográfica de San Juan del Río, Querétaro

Las principales localidades que se encuentran aledañas a la zona de estudio son Palmillas, Soledad del Río, El Rodeo, Magdalena de Dolores Godoy, Paso de Mata y Santa Gertrudis. **Figura 2.2.**

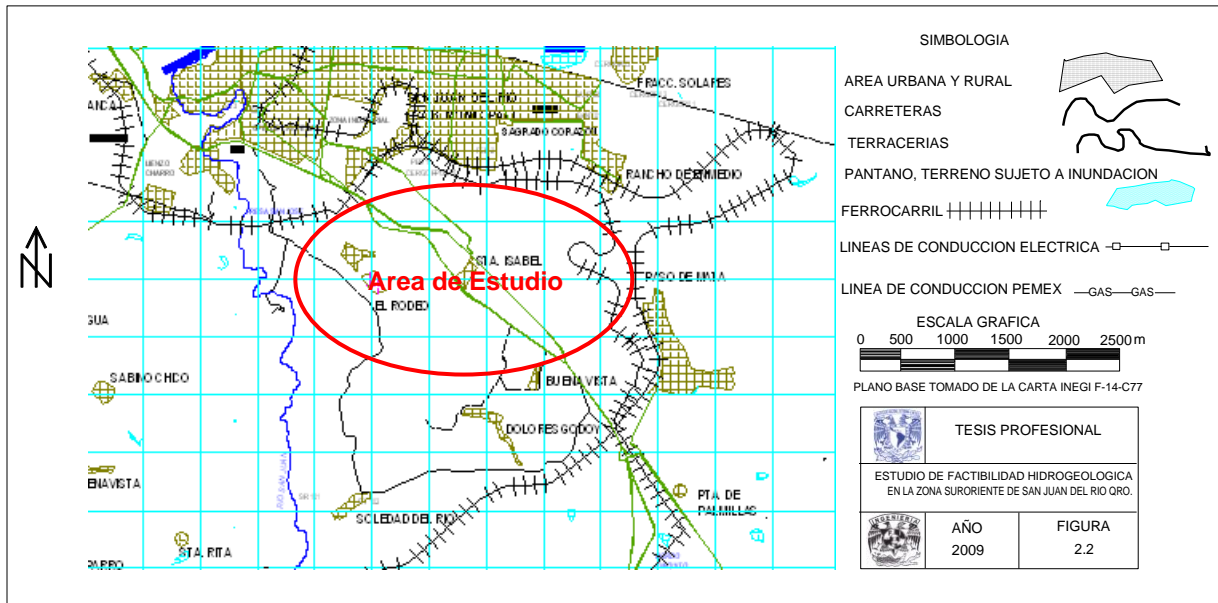


Figura 2.2. Localización de la a la zona de estudio.

## 2.2 Vías de comunicación

La zona cuenta con una amplia red de carreteras que la mantiene comunicada con la capital del país y con los estados del centro y norte.

Las principales vías de comunicación son la carretera federal 57, México-Querétaro que pasa por el límite norte de la zona de estudio. La carretera federal 120, que proviene de la ciudad de Morelia, cruzando la zona de sur a noroeste, la red se complementa con las carreteras pavimentadas y de terracería permitiendo así una ágil comunicación entre las siguiente localidades: Amealco, Galindo, Tequisquiapan, Ezequiel Montes, Colón, Bernal, La Valla, Fuentezuelas y San Clemente, entre otras. **Figura 2.3**

La red de comunicación terrestre incluye el sistema de doble vía México-Querétaro y las líneas México-Nuevo Laredo y México-Guadalajara pasando por los poblados Bernal, San Nicolás, La Llave, La Fuente, Viborillas, Chiutepec, Ahorcado, Palmillas y San Juan del Río.

## 2.3. Servicios

La zona de estudio cuenta con servicios de energía eléctrica, alcantarillado, agua potable, teléfono y transporte urbano.



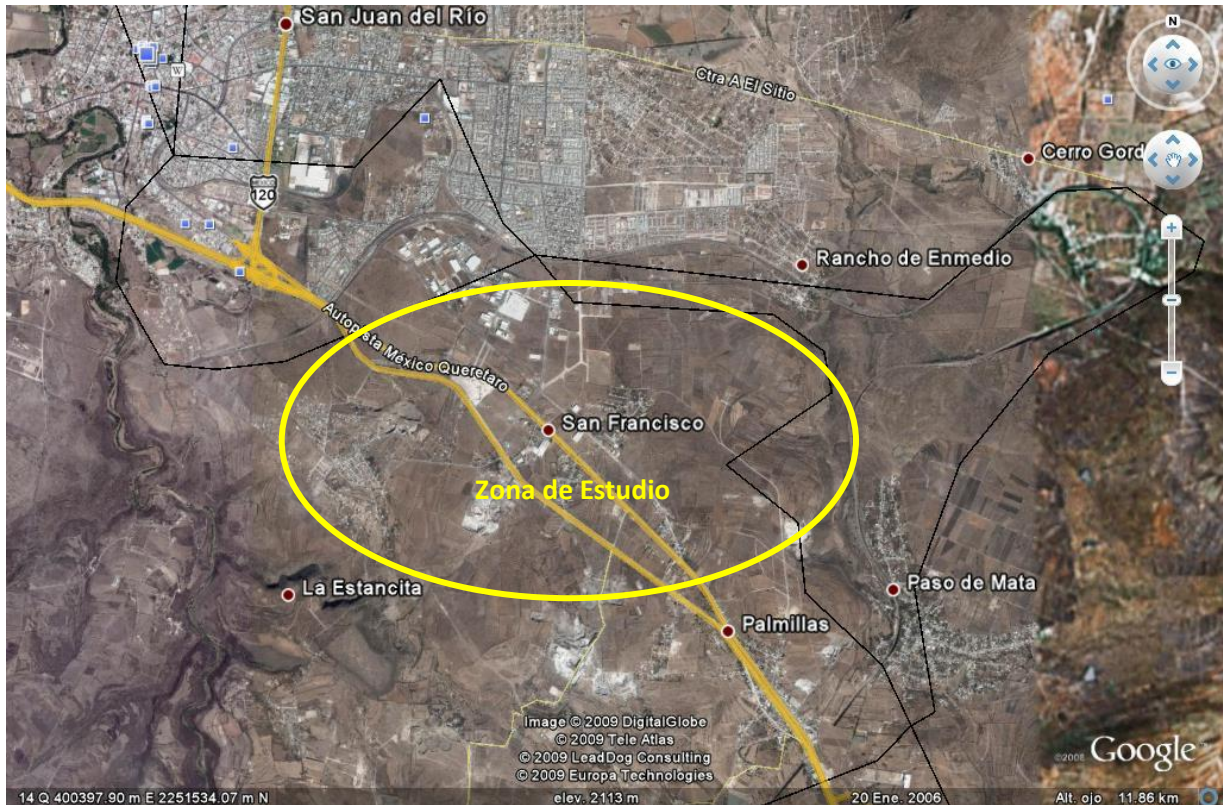


Figura 2.3. Vías de comunicación.  
(Tomada de Google Earth 2008).

## 2.4. Hidrografía

El municipio de San Juan del Río, se encuentra en la Región Hidrológica No.26, correspondiente al Alto Pánuco dentro de la cuenca del Río Moctezuma. **Figura 2.4.**

En la zona sur se presentan los ríos San Juan, Blanco, Tuna Mansa y Prieto, hacia la parte norte se encuentra el arroyo El Caracol, en la zona poniente se presentan los arroyos Los Zúñigas, Cocheros, Hondo e Higaderos; y hacia el norponiente se encuentra el canal Lomo del Toro.

En la cuenca existen varios almacenamientos de agua superficial, de los cuales, los más importantes por los volúmenes que captan son: La presa Constitución de 1917 (con capacidad 65 Mm<sup>3</sup>), la presa El Centenario (con capacidad 13.8 Mm<sup>3</sup>) y la Laguna de El Divino Redentor o La Llave (con capacidad 9.30 Mm<sup>3</sup>). Gran parte de la zona agrícola del municipio se encuentra dentro del Distrito de Riego No. 23 y ocupa tanto los volúmenes del almacenamiento de estas presas, como agua subterránea a través de una infraestructura de pozos profundos.

## 2.5. Clima

Se presentan dos tipos de climas, el primero templado-subhúmedo en la zona sur con lluvias en verano. El grado de humedad en esta región aumenta conforme se avanza hacia la parte topográfica alta. Afecta parte del sur del municipio de San Juan del Río. **Figura 2.5.**

El clima semiseco templado es el más común ya que cubre aproximadamente un 35% de la superficie estatal. Se localiza en una amplia franja que va de este a oeste, cubriendo la zona norte de San Juan del Río.

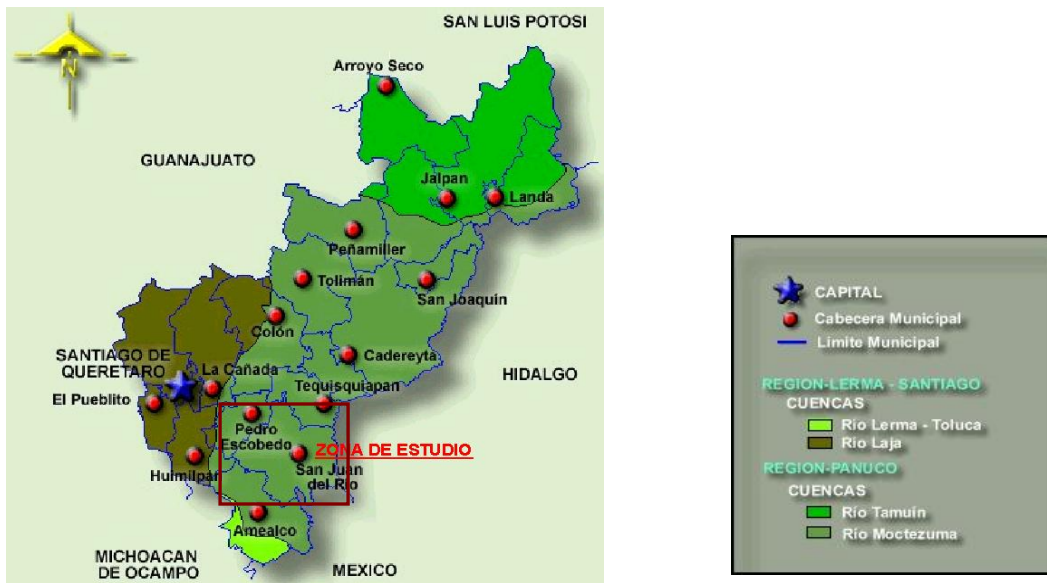


Figura 2.4. Hidrografía.  
<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.



Figura 2.5. Climas.  
<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.

## 2.6. Precipitación

La precipitación es el parámetro más importante dentro del ciclo hidrológico. En el municipio de San Juan del Río se presentan tres distribuciones de precipitación de acuerdo al mapa de INEGI. **Figura 2.6.**



La primera zona se define con una precipitación media anual de 700 a 800 mm, en una franja orientada sur – oeste, en la porción sur de la zona de estudio. Se presenta una segunda franja con dirección este-oeste, con una precipitación media de 600 a 700 mm que cubre la parte de la ciudad de San Juan del Río y la tercera zona, se localiza en la parte norte de la ciudad, está afectada por una franja de 500 mm a 600 mm anuales. La mayor incidencia pluvial se presenta en los meses de julio y agosto.



Figura 2.6. Distribución de la precipitación.  
<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.

## 2.7. Temperatura

Las temperaturas medias anuales que se reportan en el área oscilan de 16 a 18° C para la zona norte y de 14 a 16° C para la zona sur. **Figura 2.7.**

## 2.8. Suelo

La carta INEGI, reporta asociaciones de suelos representados principalmente por Feozem Lúvico y Feozem Háplico de textura media a fina. También se presentan asociaciones de Planosol Mólico con Vertisol Pélico y Feozem Háplico con una textura media y fase pedregosa en la superficie con presencia en algunas zonas de fase dúrica no mayor a los 50 cm de profundidad. En menor proporción se presentan Rendzinas asociado con Feozem calcárico con una textura media. **Figura 2.8.**

## 2.9. Vegetación

La vegetación predominante en el municipio es la agricultura de temporal y la agricultura de riego, en menor proporción se presenta matorral crasicaule y matorral subinerme representada principalmente por nopal y especies que tienen

espinas, pastizal inducido, que es la característica de la zona de estudio. También se presenta bosque templado y cardonal hacia la parte sur del municipio. **Figura 2.9** Los principales cultivos de temporal y riego son: sorgo, frijol, cebada, trigo, maíz grano, avena, chile seco, zanahoria, alfalfa, uva y durazno.

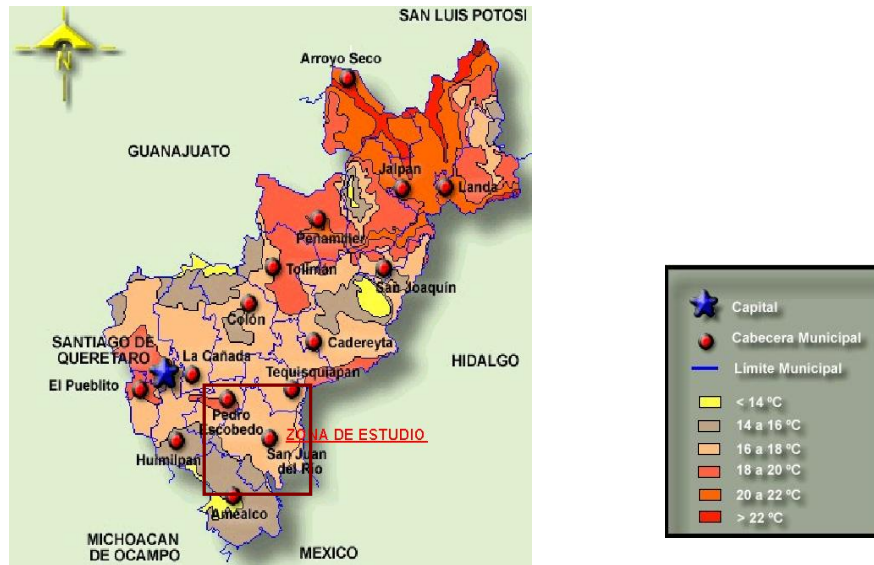


Figura 2.7. Distribución de la temperatura.  
<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.



Figura 2.8. Tipos de suelo.  
<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.

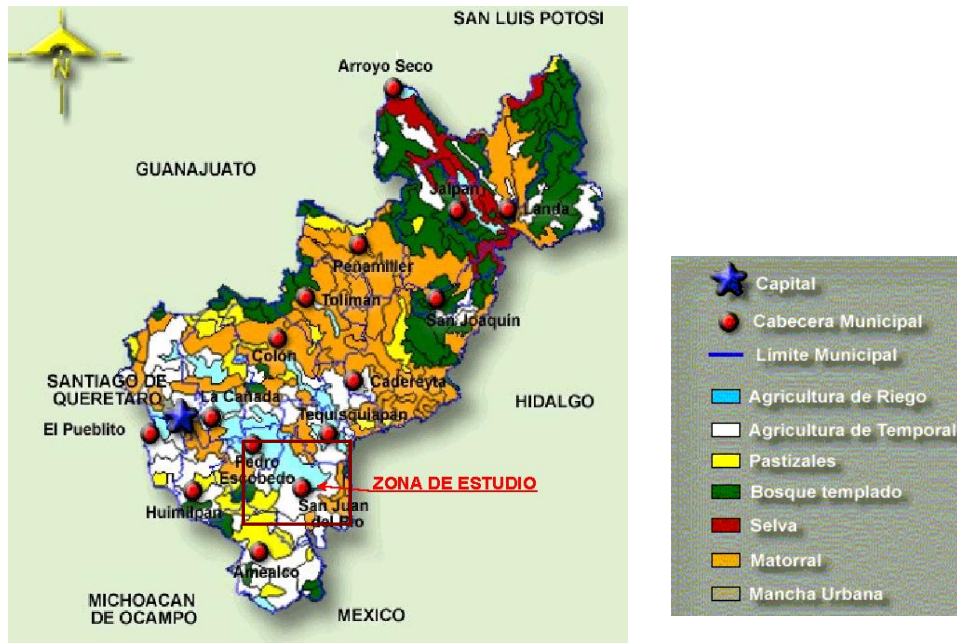


Figura 2.9. Tipos de vegetación.  
<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.

El propósito de conocer la hidrografía, el clima, precipitación, temperatura, suelo y vegetación entre otras, permite identificar si las condiciones del comportamiento del ciclo del agua favorecen la recarga al acuífero, qué condiciones hidrogeológicas se pueden presentar en el subsuelo, de dónde proviene el agua, qué ríos se encuentran cerca de la zona, cuál es la infiltración en el subsuelo, cuál es la temperatura a la que se evapora el agua superficial, cuáles son las condiciones climatológicas para determinar los periodos de lluvias y estiaje, identificar de manera cualitativa dónde se encuentra la zona de recarga, descarga y el posible flujo del agua subterránea y su dirección.

## Capítulo III Geología e hidrogeología

### 3.1. Fisiografía

El estado de Querétaro se encuentra dividido por tres provincias fisiográficas, la Sierra Madre Oriental, la Mesa del Centro y el Eje Neovolcánico Transmexicano. **Figura 3.1.**



Figura 3.1. Fisiografía del estado de Querétaro.  
Tomado de INEGI <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia>.

Para el caso que nos ocupa, la zona de estudio corresponde al Eje Neovolcánico Transmexicano. Las principales formas del terreno han sido modeladas por procesos volcánicos formadores del relieve y en muy bajo porcentaje, por procesos erosivos y de acumulación. Los rasgos topográficos más importantes que se presentan son: al sur y nororiente se encuentran las caldera de Amealco y Huichapan; Al oriente del municipio, las elevaciones Cerro Gordo (2,290 msnm) y Cerro Banthi respectivamente; al surponiente el cerro La Estancia (2,070 msnm); al poniente el valle de San Juan del Río con una elevación promedio de 1,920 msnm; al norponiente la Sierra de Enmedio y hacia el noreste el Cerro La Cruz (2,530 msnm).

### 3.2. Geología

El área de estudio se encuentra en un ambiente volcánico de edad Terciaria con rocas de diferente composición, presenta un arreglo estructural producto de las emisiones volcánicas generadas por las calderas de Amealco y Hichapan. Se identifican cinco unidades litológicas que cubren la superficie del terreno. **Figura 3.2**



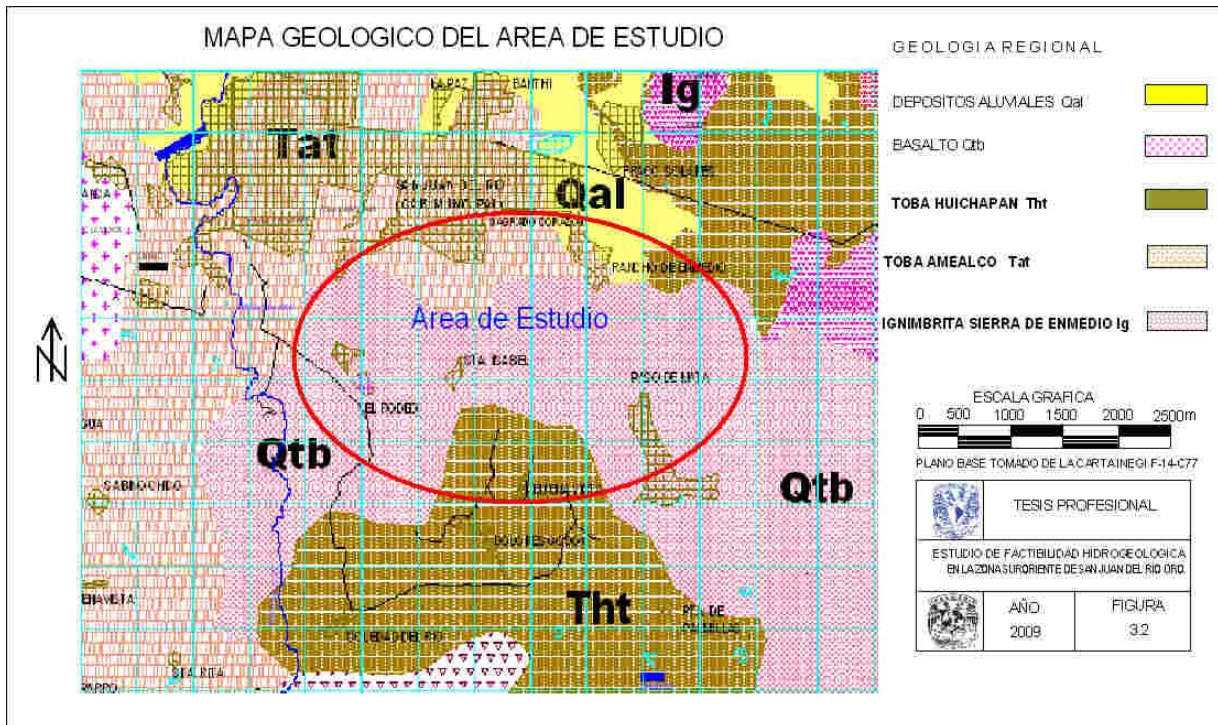


Figura 3.2. Mapa geológico

Modificado del estudio de Actualización hidrogeológica y modelación matemática JAPAM de San Juan del Río 2003.

### 3.2.1. Estratigrafía

De acuerdo con los eventos geológicos que se presentan en el área de estudio, la litología que se identifica en superficie y con apoyo de una sección geológica esquemática, se describen las características litológicas de las rocas, desde la más antigua a la más reciente.

#### **Ignimbrita Sierra de Enmedio (Ig).**

Unidad de rocas de composición ácida (ignimbritas), su mineralogía está compuesta por cuarzo, vidrio ácido, sanidino y plagioclasas; como minerales accesorios ferromagnesianos alterados, minerales arcillosos y óxidos de hierro; presenta estructura fluidal, en algunos casos con ligero ondulamiento. Su coloración es de gris claro y rosado al fresco y pardo amarillento al intemperismo. Su textura es afanítica, con alineamiento de minerales principalmente de feldspatos potásicos, algunas vesículas rellenas por cuarzo botroidal y contiene en ocasiones esferulitas de sílice.

#### **Toba Amealco (Tat)**

Con este nombre se define a una secuencia de tobas interestratificadas con ignimbrita ubicada al sur de la zona de estudio. Es la unidad más importante en términos de volumen y distribución. Es una secuencia piroclástica originada durante las fases de la explosión de la caldera de Amealco. Se identifican capas



de depósitos de piroclastos, pumicita, depósitos de caída libre y depósitos de flujos de lodos.

#### **Toba Huichapan (Tht)**

Es una secuencia de tobas limo-arcillosas de composición andesítica y basáltica, de coloración crema a pardo claro y crema amarillento al intemperismo, con algunos bloques de basaltos. El espesor de los estratos varía de medianos a gruesos entre 0.2 a 2 m. Se localiza en los poblados de Palmillas y en San Sebastián de las Barrancas.

#### **Basaltos (Qtb)**

Unidad integrada por basalto y brechas volcánicas de composición básica. En lo referente al basalto, se observan coloraciones que varían de gris oscuro a negro, presenta textura afanítica muy vesicular, cuya mineralogía se compone de plagioclasas, piroxenos, ferromagnesianos y biotita, en ocasiones presenta un fuerte lajeamiento.

#### **Depósitos Aluviales (Qal)**

Se encuentran distribuidos principalmente en los cauces de arroyos, ríos y lagos (naturales y artificiales). Asimismo, se localizan cubriendo de manera discordante a las tobas que rellenan los extensos valles de San Juan del Río, cuya extensión se prolonga en dirección noroeste-sureste. Su espesor es variable, encontrando en algunas zonas entre 20-30 cm y en otras de 1-5 m en algunos cortes litológicos de pozos perforados se encontraron espesores de 5 a 18 m en la parte del valle de San Juan del Río. Se componen de materiales de diversos tamaños que van desde arcillas hasta bloques redondeados de diferente composición de rocas preexistentes.

### **3.2.2. Estructuras geológicas presentes**

El área de estudio presenta una geología estructural de carácter tectónico debido a movimientos de esfuerzos distensivos, con esfuerzos compresivos y fracturas tensionales, las cuales se deben a la ocurrencia o expulsión de lavas de diversa naturaleza y composición.

El principal alineamiento tiene como origen dos ejes distensivos, lo que originó la formación de una fosa donde se acumularon grandes cantidades de material piroclástico y lavas que dieron origen al principal acuífero del valle de San Juan del Río, con una dirección preferencial NW-SE. Las partes altas corresponden a la sierra de Enmedio, hacia el sur el alineamiento de las rocas de las unidades Sierra de Vaquerías (Tva), volcanes no diferenciados (Tpi) y el Domo Galindillo (Tgr), no identificados en el plano geológico que se presenta.

Otro alineamiento que se identifica se asocia a una falla transcurrente y a la presencia de hidrotermalismo, tiene una dirección preferencial SW – NE, pasa por la zona de la Presa Constitución 1917 y se prolonga hacia Tequisquiapan, **figura 3.3.**

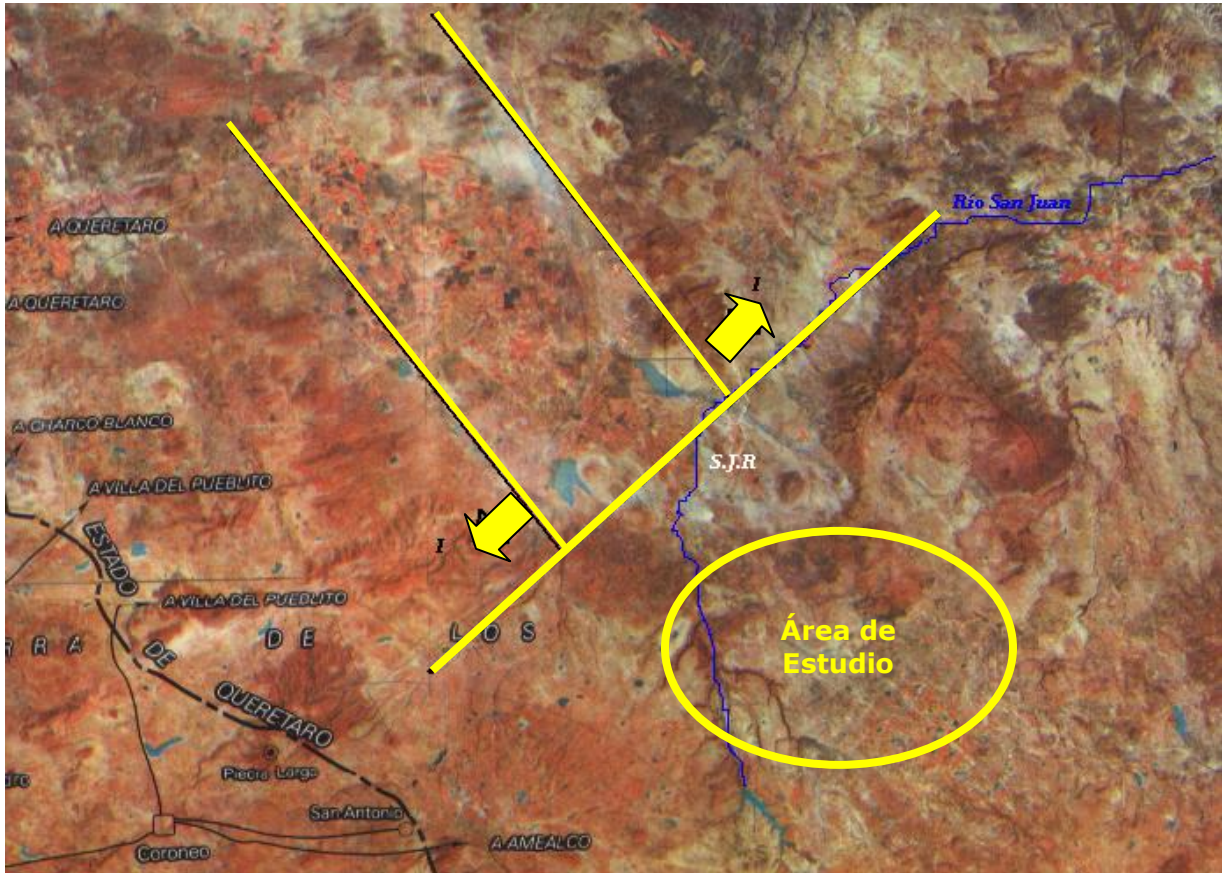


Figura 3.3. Imagen de Satélite del arreglo estructural del acuífero de San Juan del Río. (tomada del estudio de actualización hidrogeológica y modelación matemática, Japam 2003).

El Río San Juan y sus afluentes juegan un papel importante en el arreglo estructural de la zona. Hacia la zona sur éstos presentan un drenaje con secciones de disección profundas, formando cañones generados por efectos tectónicos.

### 3.2.3. Geología del subsuelo

Se consideró la información litológica y de registros de pozos de los pozos más profundos que se localizan en el entorno del área de estudio **Tabla 3.1** y **Figura 3.4.**

#### Pozo Cerro Gordo

Profundidad	Litología
0 - 113	Toba ignimbrítica
113 - 160	Toba
160 - 295	Toba ignimbrítica
295 - 400	Pérdida total de circulación (se asocia a material arenoso)

**Pozo El Rodeo**

Profundidad	Litología
0 - 120	Basalto
120 - 170	Toba ignimbrítica alterada y pumicita
170 - 400	Pérdida total de circulación (se asocia a ignimbrita )

Tabla 3.1. Cortes litológicos de los pozos Cerro Gordo y El Rodeo.

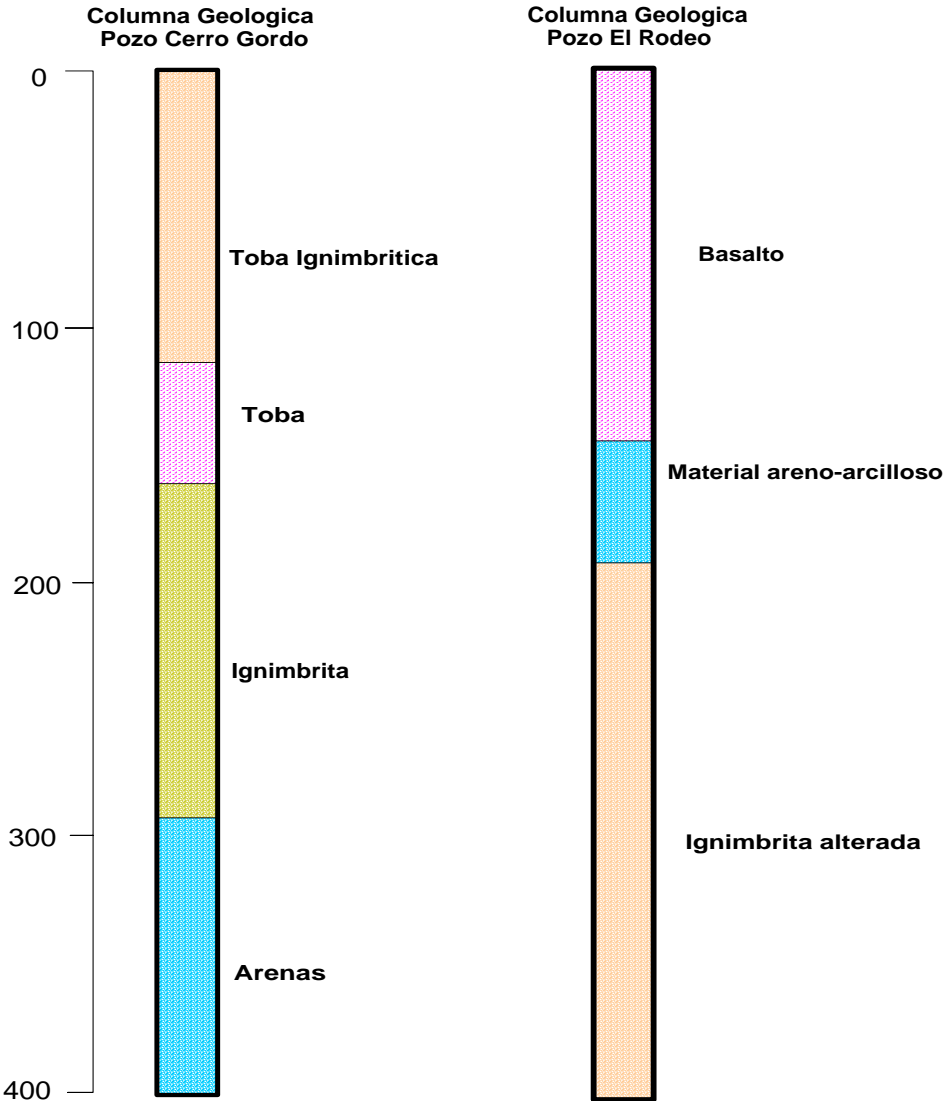


Figura 3.4. Columna geológica.

Se elaboró una sección geológica esquemática con dirección preferencial N-S que correlaciona los dos cortes litológicos de pozos descritos, uno localizado en el sitio del estudio y otro a 6 km al norte. **Figura 3.5**



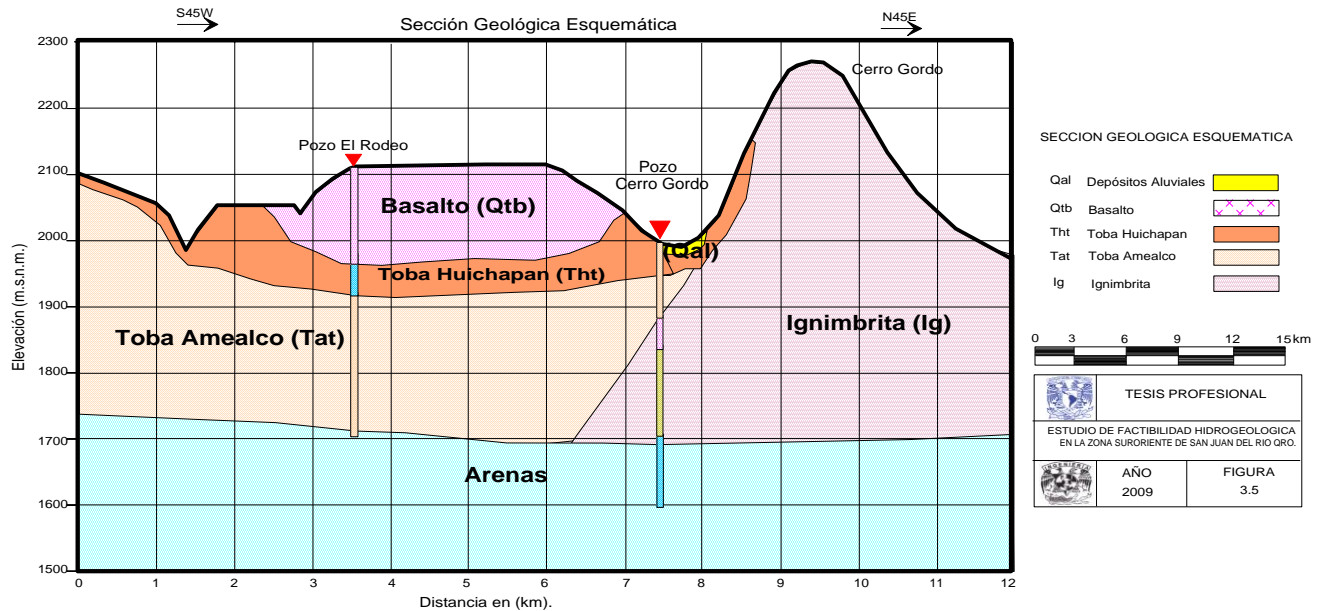


Figura 3.5. Sección geológica esquemática del área de estudio. Elaborada con dirección SW-NE 45, que va de la zona de estudio al cerro Gordo.

### 3.3. Hidrogeología

#### 3.3.1 Antecedentes hidrogeológicos de la zona de estudio

La ciudad de San Juan del Río demanda cada día mayores volúmenes de agua subterránea, por lo cual es necesario contar con el conocimiento hidrogeológico suficiente para proponer la perforación de pozos o en su defecto proponer una solución alternativa. Hoy, la demanda del agua sobrepasa la oferta de la misma, lo que trae como consecuencia la sobreexplotación del acuífero y un desequilibrio negativo en la recarga del acuífero.

De la información recopilada, en el municipio de San Juan del Río se cuenta con ocho estudios de factibilidad hidrogeológica con el propósito de ubicar un sitio favorable para la perforación de pozos y cuatro estudios de cuantificación del acuífero de los cuales involucran el modelado de las condiciones hidrodinámicas.

En lo relativo a infraestructura hidráulica para el año de 2009, el municipio de San Juan del Río cuenta con 58 pozos destinados para agua potable, 124 para uso agrícola y 26 para uso industrial. La profundidad promedio de los pozos oscila entre los 200 y 300 m, aunque en la actualidad ya existen pozos con mayor profundidad (400 m). Las necesidades de contar con mayores volúmenes de agua en la zona, requiere explorar a mayores profundidades. Esta situación exige realizar estudios geofísicos con mayor detalle, aplicando diferentes técnicas que permitan delinear mejor las características del subsuelo y tener una mayor profundidad de investigación.

La zona de San Juan del Río se encuentra en un ambiente geológico volcánico, caracterizado por rocas basálticas, andesíticas, tobas, ignimbrita y aluvión entre otras.



La dinámica del agua subterránea ocurre en un sistema acuífero libre heterogéneo de continuidad hidráulica regional. El sistema del agua subterránea se desarrolla preferentemente en una estructura tectónica integrada por una fosa limitada al sur por una cadena de cerros compuestos por material volcánico básico (andesitas) y ácido (ignimbritas) cuya permeabilidad es reducida, donde la presencia de pozos es mínima –es la parte donde se realizó el trabajo de tesis-. Al norte se encuentra la Sierra de Enmedio cuya composición volcánica es ácida, al norponiente se presentan rocas andesíticas. Todas estas rocas y por su posición geográfica y actúan como zonas de recarga.

Por lo que respecta a la zona del valle, es una depresión que en su parte superficial contiene material aluvial, producto de la erosión de las rocas que se encuentran en las partes altas con espesor que oscila entre 1 y 20 m. Debajo de este material se encuentran tobas de caída libre, producto de las calderas de Amealco y Huichapan, de composición arenosa poco consolidadas, pumicita y tobas arenosas las cuales en algunas partes se presentan intercalaciones de ignimbritas soldadas y fracturadas. Se considera que el espesor económicamente explotable, con base en los estudios geofísicos, es del orden de los 450 m.

El agua subterránea transita a través de una serie de rocas de origen diverso, entre los que destacan dos tipos de medios hidrogeológicos, un medio granular asociado a las tobas, cuyas transmisividades se ubican en el rango de  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$   $m^2/s$  y un medio fracturado asociado a basaltos e ignimbritas soldadas, cuyas transmisividades se ubican el rango de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$   $m^2/s$ . Estos últimos valores son los representativos de la zona donde se realizó el trabajo de tesis.

El sistema de flujo de agua subterráneo regional tiene una dirección preferencial SE-NW, **Figura 3.6**, hacia la ciudad de Querétaro, y otro hacia el N, San Pedro Ahuacatlán. Se identifica también un flujo profundo que se manifiesta por termalismo –en las cercanías del Río San Juan- y se asocia a las rocas ignimbríticas y al alineamiento SW-NE descrito en la geología estructural de la zona. Las zonas de recarga se ubican, en la presa Constitución 1917, en la zona del cauce del Río San Juan, Distrito de Riego 23 y en la zona sur hacia la parte alta.

Por la elevación topográfica que se presenta en la zona de estudio y de acuerdo con la geometría de acuífero el nivel estático se ubica a los 140 m de profundidad. En la parte que corresponde al valle, los niveles oscilan entre los 20 y 30 m de profundidad en la zona por donde se encuentra el río San Juan y la laguna del Divino Redentor. **Figura 3.7**. El abatimiento medio anual del acuífero es de 1.1 m. Los mayores abatimientos se localizan en la porción oriente de la ciudad con 2.25 m, y es donde se extrae la mayor cantidad de agua para uso potable; donde las condiciones de roca son de baja a media permeabilidad. En la porción poniente del acuífero el abatimiento es del orden de 1.07 m.

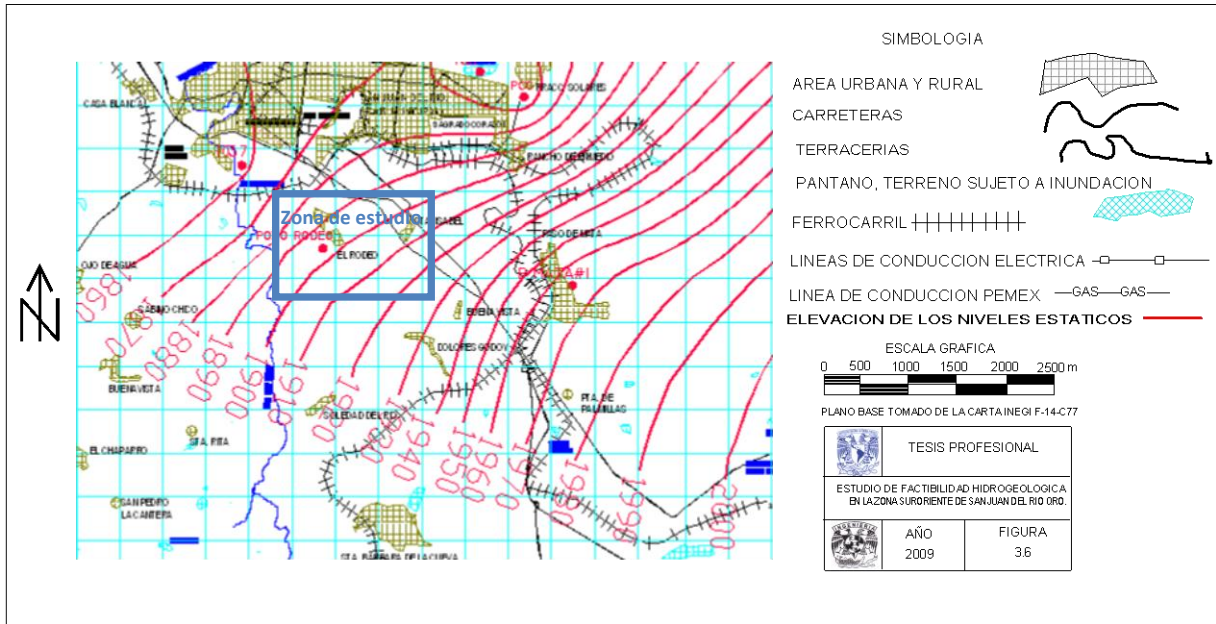


Figura 3.6. Elevación al nivel estático para el año 2003. Tomado del estudio de Actualización hidrogeológica y modelación matemática, JAPAM, San Juan del Río 2003.

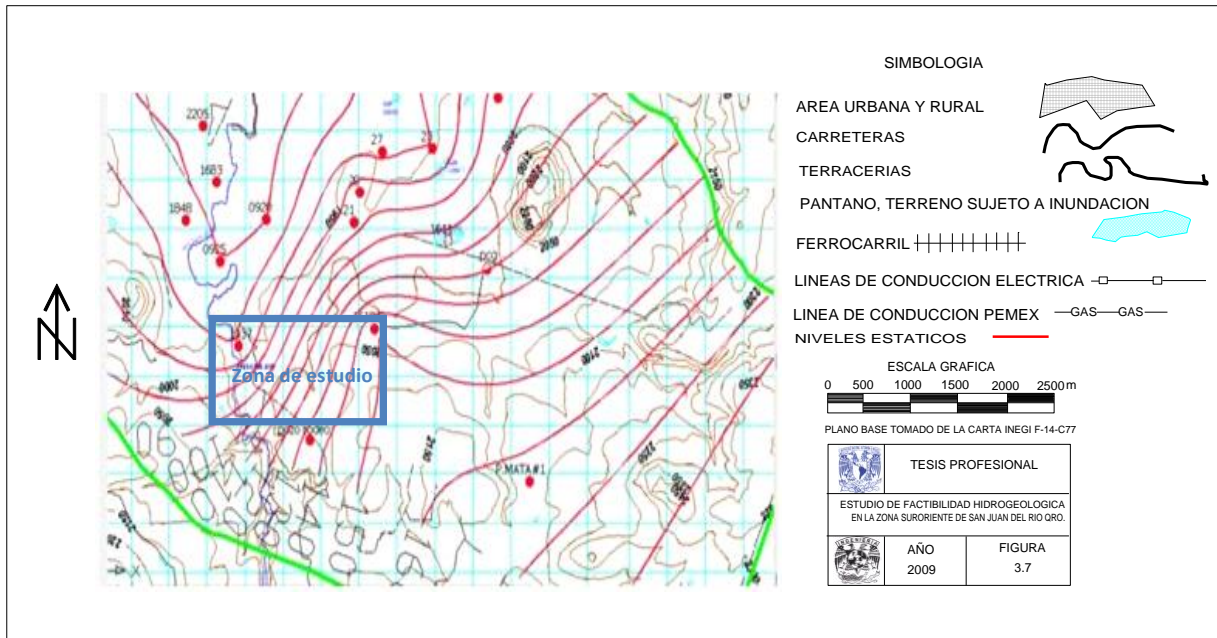


Figura 3.7. Profundidad del nivel estático del año de 2003. Tomado del estudio de actualización hidrogeológica y modelación matemática, JAPAM, San Juan del Río 2003.

Por lo que respecta a la administración del recurso, el municipio de San Juan del Río está en la región administrativa IX del Golfo Norte, la norma oficial Mexicana NOM-011-CNA-200 indica que el volumen anual de extracción hasta 2003 era de 295,889,028 m<sup>3</sup>/año, con un déficit de 12,929,028 m<sup>3</sup>/año. Para esta época se prevé que estos valores se han modificado por los requerimientos de mayor población demandante del recurso.

### 3.3.2. Censo de pozos

En los alrededores de zona de estudio se localizan 12 pozos activos, los cuales están destinados para uso potable e industrial.

El pozo más cercano a la zona de estudio es el pozo El Rodeo con un caudal de 12 lps, nivel estático se encuentra a los 138 m y el dinámico a los 148 m (dato de abril de 2008). El aforo del pozo (2003) se realizó a una profundidad de 260 m con un gasto máximo de 20 lps. **Figura 3.5.**

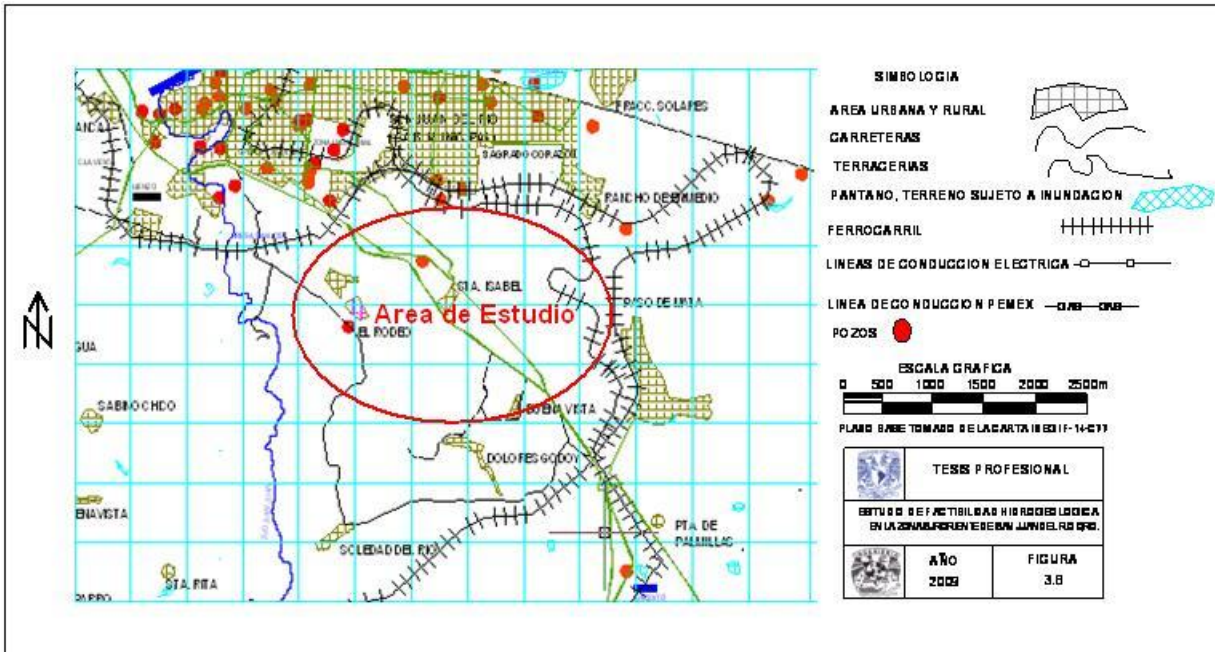


Figura 3.8. Plano de localización de pozos que se encuentran en el área de estudio. Tomado del estudio de actualización hidrogeológica y modelación matemática, JAPAM, San Juan del Río 2003.

En la **Tabla 3.2** se muestra la relación de pozos con sus características más relevantes.

NO. POZO	LONGITUD MERCATOR	LATITUD MERCATOR	PROF (M)	DIAM ADEME(pulg)	USO	CAUDAL	NIVEL ESTÁTICO 2008
933	402744	2252296		12	POTABLE	4.32	122.0
701	400353	2254434	250	14	POTABLE	13.40	121.4
702	401187	2254197	400	14	POTABLE	59.00	122.0
15A	399476	2252783	300	12	POTABLE	17.31	122.0
2206	399868	2252954	300	14	POTABLE	33.57	53.0
1609	397514	2252776	200	16	INDUSTRIAL	90.00	
1227	397744	2253969	200	16	INDUSTRIAL	92.00	
1614	397586	2253624	200	16	INDUSTRIAL	98.00	
Cerro Gordo	402141	2254028	400	14	POTABLE	26.00	122.0
Rodeo	397820	2250800	400	12	POTABLE	13.00	138.0
1190	404802	2252952	200	12	AGRÍCOLA	16.00	
171	404902	2254364	280	12	POTABLE	19.00	165.0

Tabla 3.2. Censo de pozos (abril de 2008).





## Capítulo IV Fundamentos teóricos del método electromagnético

### 4.1. Principios fundamentales de los métodos electromagnéticos

Una de las formas básicas de cuantificar los fenómenos electromagnéticos a través de la relación que existe entre el campo eléctrico y el campo magnético se encuentra establecido a través de las ecuaciones de Maxwell, las cuales relacionan los tipos de corriente y los campos que generan el fenómeno electromagnético.

#### 4.1.1. Ecuaciones de Maxwell

El campo electromagnético se compone por las siguientes funciones vectoriales:

$\vec{E}$ : Intensidad del campo eléctrico  $\left(\frac{V}{m}\right)$

$\vec{H}$ : Intensidad del campo magnético  $\left(\frac{A}{m}\right)$

$\vec{D}$ : Campo de desplazamiento  $\left(\frac{C}{m^2}\right)$

$\vec{B}$ : Campo de inducción magnética (Tesla) ó  $\left(\frac{Wb}{m^2}\right)$

J: Densidad de corriente eléctrica  $\left(\frac{A}{m^2}\right)$

$\rho$ : Densidad de carga eléctrica  $\left(\frac{C}{m^3}\right)$

En el dominio del tiempo estas funciones vectoriales describen el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos y son expresadas comúnmente en su forma diferencial (Orellana, 1972).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (4.1) \text{ Ley de Faraday.}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots\dots\dots (4.2) \text{ Ley de Ampere.}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \dots\dots\dots (4.3) \text{ Ley de Gauss para campos eléctricos.}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (4.4) \text{ Ley de Gauss para campos magnéticos.}$$

Para analizar y comprender el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos en el dominio del tiempo existen relaciones constitutivas lineales, entre las propiedades electromagnéticas del medio y los campos eléctricos y magnéticos, las cuales involucran a las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, donde se aplica la transformada de Fourier, estas ecuaciones fueron desarrolladas por (Ward y Hohmann, 1988).



$$B = \mu(\omega, H, r, t, T, P)H \dots\dots\dots (4.5)$$

$$J = \sigma(\omega, E, r, t, T, P)E \dots\dots\dots (4.6)$$

$$D = \varepsilon(\omega, E, r, t, T, P)E \dots\dots\dots (4.7)$$

Donde  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$  son tensores

$\varepsilon$ : permitividad o constante dieléctrica.

$\sigma$ : Conductividad eléctrica.

$\mu$ : permeabilidad magnética.

Por lo que  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$  están en función de la frecuencia, intensidad del campo eléctrico o magnético, posición, tiempo, temperatura y presión.

Para la solución de los problemas electromagnéticos en el dominio del tiempo se consideran las siguientes características del medio (*Ward y Hohmann, 1988*).

- Todos los medios se consideran homogéneos, lineales e isótropos, los cuales poseen características eléctricas que son independientes de la temperatura, tiempo y presión.
- La permeabilidad magnética se toma como un espacio libre  $\mu = \mu_0$ .

Bajo estas premisas las cuales condicionas la aplicación de la transformada de Fourier en las leyes de Ampere y Faraday (Ecs. 4.1 y 4.2) y usando las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia (*Ward y Hohmann, 1988*), se obtiene.

$$\nabla_x E + \hat{x}H = 0 \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\nabla_x H - \hat{y}E = 0 \dots\dots\dots (4.9)$$

Donde  $\hat{x} = i\mu\omega$  y  $\hat{y} = \sigma + i\varepsilon\omega$  son la impedancia y la admitancia (*Harrington, 1961*), respectivamente.

#### 4.1.2. Ecuación de onda

En el análisis de los fenómenos electromagnéticos aplicados en exploración del subsuelo, dichos fenómenos se consideran como modelos de capas terrestres, las cuales como se dijo anteriormente deben presentar condiciones homogéneas, lineales e isotrópicas para cuantificar, a través de una onda electromagnética, como se propaga el campo eléctrico y magnético, en el interior de la tierra, por lo cual al aplicar el rotacional a las ecuaciones 4.1 y 4.2 (*Ward y Hohmann, 1988*), se tiene:

$$\nabla_x(\nabla_x E) + \nabla_x \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.10)$$

$$\nabla_x(\nabla_x H) - \nabla_x \left( \frac{\partial D}{\partial t} \right) = \nabla_x J \dots\dots\dots (4.11)$$



Considerando las relaciones constitutivas lineales entre las propiedades electromagnéticas del medio en el dominio del tiempo, un medio no dispersivo, donde  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  además independientes del tiempo,

$$D = \epsilon E \dots\dots\dots (4.12)$$

$$B = \mu H \dots\dots\dots (4.13)$$

$$J = \sigma E \dots\dots\dots (4.14)$$

Aplicando estas relaciones a las leyes de Ampere y Faraday, se asume que los campos eléctricos y magnéticos son continuos por intervalos y poseen primera y segunda derivada por lo que las ecuaciones 4.10 y 4.11 se simplifican a:

$$\nabla_x \nabla_x E + \mu \epsilon \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) + \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.15)$$

$$\nabla_x \nabla_x H + \mu \epsilon \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) + \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.16)$$

Aplicando el rotacional de funciones vectoriales  $\nabla_x \nabla_x \tau = \nabla \nabla \cdot \tau - \nabla^2 \tau$ , asumiendo que  $\nabla \cdot E = 0$  y  $\nabla \cdot H = 0$  continuidad del campo eléctrico y magnético en medios homogéneos las ecuaciones 4.15 y 4.16 se simplifican a las ecuaciones de onda para los campos eléctricos y magnéticos en el dominio del tiempo.

$$\nabla^2 E - \mu \epsilon \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.17)$$

$$\nabla^2 H - \mu \epsilon \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.18)$$

Para simplificar la solución de la ecuación de onda, es necesario transformarla al dominio de las frecuencias, para lograrlo se aplica la transformada de Fourier con respecto al tiempo a las ecuaciones 4.17 y 4.18; dichas ecuaciones se conocen como las ecuaciones de Helmholtz:

$$\nabla^2 E + (\epsilon \mu \omega^2 - i \omega \mu \sigma) E = 0 \dots\dots\dots (4.19)$$

$$\nabla^2 H + (\epsilon \mu \omega^2 - i \omega \mu \sigma) H = 0 \dots\dots\dots (4.20)$$

Donde el número de onda se define como  $\gamma^2 = \epsilon \mu \omega^2 - i \omega \mu \sigma$ , esto significa que las corrientes de desplazamiento son mucho más pequeñas que las corrientes de conducción para materiales que existen en el subsuelo mientras que para frecuencias bajas del orden de los  $10^5$  Hz tiene el siguiente significado cuando  $\epsilon \mu \omega^2 \ll i \omega \mu \sigma$  implica que  $\gamma^2 \approx i \omega \mu \sigma$ , esto significa que nos encontramos en el modelo cuasi-estacionario y tomando en consideración las ecuaciones 4.17 y 4.18, se deduce lo siguiente:

$$\nabla^2 E - \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.21)$$

$$\nabla^2 H - \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \dots\dots\dots (4.22)$$

Sin embargo, en el dominio de la frecuencia:

$$\nabla^2 E - i \omega \mu \sigma E = 0 \dots\dots\dots (4.23)$$

$$\nabla^2 H - i \omega \mu \sigma H = 0 \dots\dots\dots (4.24)$$



Dichas ecuaciones describen el desarrollo de los fenómenos electromagnéticos a través de las ecuaciones de Maxwell en los dominios del tiempo y la frecuencia.

### 4.1.3. Condiciones de frontera

Para fenómenos electromagnéticos homogéneos lineales e isótropos, las condiciones de frontera según (*Ward y Hohmann, 1988*), son:

- La componente normal del campo magnético,  $B_n$  es continua a través de la interfase de separación del medio 1 al medio 2.

$$B_{n1} = B_{n2} \dots \dots \dots (4.25)$$

- El desplazamiento dieléctrico  $D_n$  en su componente normal es continuo a través de la interfase, esto es debido a la acumulación en la densidad de carga superficial  $\rho_n$ :

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_n \dots \dots \dots (4.26)$$

- El flujo de la componente tangencial del campo eléctrico  $E_t$  es continuo a través de la interfase:

$$E_{t1} = E_{t2} \dots \dots \dots (4.27)$$

- El flujo de la componente tangencial del campo magnético  $H_t$  es continuo a través de la interfase si no se presentan corrientes de superficie:

$$H_{t1} = H_{t2} \dots \dots \dots (4.28)$$

- La normal de la densidad de corriente  $J_n$  es continua a través de la interfase:

$$J_{n1} = J_{n2} \dots \dots \dots (4.29)$$

### 4.1.4. Solución de la ecuación de onda

Debido a que las ecuaciones de onda se consideran como ecuaciones diferenciales lineales, homogéneas y de segundo orden, existen dos soluciones para su tratamiento; sin embargo, para el caso que nos ocupa se considera la primera solución, una onda plana con dependencia sinusoidal en el tiempo, lo que quiere decir que presenta una variación armónica  $e^{i\omega t}$

$$E(t) = E_0 e^{i\gamma z} e^{-i(\omega t - \varphi)} \dots \dots \dots (4.30)$$

$$H(t) = H_0 e^{i\gamma z} e^{-i(\omega t - \varphi)} \dots \dots \dots (4.31)$$





Donde  $\gamma$  es un número complejo  $\gamma = \alpha - \beta i$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  son números reales y  $E_0$  y  $H_0$  son las amplitudes de las ondas de propagación de los campos eléctricos y magnéticos para el tiempo  $t=0$  donde el signo + ó - representa la dirección de propagación.

Tomando en consideración el fenómeno físico donde las corrientes de conducción dominan sobre las corrientes de desplazamiento  $I_c \gg I_d$  (modelo cuasi estático),  $\alpha$ ,  $\beta$ , están determinadas por:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \dots\dots\dots (4.32)$$

Por lo que al sustituir la ecuación 4.32 en el valor de  $\gamma$  y éste a su vez en las ecuaciones 4.30 y 4.32 y considerando que las ondas de propagación son en  $z^+$  las ecuaciones son:

$$E = E_0 e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \dots\dots\dots (4.33)$$

$$H = H_0 e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \dots\dots\dots (4.34)$$

Al analizar las ecuaciones anteriores donde  $\beta$  se define como un número real se observa que  $e^{-\beta z}$  disminuye al aumentar  $z$ . lo cual afirma que la amplitud de la onda electromagnética se atenúa con una relación de  $1/e$ ; a esta distancia se le conoce como penetración nominal de la onda electromagnética.

Por lo que la profundidad de penetración  $Z_d$  en un tiempo  $t$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$Z_d = \sqrt{\frac{2t}{\mu \sigma}} \dots\dots\dots (4.35)$$

La ecuación representa la penetración nominal del campo electromagnético.

Donde  $\sigma$  es la conductividad [ $\Omega m$ ],  $t$  es el tiempo de recorrido de la onda electromagnética [s], y  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío  $4\pi \times 10^{-7}$ .

Este concepto en geofísica de exploración es de gran importancia debido a que es necesario conocer parámetros electromagnéticos en función de la profundidad, para analizar a partir de ella los cambios de resistencia de un conductor, para conocer los contactos geológicos que se presentan en el subsuelo.

#### 4.2. Métodos electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos transitorios en el tiempo son técnicas geofísicas que se basan en principios físicos de inducción y detección del decaimiento del campo eléctrico secundario originado a partir del campo magnético inducido por la intensidad de un campo eléctrico primario dentro de los estratos geológicos, en

la cual la respuesta del medio (tierra) depende de la conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y la intensidad de la señal que se transmite.

#### 4.2.1. Generalidades del TEM

El principio físico que rige al sondeo transitorio electromagnético es a través de relajación o transición los cuales se llevan a cabo en la superficie del terreno, cuando en este se elimina o anula un campo artificial inducido.

La metodología que se realiza para la adquisición de los datos de campo, es la de medir la amplitud de una señal transmitida con respecto del tiempo. Consiste en hacer circular una corriente constante sobre la superficie del terreno, generada por una bobina, la cual se considera como la unidad transmisora durante un tiempo determinado; ésta a su vez genera un campo magnético primario para después cortarse abruptamente, por lo que este corte repentino de la corriente ocasiona la interrupción del campo magnético primario lo que satisface la Ley de Faraday, la inducción electromagnética de corrientes eléctricas en el subsuelo.

Figura 4.1

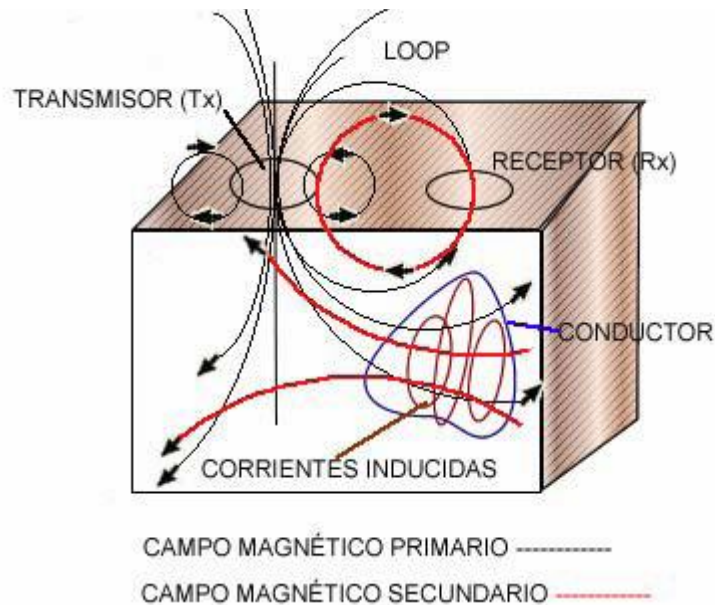


Figura 4.1. Fenómeno de inducción en el sondeo transitorio.

Las corrientes eléctricas que se encuentran en el subsuelo fluyen en trayectorias cerradas y se conocen como corriente de Eddie, las cuales migran a profundidad y lateralmente, cuya intensidad disminuye al pasar el tiempo, la cual produce un campo magnético secundario transitorio. Este campo secundario produce un voltaje variable en el receptor, donde la forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la resistividad en el subsuelo; esto debido a que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas dependen de la resistividad

que presente el subsuelo. La forma de las corrientes de migrar a profundidad se utiliza como control de profundidad lo que significa que cuando se tienen voltajes de tiempos cortos estos dan información de las resistividades someras, mientras que los tiempos largos dan información de resistividades en zonas profunda.

Figura 4.2.

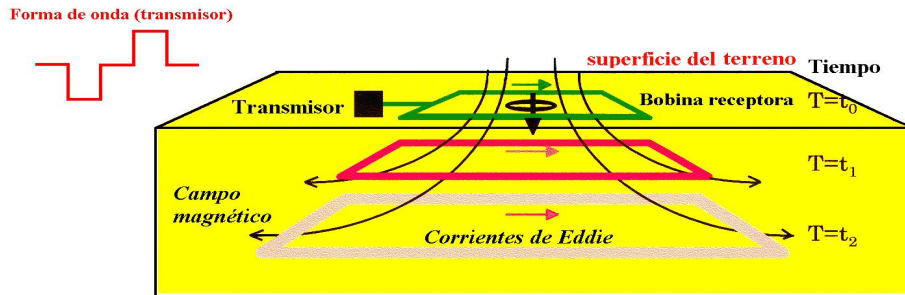


Figura 4.2. Generación del campo magnético y las corrientes de Eddy.

Al ejecutar la metodología sobre la superficie del terreno, como se menciona en párrafos anteriores, la señal que se emite sobre el terreno es de tipo escalón; consiste en la circulación de una corriente constante durante un tiempo determinado y la cual se corta abruptamente; donde se aplica posteriormente un tiempo de espera equivalente al utilizado al envío de la corriente, lo que genera una señal tipo rampa en los extremos, para que tiempo después se vuelva a introducir la misma corriente solo que con una polaridad invertida; esto forma la señal de tipo escalón, haciendo sencillo su manejo, Figura 4.3.

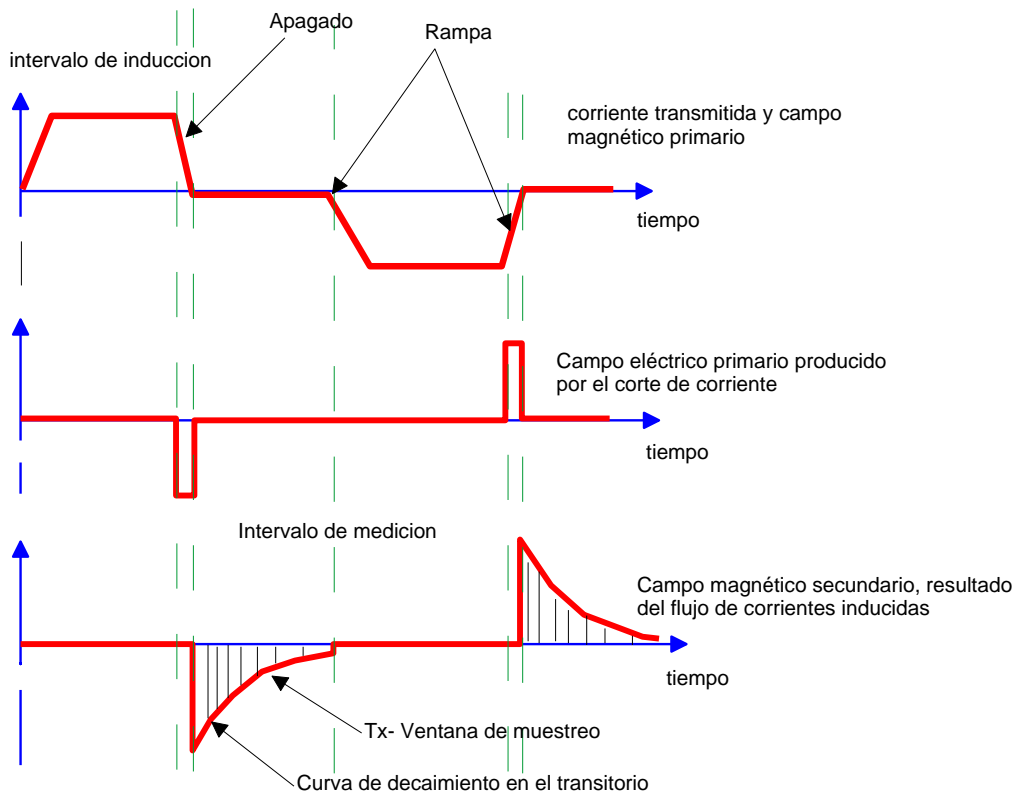


Figura 4.3. Forma de la corriente inyectada en la bobina transmisora.



### 4.2.2. Respuesta transitoria del campo electromagnético de un dipolo magnético vertical

La generación de la respuesta transitoria de un campo electromagnético, es a través de un dipolo magnético vertical (dispositivo físico Bobina), cuyas ecuaciones de campo eléctrico y magnético en coordenadas cilíndricas (Orellana 1973) con su origen en el centro de la bobina y un plano  $z=0$  que coincide con la superficie para la zona próxima son:

$$E_{\phi}(\omega) = -\frac{\rho m}{2\pi r^4} [3 - (3 - 3i\gamma r - \gamma^2 r^2)e^{i\gamma R}] \dots\dots\dots (4.36)$$

$$B_z(\omega) = -\frac{i\rho m}{2\pi r^5 \omega} [9 - (9 - 9i\gamma r - 4\gamma^2 + i\gamma^3 r^3)e^{i\gamma R}] \dots\dots\dots (4.37)$$

Donde  $\gamma$  es la constante de propagación y está descrita por  $\gamma = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ ; para realizar la transformación al dominio del tiempo se usa la transformada inversa de Fourier.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \dots\dots\dots (4.38)$$

Una forma simple de representar el impulso de una corriente se hace mediante un impulso en escalón H, en la cual se emplea la transformada inversa que resulta.

$$H(\omega) = -\frac{H_0}{i\omega} \dots\dots\dots (4.39)$$

Finalmente, la representación del campo eléctrico y el campo magnético para un dipolo magnético vertical en el dominio del tiempo para un impulso escalón son.

Si  $\tau = (2\pi t * 10^7 * \rho)^{1/2}$  y  $u = 2\pi R / \tau$  entonces

$$E_{\phi}(t) = -\frac{\rho m}{2\pi r^4} \left[ 3\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} (u^3 + 3u) \right] \dots\dots\dots (4.40)$$

$$B_z(t) = -\frac{\rho m}{2\pi r^5} \left[ 9\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} (u^5 + 3u^3 + 9u) \right] \dots\dots\dots (4.41)$$

En donde  $E_{\phi}$  es el campo eléctrico inducido,  $B_z$  a la componente vertical del campo magnético, m el momento bipolar y  $\tau$  el parámetro transitorio.

Estas expresiones matemáticas son válidas para el método electromagnético en el dominio del tiempo (TEM), analizándolo para tiempos grandes, esto indica que la toma de las lecturas se efectúa en frecuencias bajas, para la obtención del modelo geoelectrico del subsuelo la cual está representada por longitudes de onda mayores (Orellana, 1973).



Al observar que la componente vertical del campo magnético medido decae con la distancia  $r$  más rápidamente, se puede considerar que para este intervalo de tiempo, el campo transitorio es semejante a una onda plana no uniforme que penetra hacia abajo en un medio conductor.

### 4.2.3. Parámetro físico de interpretación en el TEM

La variable de interpretación en los TEM, con fines prácticos, es la denominada resistividad transitoria  $\rho_t$  la cual depende de la geometría de los arreglos con los que se genera el dipolo magnético, cuyo dispositivo más utilizado en campo es el de un loop coincidente, cuya representación analítica se calcula a partir de la derivada del campo magnético a través de la expresión matemática

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{m\theta^3}{\pi^{3/2}t} e^{-\theta^2 r^2} \left[ \theta^2 r^2 \left( \frac{x^2}{r^2} u_x + \frac{xy}{r^2} u_y + \frac{xz}{r^2} u_z \right) + (1 - \theta^2 r^2) u_x \right] \dots\dots\dots(4.42)$$

Por lo que esta derivada cuyo punto de observación del dipolo vertical esta sobre el eje  $x$ , las componentes que se analizan están con respecto de  $r$  y  $\theta$ .

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{m\theta^3}{\pi^{3/2}t} e^{-\theta^2 r^2} [(1 - \theta^2 r^2) u_x] \dots\dots\dots (4.43)$$

Tomando a  $r=0$  y derivando con respecto de  $\theta$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{m\theta^3}{\pi^{3/2}t} \left( \frac{\mu^{3/2} \sigma^{3/2}}{4^{3/2} t^{3/2}} \right) = \frac{m\mu^{3/2} \sigma^{3/2}}{4^{3/2} \pi^{3/2} t^{5/2}} \dots\dots\dots (4.44)$$

Despejando la variable  $\sigma$  de la expresión (4.44), tenemos:

$$\sigma^{3/2} = \frac{4^{3/2} \pi^{3/2} t^{5/2}}{m \mu^{3/2}} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (4.45)$$

Obteniendo la derivada parcial del campo magnético con respecto del tiempo

$$\left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)^{2/3} = - \frac{V^{2/3}}{\mu_0^{2/3} n A^{2/3}} \dots\dots\dots (4.46)$$

Sustituyendo en la ecuación (4.45) y tomado en consideración el momento dipolar  $M=IA$

$$\sigma = - \frac{4 \pi t^{5/3}}{m^{2/3} n A^{4/3}} \left( \frac{V^{2/3}}{I^{2/3}} \right) \dots\dots\dots (4.47)$$



Obteniendo el recíproco de la conductividad se obtiene la resistividad.

$$\frac{1}{\sigma} = \rho = - \frac{\mu^{4/3} n}{4\pi} A^{4/3} t^{-5/3} \left( \frac{V^{-2/3}}{I^{-2/3}} \right) \dots\dots\dots (4.48)$$

Donde  $-\frac{\mu^{4/3} n}{4\pi} = B$  Esta constante representa la deriva instrumental del equipo de medición, por lo tanto la ecuación de resistividad aparente del loop coincidente es la siguiente:

$$\rho = B * A^{4/3} t^{-5/3} \left( \frac{V^{-2/3}}{I^{-2/3}} \right) \dots\dots\dots (4.49)$$

#### 4.2.4. Interpretación del TEM

Como se mencionó en párrafos anteriores el TEM, se presenta a través de la relajación o transición de corriente inyectada sobre la superficie del terreno, la cual después de un cierto tiempo se interrumpe repentinamente, esto provoca el fenómeno de inducción en el subsuelo, cumpliéndose así la Ley de Faraday, cabe destacar que sobre el fenómeno de inducción sobresalen tres elementos de suma importancia que deben ser considerados en la interpretación de acuerdo a la respuesta transitoria del TEM, estos tres elementos son divididos por etapas, las cuales se clasifican en la etapa temprana, intermedia y tardía, las cuales son consideradas para la verificación de la respuesta del terreno.

Etapa temprana (*early stage*), de acuerdo con el fenómeno de inducción (Ley de Faraday) el cambio repentino del campo primario transmitido induce corrientes de Eddy en un conductor vecino, estas corrientes inducidas inicialmente serán confinadas solo en la superficie del conductor (corrientes superficiales). La magnitud y dirección de estas corrientes serán tales, que preserven la componente normal del campo magnético primario preexistente sobre la superficie del conductor.

$$b_n(t) \parallel t=0 = b_{n0} \text{ En S} \dots\dots\dots (4.50)$$

Donde  $b_{n0}$  representa la componente normal del campo magnético primario, lo que equivale que para un tiempo  $t=0$ , el campo magnético dentro del conductor no va a cambiar, en consecuencia, no existe flujo de corrientes inducidas en su interior. En cada punto del exterior del campo magnético va a cambiar abruptamente como una función escalón, a esto se le considera *early-time* o etapa temprana en el proceso transitorio electromagnético en el dominio del tiempo, en esta etapa la respuesta transitoria se considera constante en el tiempo.

Etapa intermedia (*intermediate stage*), la región que se encuentra inmediatamente dentro del conductor va a tener un decremento en el campo

magnético por lo que las corrientes inducidas empezarán a fluir a través del cuerpo conductor, repitiéndose sucesivamente en cada punto en el interior, por lo que la respuesta transitoria en esta etapa continuamente varía con el tiempo.

Etapa tardía (late stage), una vez concluido todo el proceso de inducción, la configuración de la distribución de las corrientes inducidas es invariante en el tiempo, por lo que su amplitud empieza a decaer, por lo que la respuesta transitoria se considera como una línea recta.

Estas etapas significan que la amplitud de la corriente fluye como una función del tiempo, la cual mide el decaimiento del campo magnético, a través de una bobina receptor obteniendo un voltaje en tiempos sucesivos y el flujo de corriente, y con ello la conductividad eléctrica del medio a distintas profundidades. **Figura 4.4.**

La razón de cambio de las corrientes y el campo magnético depende de la conductividad, el tamaño y la forma del conductor, para el tiempo inicial  $t=0$ , la distribución de las corrientes de superficie es independiente de la conductividad del cuerpo y solo es función del tamaño y de la forma del conductor.

La medición del voltaje varia conforme  $\sigma^{3/2}$ , el cual indica que es sensible a pequeñas variaciones de conductividad, durante la etapa tardía el voltaje medido decae a razón de  $t^{-5/2}$  para la cual la señal desaparece en un sistema de ruido y es imposible medirlo.

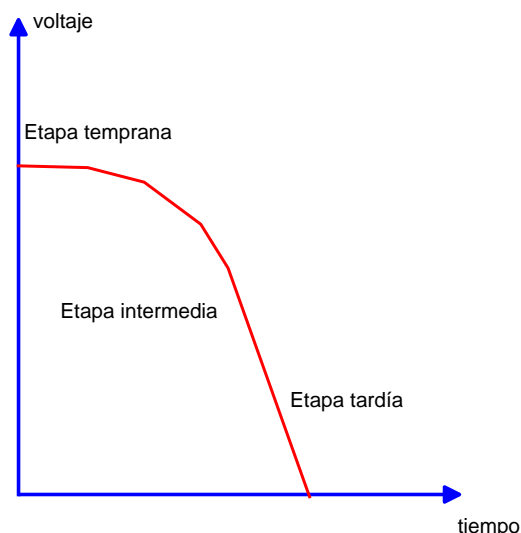


Figura 4.4. Señal del receptor (voltaje vs tiempo), por etapas. (Technical Notes 27, Geonics)

Al suponer que se trata de un semi espacio uniforme con resistividad  $\rho_1$  y que el comportamiento de la curva  $\rho_t$  contra el tiempo es el de la **figura 4.5**, se puede observar que el tiempo tardío la resistividad  $\rho_t$  es igual  $\rho_1$ , con el transcurso del tiempo  $\rho_t$  es mucho mayor que  $\rho_1$ , la razón radica en la definición de resistividad la cual está basada en el comportamiento del tiempo del voltaje el cual recibe un tiempo tardío cuando decae  $t^{-5/2}$  a un estado temprano e intermedio, en la **figura 4.5**, muestra que el voltaje recibido es muy bajo y la resistividad será muy alta, esto hace suponer que siempre existe un descenso en la etapa temprana que es donde la resistividad es mayor en el semi espacio.

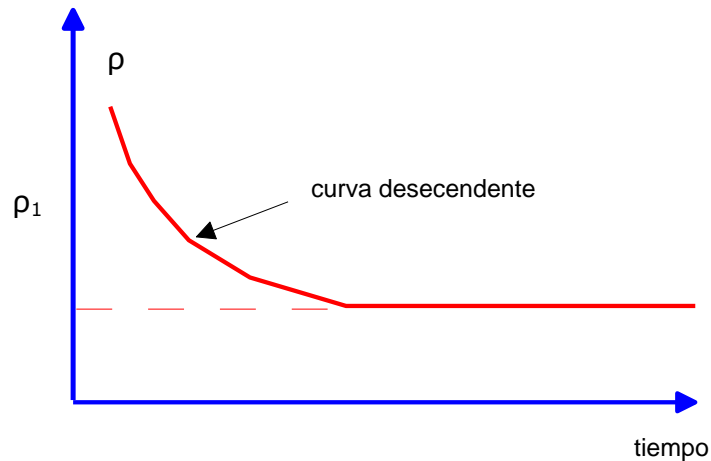


Figura 4.5. Resistividad. (Technical Notes, Geonics).

### 4.3. Arreglos geométricos del TEM

En la adquisición de los datos de campo se formulan a través de un dipolo magnético vertical, dicho dispositivo se genera a través de una bobina que geoméricamente puede tener una forma de elíptica, circular o cuadrada, a la cual se le aplica una corriente alterna con la que se genera el campo electromagnético, para esta aplicación es necesario conocer los tipos de arreglos que se utilizan para este método (TEM) de exploración electromagnética, **figura 4.6.**

Los arreglos dependen de la configuración de la bobina transmisora y receptora de los cuales los más comunes son de tipo rectangular y son los siguientes:

- a) **One-loop** en este arreglo se utiliza una bobina que sirve como transmisora y receptora donde la corriente fluye, esta actúa como receptora una vez que la corriente se corta los extremos de la bobina son conectados al receptor y la señal transmitida puede ser medida.
- b) **Loop coincidente** en este arreglo el transmisor y el receptor son bobinas distintas que coinciden en el tendido las cuales son conectadas al receptor y transmisor respectivamente.
- c) **In-loop** este arreglo es una variante del loop coincidente en el cual se utiliza un dipolo receptor localizado en el centro de la bobina transmisora.
- d) **Bobinas separadas** en este arreglo la bobina transmisora y la receptora están separadas una distancia fija.



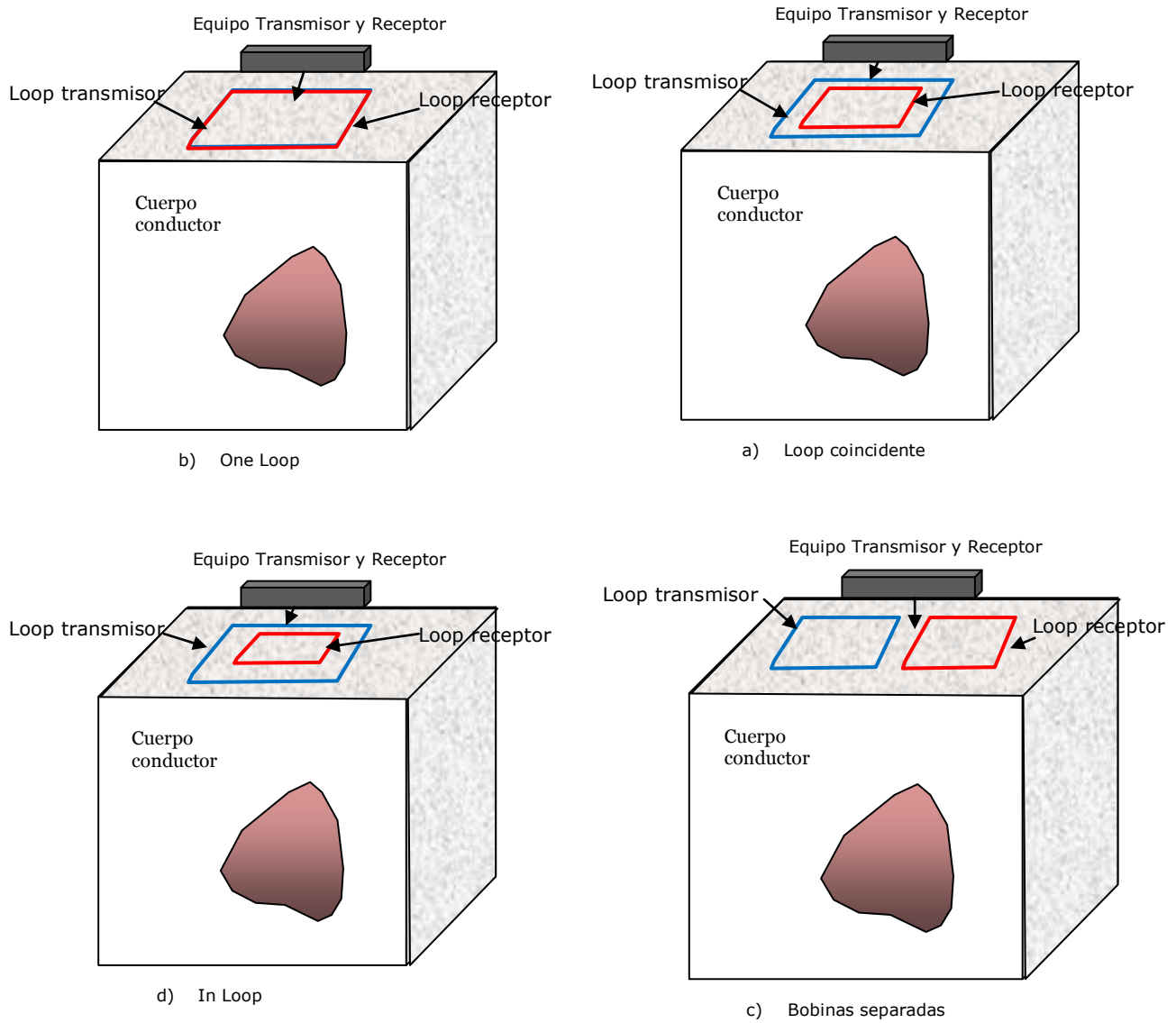


Figura 4.6. Configuraciones de TEM's. (Nabighian 1996).

# Capítulo V Exploración geofísica

## 5.1. Generalidades

Con el propósito de conocer las variaciones de resistividad que se presentan en el subsuelo se recopiló información de tres estudios de factibilidad hidrogeológica, donde se aplicó la técnica de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM).

Todos los TEMs se realizaron con el mismo equipo, ocho con bobinas de 300x300m (RO1, RO2, RO3, RO4, HA1, HA2, HA3 y HA4) y tres con bobinas de 200x200m (R4, R3 y R3), para investigar a una profundidad del orden de los 500 m. La localización de los sondeos se presenta en la **figura 5.1**.

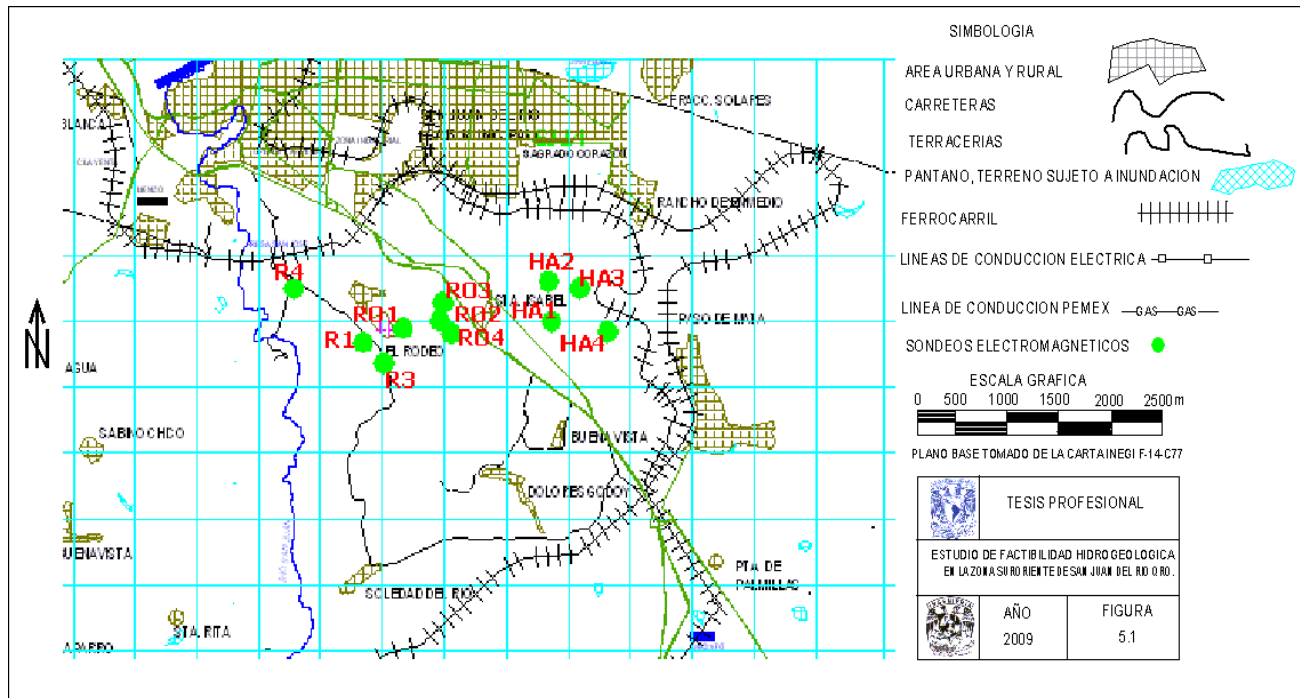


Figura 5.1. Localización de los TEM's en la zona de estudio.

## 5.2. Especificaciones del equipo

El equipo electromagnético que se utilizó para la adquisición de los datos de campo es de la marca TerraTem con las siguientes especificaciones:

- ☆ Tipo: Medidor de resistividad o conductividad eléctrica.
- ☆ Transmisor: 10 amperes.
- ☆ Receptor: 500Hz con 3 canales simultáneos verdaderos.
- ☆ Memoria interna: 1GB.
- ☆ Interfase externa: USB.
- ☆ Dimensiones: 51x35x16cm.
- ☆ Receptor/Transmisor modelo 1502.
- ☆ Registros mínimos 400 archivos completos.
- ☆ No. de ventanas medidas 55 en tres series de tiempo inicio y fin seleccionable.
- ☆ El rango de medición 50 microseg a 2 seg.
- ☆ Promedio de la señal 9,999 microseg de apilamiento (seleccionable).
- ☆ Retraso inicial 0-9999 microseg (seleccionable).
- ☆ Filtros 50/60 Hz y pasivo de cuatro polos anti-alias despliegues en campo valores de voltaje normalizado y la resistividad aparente (en texto o formato del gráfico).
- ☆ Cable flexanel (No. 10) de 110 hilos que funcionó como transmisor y receptor.

Durante la adquisición de los datos es posible visualizarlos, hacer interpretaciones gráficas y numéricas al momento de la medición. Su menú permite la transición entre los parámetros de la adquisición y la exhibición de datos. Puede diagnosticar la señal de entrada para determinar la calidad de la información y se pueden optimizar los parámetros según las condiciones del sitio.

Las baterías que tiene el equipo permiten operar continuamente por más de 6 horas; la información se almacena en una memoria física de 1 Gigabyte y cuenta con interfase USB para la descarga de datos.



Figura 5.2. Equipo Empleado

### 5.3. Procesamiento de información geofísica

Para cada TEM se propuso un modelo unidimensional, partiendo de la curva de resistividad aparente, la cual se obtiene en función del tiempo y se procesa en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones.

Esta situación la mayoría de las veces provoca que se tengan que ajustar o condicionar los valores tanto de resistividad o espesor de algunas capas con el objeto de calibrar la información, ya que a partir de este método se puede obtener un número infinito de resultados.

Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente fue aplicar una regresión tipo Occam con lo cual se obtuvo un modelo multicapas (10 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección, con lo cual se obtuvo un mapa de la distribución de resistividades verdaderas.

Este proceso posibilita al intérprete modificar los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas. Esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido, siempre y cuando se aplique el criterio geológico. Una vez que se obtuvo un ajuste aceptable, el modelo generado se somete a una regresión automática para obtener, una inversión, que ajuste mejor bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo.

Los modelos obtenidos, se sometieron a un nuevo proceso para obtener una serie de modelos equivalentes que cumplieran con el mismo error de ajuste. Estos modelos equivalentes logran establecer el intervalo de variación de los espesores y resistividades en cada capa del modelo original con fines de correlación electroestratigráfica. **Figura 5.3**

### 5.4. Interpretación de los TEMs

De acuerdo a la posición de los once sondeos electromagnéticos se construyeron tres secciones geoeléctricas, las cuales permiten definir la geometría del subsuelo. Los perfiles se muestran en la **figura 5.4**.

El procesamiento de la información se realizó con el software *Winglink*, los resultados se presentan en el **anexo 2**.

#### 5.4.1. Corte geoeléctrico 1

Perfil integrado por 6 TEMs con dirección preferencial es NE-SE y longitud de 6,000 m; se identifican 5 unidades geoeléctricas y se interpretó a una profundidad del orden de los 500 m.

La unidad A presenta valores de resistividad media a alta, su distribución es continua y con espesor variable. El mayor se identifica en el TEM HA1 y el menor en los TEMs R1 y R3. La unidad B se presenta en forma continua con baja resistividad y espesor variable. Los mayores espesores se identifican en los TEMs R1 y R3 y los menores en los TEMs RO4 y HA1. La unidad C presenta valores de resistividad media, es continua y con espesor variable, los mayores espesores se

encuentran en los TEMs R3 y RO4 y el menor en el TEM R4. La unidad D se presenta en forma continua con valores de resistividad baja y espesor variable, el mayor espesor se localiza en el TEM R1 y el menor en el TEM HA4. La unidad E, con valores de resistividad media y se presenta como última capa. **Figura 5.5.**

En la **Tabla 5.1** se describe el comportamiento de los valores de resistividad de las capas.

UNIDAD	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (ohm-m)	DESCRIPCIÓN
A	80-201	36 - 249	Unidad con resistividad y espesor variable, se presenta como capa superficial, el mayor espesor se encuentra debajo del sondeo HA1.
B	48-104	4 - 17	Unidad con resistividad baja, se presenta en forma continua en todo el perfil.
C	54-175	21-55	Unidad con resistividad media, se presenta en forma continua, con espesor variable a diferente profundidad.
D	77-150	4 - 11	Unidad con resistividad muy baja, se presenta de forma continua en todos los sondeos.
E	Última capa	10-33	Unidad de resistividad baja a media, se presenta como última capa.

Tabla 5.1. Descripción de las unidades geoelectricas del perfil1.

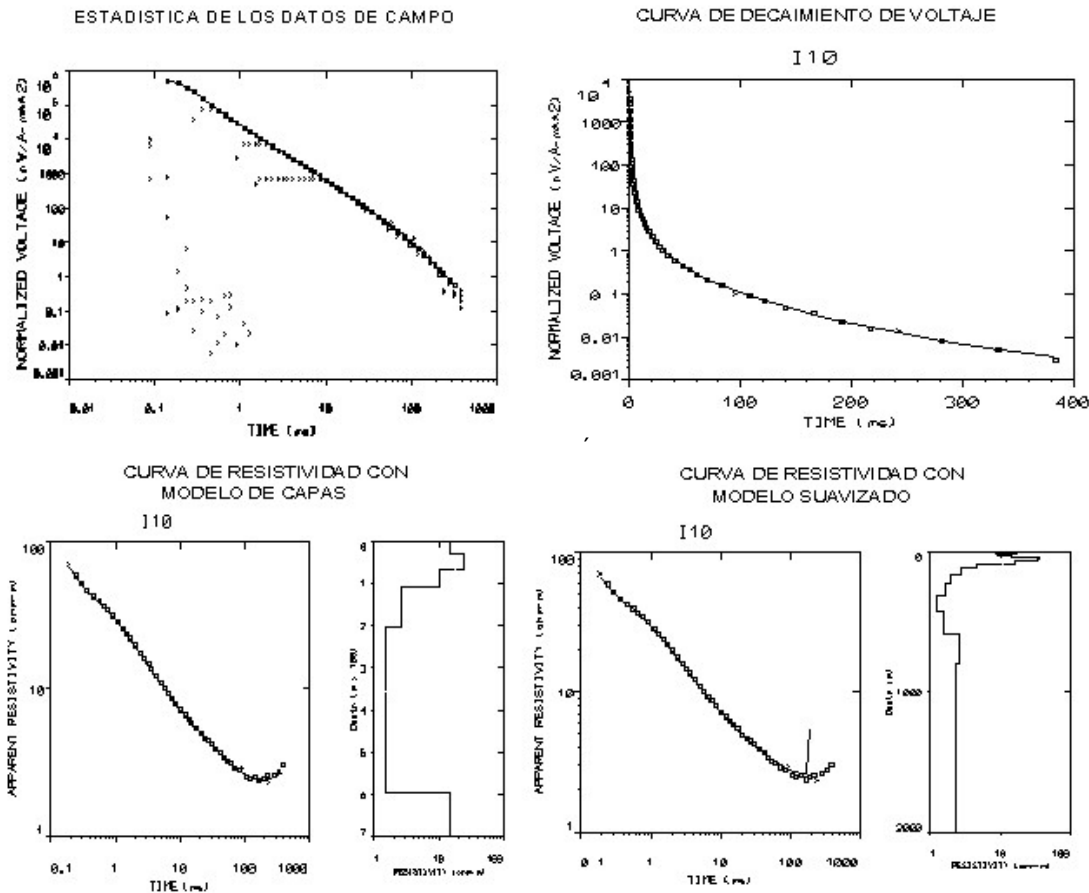


Figura 5.3. Procedimiento para el procesamiento de los datos geofisicos.

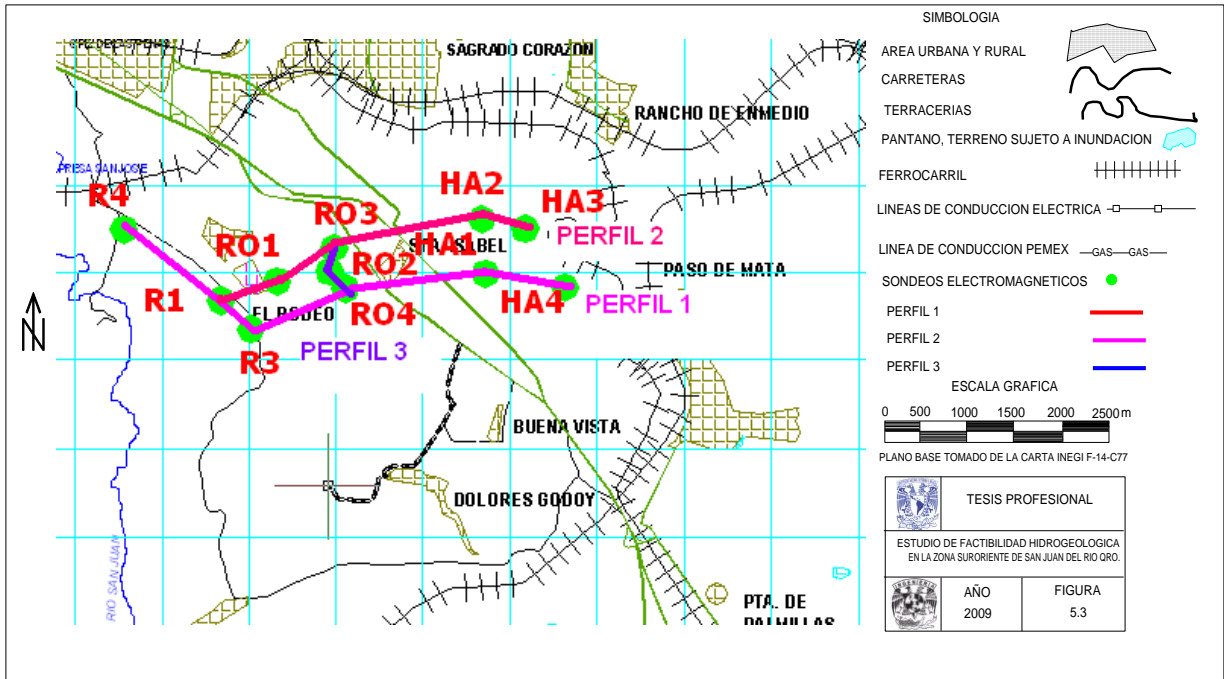


Figura 5.4. Localización de los perfiles geoelectricos.

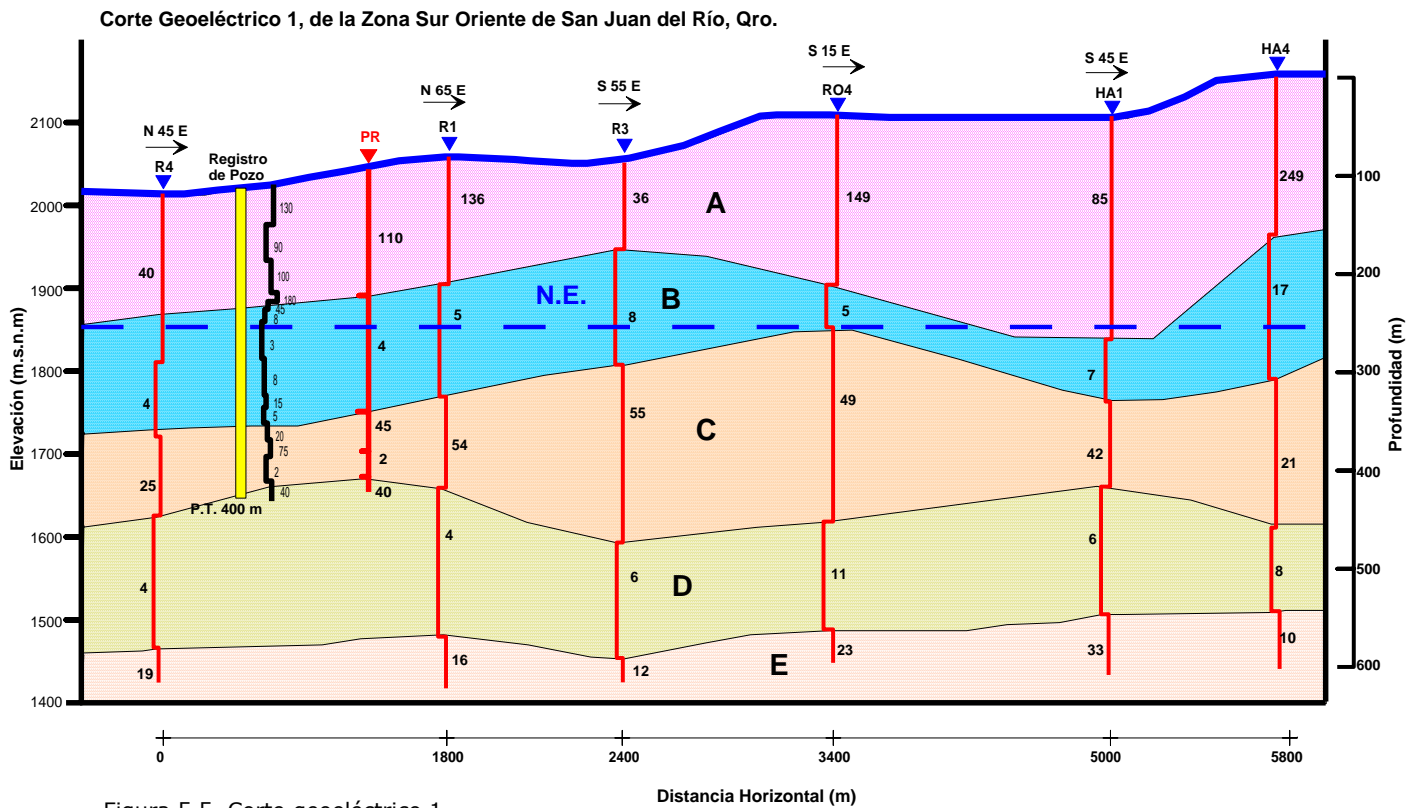


Figura 5.5. Corte geoelectrico 1.



### 5.4.2. Corte geoelectrico 2

Perfil integrado por 5 TEMs con dirección preferencial es NE-SE y una longitud de 4,000 m; se interpretaron 5 unidades geoelectricas a una profundidad del orden de los 500 m.

La unidad A tiene valores de resistividad altos, se presenta en forma continua y con espesor variable, el mayor se encuentra en el TEM HA2 y HA3, el menor en el TEM R1. La unidad B con valores muy bajos de resistividad, se presenta en forma continua y con espesor variable, el mayor en los TEMs R1 y R03 y el menor en el TEM HA3. La unidad C tiene valores de resistividad media, es continua en todo el perfil y su mayor espesor se observa en el TEM R03. La unidad D tiene valores de resistividad baja, se presenta en forma continua y con espesor variable, el mayor espesor se presenta en el TEM HA3 y el menor en el TEM R01. La unidad E se presenta como última capa. **Figura 5.6.**

En la **Tabla 5.2** se describe el comportamiento de los valores de resistividad de las capas.

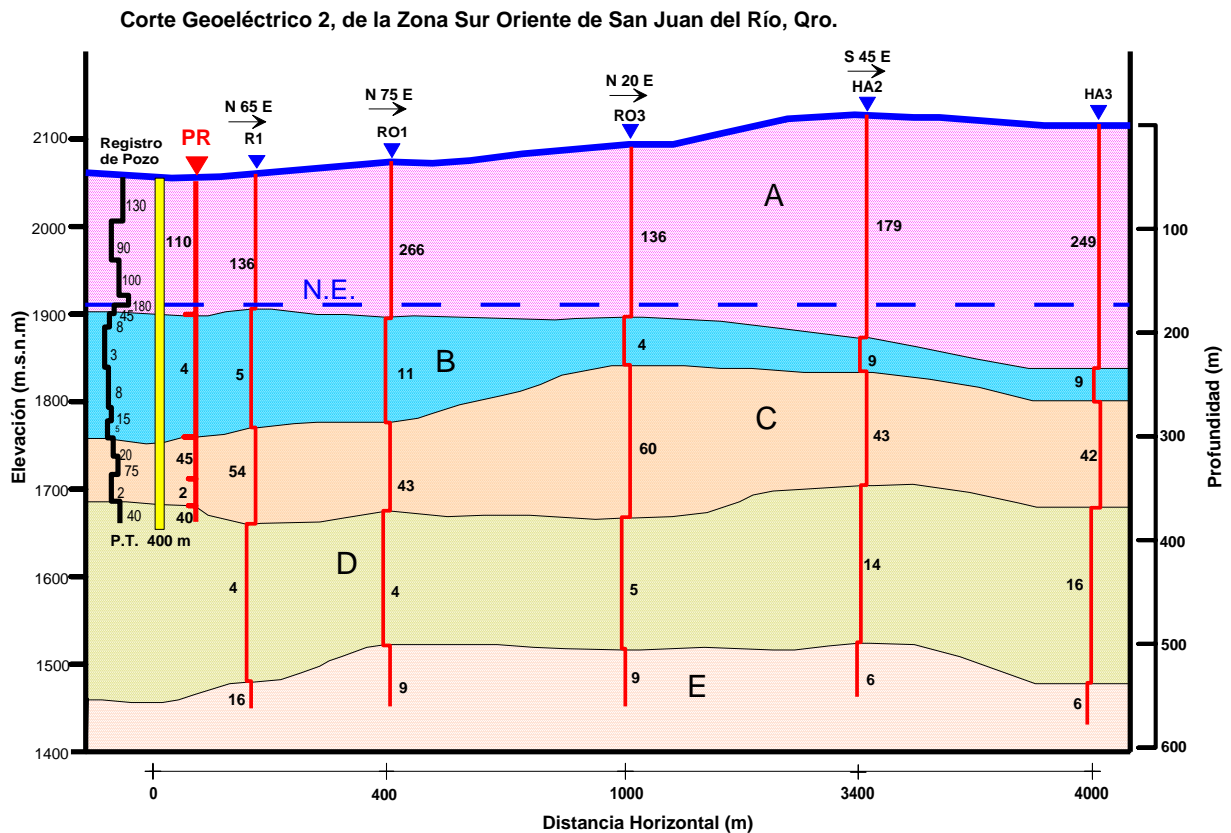


Figura 5.6. Corte geoelectrico 2

UNIDAD	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (ohm-m)	DESCRIPCION
A	150-273	136-266	Unidad con resistividad variable, se presenta como capa superficial con espesor variable.
B	39-141	4-11	Unidad con resistividad muy baja, se presenta en forma continua en el perfil, con espesor variable.
C	103-172	42-60	Unidad con resistividad media, se presenta en forma continua.
D	149-195	4-16	Unidad con resistividad baja, se presenta en forma continua, con espesor variable.
E	Última capa	6-16	Unidad de resistividad variable, se presenta como última capa.

Tabla 5.2. Descripción de las unidades geoelectricas del perfil 2.

### 5.4.3. Corte geoelectrico 3

Perfil integrado por 3 TEMs con dirección preferencial es NW-SE y una longitud de 500 m; se interpretaron 5 unidades geoelectricas a una profundidad del orden de los 600 m.

La unidad A presenta valores de resistividad y espesor homogéneo. La unidad B con resistividades muy bajas, también se presenta con espesor homogéneo. La unidad C se presenta con resistividad media y con espesor variable, la mayor resistividad de esta unidad se identifica en la parte izquierda del perfil. La unidad D con resistividad muy baja se presenta en forma continua y con espesor variable, el mayor espesor se identifica en el TEM R02. La unidad E se presenta con resistividad variable y como última capa. **Figura 5.7.**

En la **Tabla 5.3** se describe el comportamiento de los valores de resistividad de las capas.

UNIDAD	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (ohm-m)	DESCRIPCION
A	189-214	136-149	Unidad con resistividad alta, se presenta como capa superficial con espesor homogéneo.
B	28-58	2-5	Unidad con resistividad baja, se presenta en forma continua en el perfil.
C	109-234	42-60	Unidad con resistividad media, se presenta en forma continua, con espesor variable.
D	126-243	5-11	Unidad con resistividad baja, se presenta en forma continua, con espesor variable.
E	Última capa	9-23	Unidad de resistividad variable, se presenta como última capa.

Tabla 5.3. Descripción de las unidades geoelectricas del perfil 3.

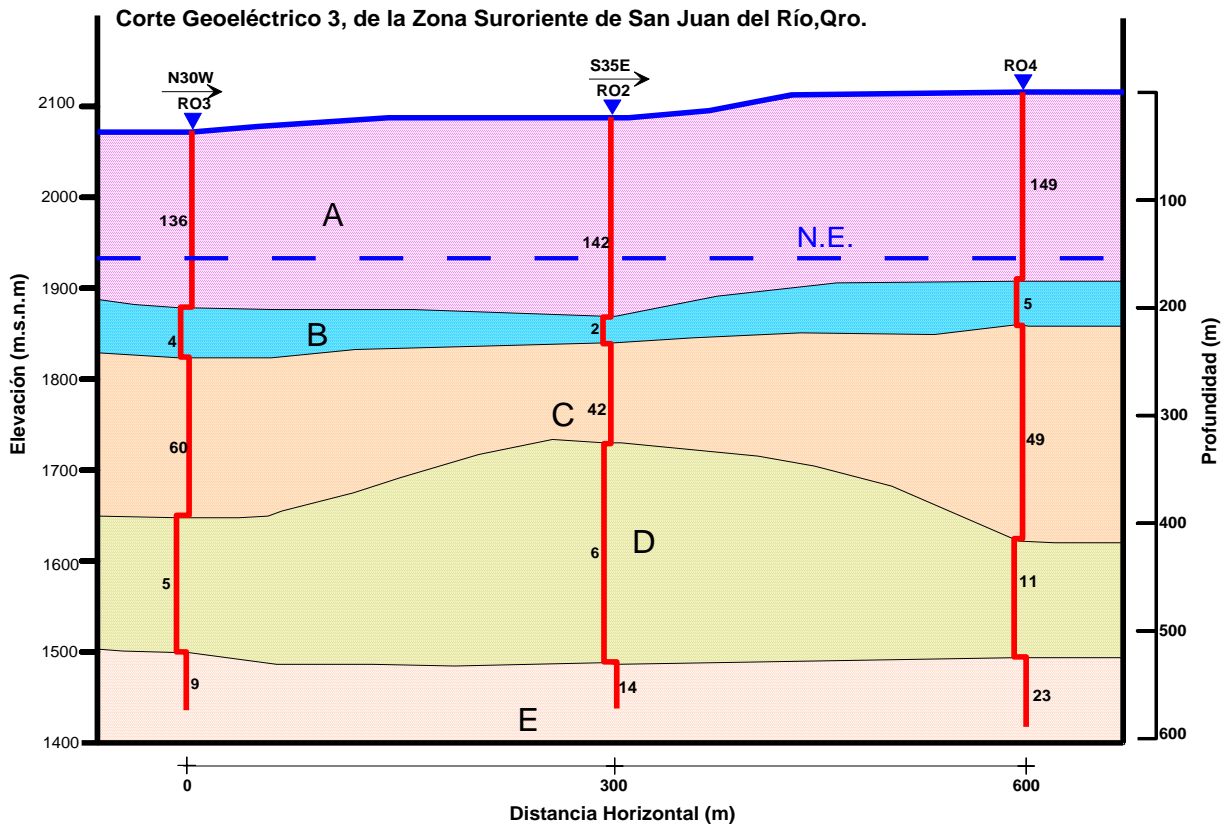


Figura 5.7. Corte geoelectrico 3.

## 5.6. Análisis de resultados

La interpolación de los espesores entre los sondeos manifiesta que las capas son paralelas a la superficie del terreno, en algunos puntos presentan mayor espesor. Dado que los sondeos se realizaron a diferente tamaño de bobina, la interpretación manifiesta valores de resistividad diferentes en (R1, R3 y R4), sin embargo, se identifican que los espesores de las unidades son congruentes.

Lo anterior llega a plantear la necesidad de aplicar, en un estudio en particular, siempre el mismo tamaño de bobina para obtener valores similares. En cuanto a este estudio, dado que se realizaron en diferente fecha el tamaño de las bobinas no fue consistente, situación que provocó tener tiempos diferentes de adquisición de datos. Por otra parte, el equipo no permite identificar el ruido ambiental, situación que provoca interpretar a una mayor profundidad. Sin embargo, la información del registro geofísico de pozo apoyó a la definición de las capas, así como su calibración, ya que al incrementar el tiempo de recepción e interpretar un mayor número de datos ocasionaba una interpretación errónea de las unidades que se tenía control litológico.

Por lo anterior, si se desea tener una buena interpretación, específicamente para la situación que compete al objetivo de este trabajo, es fundamental contar con un punto de calibración para identificar mejor los contrastes y asociarlos a las unidades geológicas correspondientes.



## Capítulo VI Correlación hidrogeológica –geofísica

Con base en la información obtenida de la zona de estudio, se hace una integración de la misma que correlaciona los eventos geológicos con la geofísica y la hidrogeología.

Como punto de partida se calibra la información del registro de pozo con las unidades geoelectricas y con las probables unidades litológicas, en la **tabla 6.1** y **figura 6.1**.

Espesor (m)	Unidad geológica	Registro geofísico (ohm-m)	Unidad geoelectrica	Resistividad (ohm-m)
150 m	Basalto	90-180	A	40-249
100 m	Material areno arcilloso	3-45	B	4-17
150 m	Ignimbrita satruarda	40-75	C	21-55
100 m	Ignimbrita alterada	No se presenta en el registro	D	4-11
100 m	Toba arenosa	No se presenta en el registro	E	10-33

Tabla 6.1. Integración de la información.

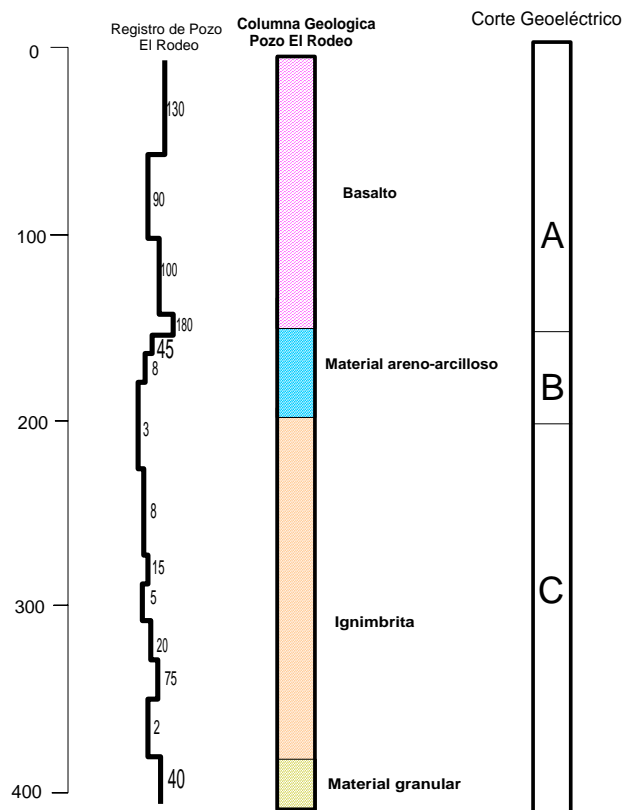


Figura 6.1 Correlación geológica-geofísica

Con el propósito de mostrar la distribución de las unidades litológicas que se presentan en la zona de estudio se elaboró una sección geológica esquemática, la cual presenta las siguientes características. **Figura 6.2**.



La sección geológica esquemática se fundamenta en la recopilación de información geológica superficial, así como de información de registro geofísico de pozo, el corte litológico del pozo y exploración geofísica mediante métodos electromagnéticos. Las unidades D y E no se identifican en el corte litológico del pozo ya que se encuentran a mayor profundidad.

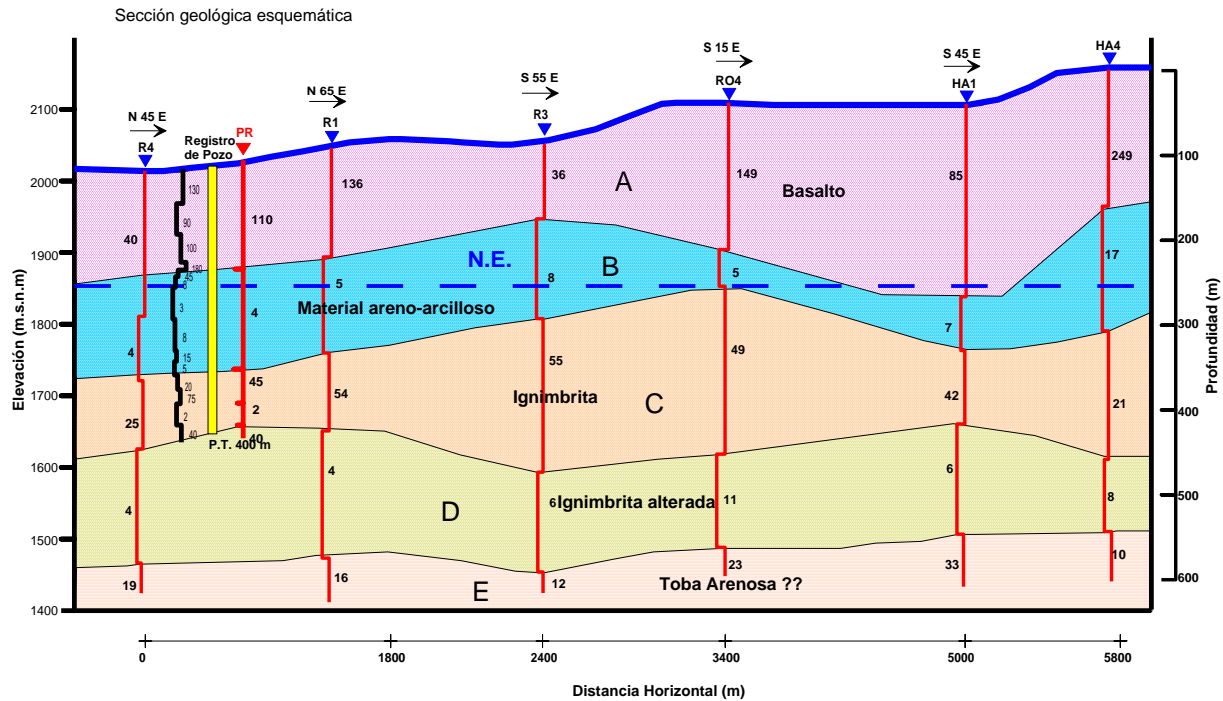


Figura 6.2. Sección geológica-geofísica esquemática.

La zona de aporte de agua, con base en el corte litológico se asocia a una ignimbrita, unidad geoelectrica C.

La unidad geoelectrica B, se asocia a material areno arcilloso; es de baja conductividad hidráulica. Los valores de resistividad de esta unidad son bajos. En el aforo (prueba de bombeo), el nivel se abatió hasta los 260 m y el gasto máximo de aporte fue de 20 lps.

La unidad A, asociada a basalto, por la posición actual del nivel estático se considera que está drenada y sólo funciona como medio de recarga al acuífero.

La unidad geoelectrica D, con valores de resistividad baja se asocia a una ignimbrita alterada, se estima que es de baja permeabilidad.

Por último, la unidad geoelectrica E, presenta una resistividad media y con posibilidades de aportar agua., con distribución continua y homogénea, por los valores de resistividad y a las muestras obtenidas en el pozo Cerro Gordo se asocian a un material granular y se comprueba la continuidad propuesta en la sección geológica esquemática de la figura 3.5

Con base en el análisis realizado, la unidad hidrogeológica C tiene capacidad de aportar un caudal del orden de los 15 lps y se sugiere que se perfore en la zona hasta atravesar la unidad E, para conocer sus características hidráulicas.



## Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

De acuerdo con el análisis efectuado a través de la integración de la información en la zona de estudio se identifican cinco unidades geoelectricas con valores representativos.

La unidad hidrogeológica C es la que aporta el caudal en el pozo El Rodeo, tiene un espesor del orden de los 150 m, con resistividad media. El caudal mínimo esperado de esta unidad es de los 15 lps, suficientes para satisfacer las necesidades de una población de 5,000 habitantes.

Con base en la integración de la información geológica, hidrogeológica y geofísica, los sitios más favorables para la perforación de un pozo es donde se realizaron los sondeos R03 o R04 a una profundidad mínima de 600 m o hasta atravesar la unidad geoelectrica E.

La profundidad de perforación citada anteriormente es recomendada para garantizar la vida útil del pozo por los próximos 30 años, esto debido al alto crecimiento de la población en la zona sur oriente de San Juan del Río.

En el aspecto hidrogeológico la zona de estudio se encuentra en una zona de recarga para el acuífero de San Juan del Río, en la zona afloran basaltos fracturados y tobas, las cuales favorecen la recarga del acuífero, por lo que se debe considerar para la ubicación de futuras fuentes de abastecimiento debido a que la zona en estudio aporta flujo subterráneo al valle de San Juan del Río.

### 7.2 Recomendaciones

Uno de los propósitos de la geofísica aplicada es conocer la geometría del subsuelo a profundidad, por lo que en los últimos años en México se han introducido nuevas tecnologías como el sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM), cuya aplicación en el área hidrogeológica es de gran utilidad para determinar acuíferos a profundidades mayores a los 500 m; sin embargo, en el campo profesional existen paradigmas en cuanto a la profundidad de penetración del método por lo que se recomienda tomar en consideración la siguientes sugerencias:

- Establecer una distancia mínima entre cada sondeo de cuando menos 500 m cuando se utilicen bobinas de 300 x 300m.
- Si se requiere obtener una mayor profundidad de investigación con bobinas de 300x300 m, se debe introducir una mayor intensidad de corriente al terreno.
- Para la calibración debida de la deriva instrumental del aparato de medición, en la toma de datos, se debe tener una consistencia en la aplicación del número de ventanas por sondeo, así como un control detallado al momento de la interrupción de la corriente.
- Se debe considerar las posibles fuentes de ruido que son originadas por líneas de alta tensión, tuberías en el subsuelo y líneas de ferrocarril, para establecer el tipo de filtro a utilizar.





## Bibliografía

**Constable S.C., Parker R. L.,** "Occam's inversión: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetics sounding data", *Geophysics*, v. 52, N3, marzo 1987.

**GEOLINK, User's Manual Edition 4,** Geosystem srl, Milan Italia, 1994.

**TERRATEM, Operator's Manual. Types M, MM and MMS, V61.4.9.** Mineral Control Instruments Limited (ACN 007 954 627) Australia, 1993

**TEMIX S, Temixs V. 3.0, User's Manual, Transient Electromagnetic Data Interpretation Software,** Interpex Limited, Golden Co., 1983.

**Autocad 2006** Manual Edición 2008, básico para la generación de planos y figuras 3D.

**Comisión Estatal** de Aguas de Querétaro, 1992, Estudio geohidrológico integral de los valles de San Juan del Río, Tequisquiapan y Ezequiel Montes, para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos.

**Comisión Estatal** de Aguas de Querétaro 1996, Actualización geohidrológica del acuífero del Valle de San Juan del Río.

**JAPAM, 2003,** Actualización hidrogeológica y modelación matemática del acuífero de San Juan del Río, Qro.

**JAPAM, 2001,** Estudio de factibilidad hidrogeológica para ubicar una fuente de agua potable en la zona de El Rodeo, San Juan del Río, Qro.

**JAPAM, 2006,** Estudio geoelectrico para ubicar una fuente de agua potable en la zona de San Sebastián de las Barrancas. Qro.

**JAPAM, 2007,** Estudio geoelectrico para ubicar una fuente de agua potable en la zona de la ex hacienda San Javier, Qro.

**Determinación** de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de San Juan del Río, Qro. Comisión Nacional del Agua, 2002.

**Fitterman, D.V.,** and Stewart, M.T., 1986, Transient electromagnetic for groundwater, *GE*, 51, 995-1005

**Fitterman, D.V.,** 1987, Examples of transient sounding for groundwater exploration in sedimentary aquifers, *Groundwater*, 25, 685-692

**Frischknecht, F.C., and Raab, P.V.,** 1984, Time-domain electromagneticsoundings at the Nevada test site, Nevada, *GE*, 49, 981-992

**Flis, F.M., and Newman, A.G.,** 1989, Induced-polaritationeffects in the domain-time electromagnetic measurements, *GE*, 54, 514-522



**Flores, C., and Velasco N.,** 1998, A comparative analysis between transient electromagnetic soundings and resistivity soundings in the Tres Virgenes geothermal zone Mexico, GI, Vol 47, 3, 183-199

**Flores, L. C.,** La exactitud de del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios, GEOS, Vol 20, 2, 70-88

**GEONICS LIMITED,** 1993, Manual PROTEM 47

**Hayt, W JR.,** 1991, Teoría electromagnética, McGraw-Hill

**Kaufman, A.A., and Keller, G.V.,** 1983, Frequency and transient soundings, Elsevier

**Kafri, U., and Goldman, M.,** 2004, The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity, JAG, 57, 167-178

**Macnae, J.C., Lamontage Y.,** West G. F. 1984, Noise processing techniques for time domain EM systems, GE, 49, 934-948

**McNeill, J.D.,** 1994, Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding, Technical Note TN-27, 1-15

**Nabighian, M.N., and Macnae, J.C.,** 1991, Time domain electromagnetic prospecting methods, in EMAG, v.2, Applications, Part A, Nabighian (ed.), 427-479

**Newman, G.A., Hohmann, G.W., and Anderson, W.L.,** 1986, Transient electromagnetic response of a three- dimensional body in a layered earth, GE, 51, 1608-1627

**Orellana, S. E.,** 1982, Prospección geoelectrica en corriente continua, PARANINFO, 2DA E,

## Software

*OFFICE 2008*

*WINGLINK*

*TEMIX S*

*SURFER v8.0*

*AUTOCAD 2006*



## **Anexo (Interpretación de datos geofísicos)**

