



**UNIVERSIDAD NACIONAL**

**AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA-HIDROGEOLOGÍA DEL  
ACUÍFERO KÁRSTICO EN LA ZONA DE OCOZOCOAUTLA,  
CHIAPAS.”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A:**

**MARIANNA RAMÍREZ LAGUNAS**

**DIRECTOR DE TESIS: ING. ALBERTO ARIAS PAZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, 2015.**

# INDICE

<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>3</b>
1.1. Justificación. ....	3
1.2. Introducción. ....	3
1.3. Localización del acuífero.....	5
<b>Capítulo 2 . Fundamentos teóricos .....</b>	<b>9</b>
2.1. El medio kárstico. ....	9
2.2 Acuífero Ocozocoautla.....	11
2.2.1 Modelo hidrogeológico conceptual.....	16
2.3 Fundamentos de la teoría Electromagnética.....	18
2.3.1 Las ecuaciones de Maxwell. ....	18
2.3.2 Relaciones constitutivas .....	19
2.3.3 Ecuación de onda .....	20
2.3.4 Condiciones de frontera.....	22
2.3.5 Solución a la ecuación de onda.....	24
2.4 Principios del método TEM. ....	25
2.4.1 Resistividad aparente.....	27
2.5 Arreglos geométricos usados en el método TEM .....	28
<b>Capítulo 3. Geología e hidrogeología de la zona. ....</b>	<b>31</b>
3.1 Provincia fisiográfica. ....	31
3.2 Clima. ....	31
3.3. Geomorfología.....	34
3.4. Geología regional.....	35
3.5. Estratigrafía regional.....	35
3.6. Estratigrafía local.....	39
3.7. Tectónica del estado. ....	44
3.8. Geología estructural.....	47
3.8.1 Análisis estadístico de fracturas. ....	47
<b>CAPÍTULO 4. Exploración geofísica. ....</b>	<b>59</b>
4.1 Implementación en campo del método TEM. ....	59
4.1.2 Especificaciones de los equipo usados.....	59
4.1.3 Ubicación de los sondeos TEM. ....	62
4.1.4 Arreglo implementado en los sondeos TEM's.....	64
<b>Capitulo 5. Procesamiento de datos.....</b>	<b>65</b>
5.1. Procesamiento de datos electromagnéticos.....	65
<b>Capitulo 6. Análisis y resultados.....</b>	<b>68</b>
6.1 Perfiles geoelectricos.....	68
6.1.1 Perfil 1. ....	69

6.1.2 Perfil 2. ....	71
6.1.3 Perfil 3. ....	72
6.1.4. Perfil 4. ....	73
<b>Capitulo 7. Conclusiones.....</b>	<b>74</b>
<b>7.1. Recomendaciones. ....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>83</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>101</b>

# Capítulo 1 Introducción.

## 1.1. Justificación.

El constante crecimiento de la población, ha provocado que la distribución y abastecimiento de agua se vea modificado y en ocasiones, las ciudades y municipios, llegan a presentar una gran deficiencia de este recurso vital, tal es el caso del municipio de Ocozocoautla, que debido al número de habitantes y la cantidad de pozos de agua existentes, se ha visto en la necesidad de realizar estudios hidrogeológicos y geofísicos que sirvan para la perforación de nuevos pozos de agua para abastecer a su población y no afectar de sobre manera el sistema hidrogeológico de la zona, que pudiese conllevar al daño de áreas protegidas y turísticas aledañas al municipio.

Es importante el estudio de medios carbonatados fracturados, debido al comportamiento que presenta el flujo de agua subterráneamente, en ocasiones llega a formar ríos y/o manantiales subterráneos, que generan excelentes condiciones para la explotación de agua subterránea.

## 1.2. Introducción.

De acuerdo al Banco Mundial, en promedio, una persona necesita unos 20 litros de agua potable todos los días para satisfacer sus necesidades metabólicas, higiénicas y domésticas. Día con día, las necesidades del recurso hídrico van en

aumento debido al rápido crecimiento de las ciudades, es por este motivo que la exploración de aguas subterráneas ha adquirido más importancia.

Anualmente, México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera; el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que los acuíferos del país reciben 78.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable y se les extraen por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales 27.5 mil millones de metro cúbicos. Así, el balance subterráneo refleja en principio una gran disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, esta situación es engañosa ya que gran parte de los principales acuíferos del país se encuentran seriamente sobreexplotados (IMTA, 2009).

Los métodos de exploración geofísica, a partir de ciertos parámetros físicos del subsuelo ayudan a localizar las zonas donde existen condiciones para que una formación geológica se explote como acuífero. En particular, los métodos geoeléctricos se aplican usualmente para la exploración de agua subterránea como técnicas de reconocimiento y de detalle, en estos métodos se usan las propiedades eléctricas de las rocas, en particular la resistividad o conductividad. Estas técnicas nos brindan información sobre las características del acuífero, así como la profundidad aproximada a la cual se encuentra el nivel del agua subterránea.

Los medios kársticos son de gran importancia en aspectos relacionados con el medioambiente y la sociedad, pero principalmente, su interés radica en los aspectos hidrogeológicos ya que más del 25% de la población mundial se abastece de acuíferos asociados a un ambiente kárstico.

### **1.3. Localización del acuífero.**

El acuífero *Ocozocoautla*, con clave 0704 del SIGMAS (Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la CONAGUA), se localiza al noroeste del estado de Chiapas, abarca una superficie aproximada de 2,221 km<sup>2</sup>. Limita al norte con tres acuíferos: Costera de Coatzacoalcos, del estado de Veracruz; Huimanguillo del estado de Tabasco y Reforma; al este con el acuífero Tuxtla; al sureste con el acuífero Fraylesca y al oeste con el acuífero Cintalapa, estos últimos también del estado de Chiapas.

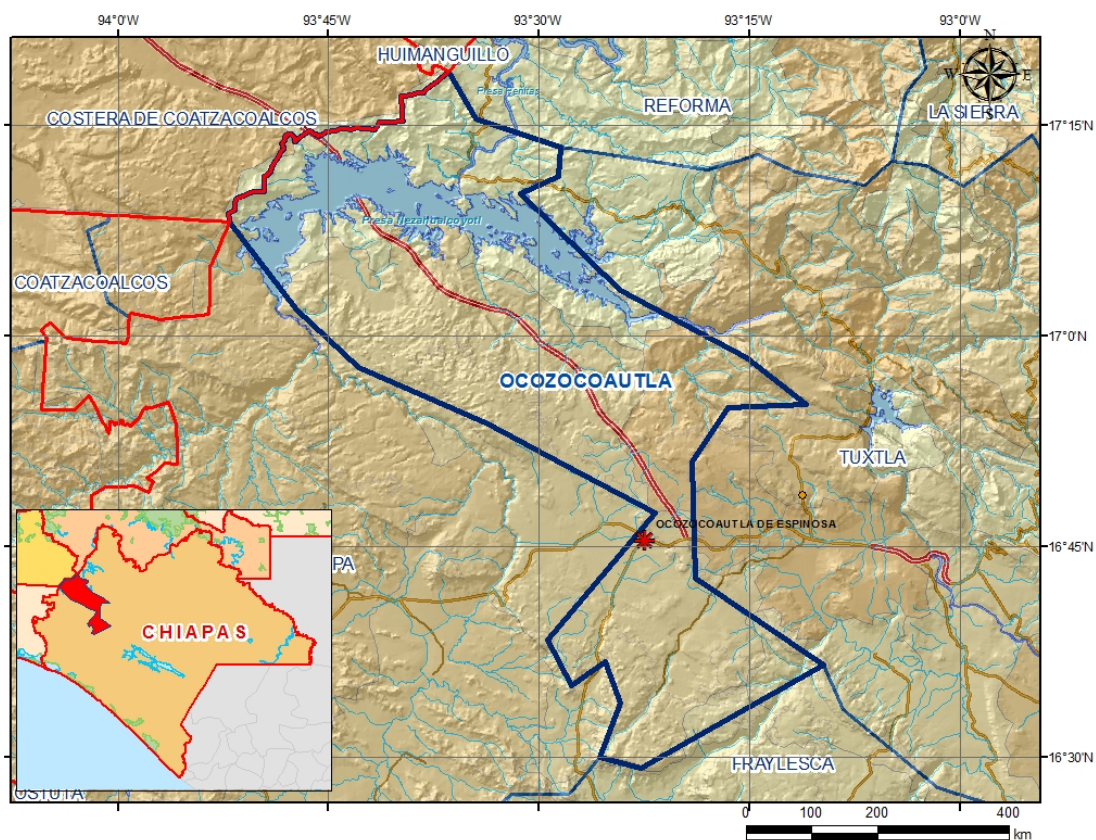


Fig. 1.1 Localización del acuífero Ocozocoautla.

De acuerdo con la división territorial en regiones hidrológicas establecida por la CONAGUA, el acuífero se localiza dentro de la denominada Región Hidrológica No. 30, Grijalva- Usumacinta, constituye una de las más importantes del país. Está ubicada hacia la zona que genéricamente se conoce como sureste y corresponde a la vertiente del Golfo de México.

Dicha Región se subdivide en tres subregiones, el acuífero Ocozocoautla se encuentra incluida dentro de la Subregión Alto Grijalva, 30-A.

La cuenca a la que pertenece el acuífero es la denominada Río Grijalva - Tuxtla Gutiérrez.

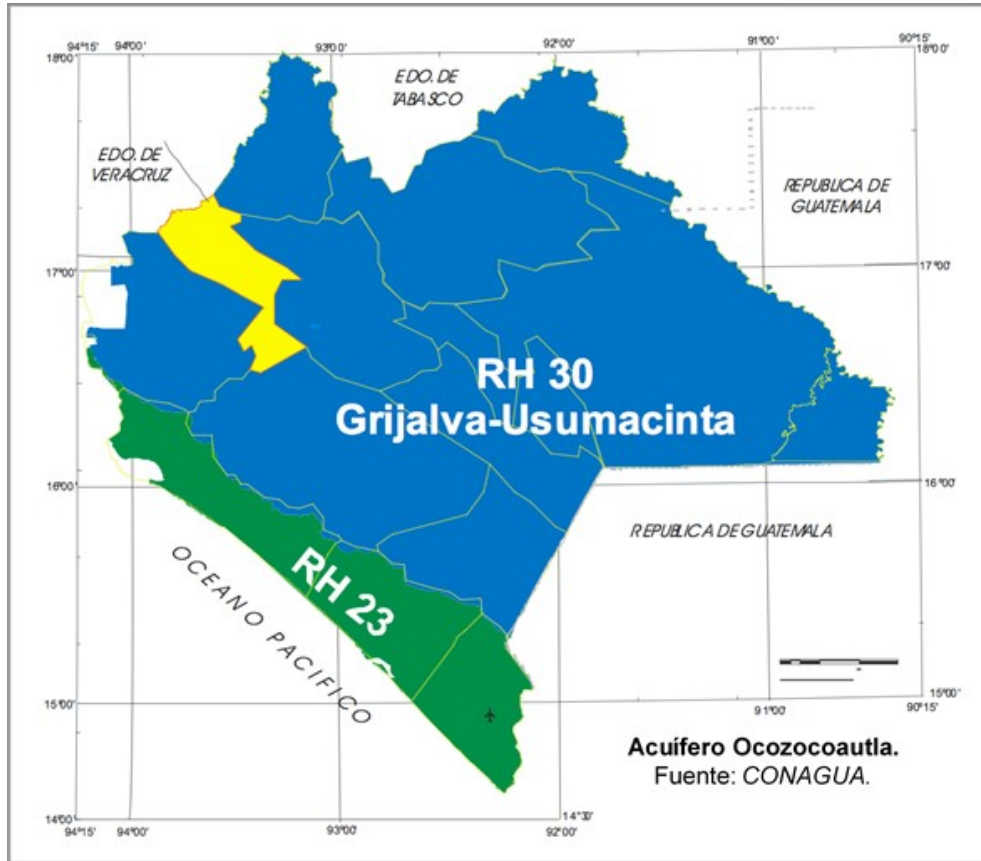


Fig. 1.2. Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta (CONAGUA, 2009).



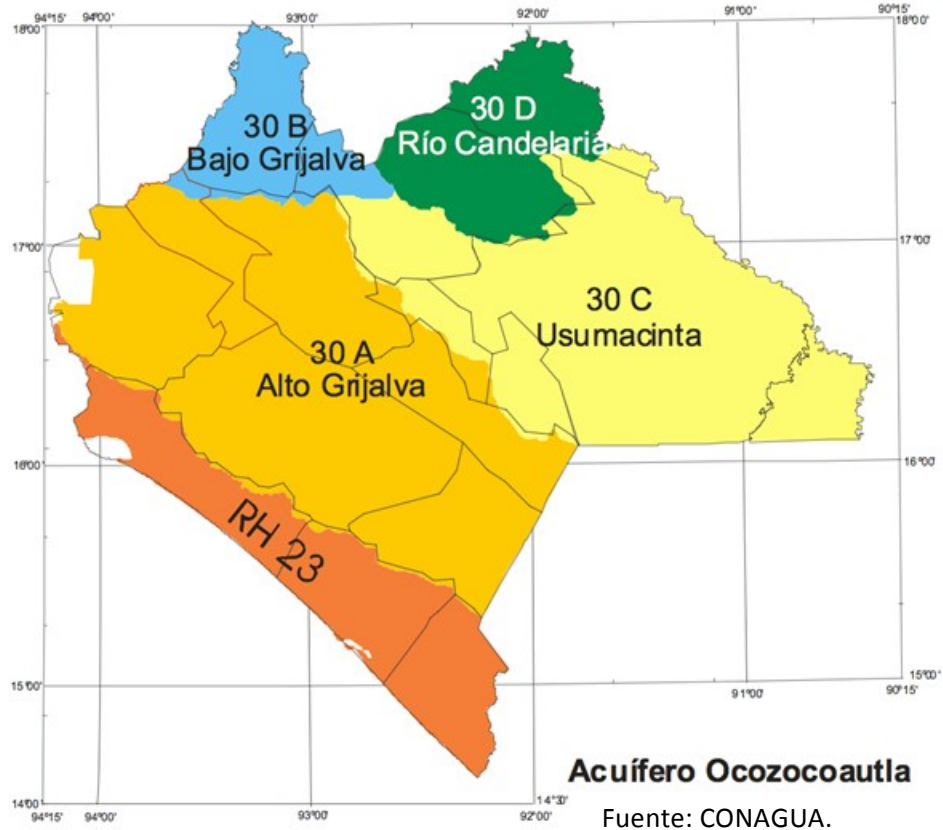
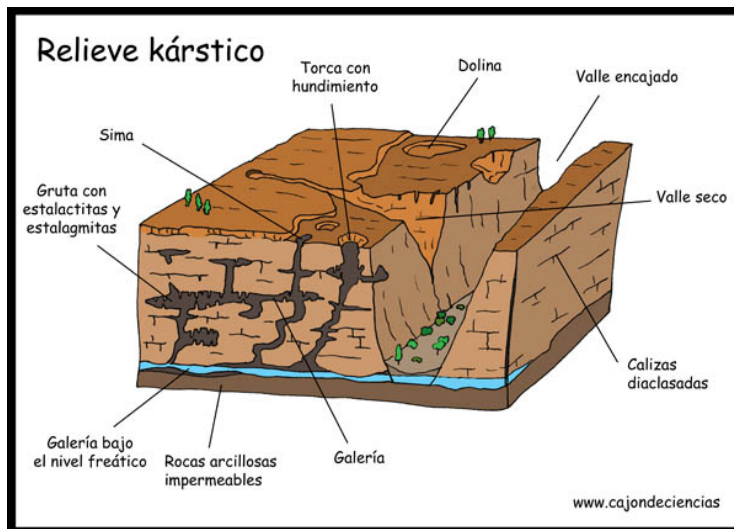


Fig. 1.3. División de la RH-30 en cuatro subregiones (CONAGUA, 2009).

La infraestructura carretera permite un buen enlace entre las principales poblaciones de la zona. Una de las vías de comunicación más importantes de la zona es la carretera federal No. 190 (Carretera Panamericana) la cual establece comunicación entre la capital estatal con el estado de Oaxaca. Además de la infraestructura carretera, existen numerosos caminos vecinales de terracería que comunican a los centros de población, aledaños a la cabecera municipal Ocozocoautla.

# Capítulo 2 . Fundamentos teóricos

## 2.1. El medio kárstico.



El nombre Karst proviene de “Carso” y “kras”, términos que eran usados para describir el paisaje típico de un área kárstica clásica, dicha área se ubica en los alrededores de las montañas Trieste y Dinaric en Eslovenia.

Fig. 2.1. Ilustración del relieve kárstico (www.cajondeciencias.com).

El karst en rocas carbonatadas se forma por su disolución mediante agua ácida. La mayor disolución tiene lugar cuando el agua de lluvia toma dióxido de carbono del aire y disminuye la materia orgánica en el suelo tornándose más ácido y luego percola a través de las grietas disolviendo la roca. Cuando el substrato se satura de agua, la disolución continúa cuando el agua se mueve hacia los lados a lo largo de los planos de estratificación (grietas horizontales entre estratos rocosos) y diaclasas (o fracturas) en la misma roca. Estos conductos se agrandan con el tiempo y el agua se mueve, por una combinación de gravedad y presión hidráulica, agrandando además los conductos por una combinación de disolución y abrasión de la roca circundante.

Los acuíferos kársticos tienen características originales y complejas que los hacen muy diferentes de otros acuíferos: alta heterogeneidad creada y organizada por el flujo de agua subterránea, espacios grandes, velocidades de flujo altas.

Esta heterogeneidad explica las dificultades que suelen aparecer en la explotación de estos acuíferos: pozos próximos entre sí pueden presentar rendimientos totalmente diferentes, según la posición que ocupen respecto a la estructura interna de drenaje.

Los acuíferos kársticos presentan características geomorfológicas tales como la existencia de sumideros, la ausencia de redes de drenaje superficiales y la presencia de redes de drenaje kársticas debido a la disolución de la roca.



**Fig. 2.2.** Sumidero localizado en la zona perteneciente al acuífero Ocozocoautla.

El karst es importante para la sociedad debido a su distribución global (20 millones de km<sup>2</sup>, casi el 12% de la superficie terrestre) y los recursos que posee. Un cuarto de la población mundial es abastecida por agua obtenida de acuíferos kársticos.

## 2.2 Acuífero Ocozocoautla

El acuífero Ocozocoautla se desarrolla geomorfológicamente sobre una planicie formada por rocas calcáreas de alta permeabilidad, cubiertas por una secuencia de materiales cuaternarios con espesores que apenas alcanzan unas decenas de metros, esta unidad se encuentran limitadas al norte, éste y sur por elevaciones topográficas y hacia el occidente por el río La Venta.

Hidrológicamente el acuífero presenta una reducida extensión tanto horizontal como vertical, por lo que se puede inferir que el acuífero de Ocozocoautla es de poca magnitud y bajo rendimiento.



**Fig.2.1.** Delimitación del acuífero Ocozocoautla (CONAGUA, 2009).

La recarga natural del acuífero es originada principalmente por infiltración de la lluvia y del escurrimiento superficial. Las áreas receptoras más importantes se localizan en las partes altas de las sierras, donde la precipitación pluvial es mayor y hay extensos afloramientos de rocas fracturadas, así como los flancos montañosos (pie de monte) donde predominan los materiales aluviales y coluviales de grano grueso.

La descarga natural del acuífero tiene lugar en varias formas: por evapotranspiración, a través de manantiales y, subterráneamente, hacia cuencas adyacentes.

Aunque existen algunos manantiales en las zonas aledañas a las sierras, los que existen en los macizos montañosos son de bajo caudal, por lo que se deduce que la mayor parte del agua infiltrada se percola a profundidad para incorporarse al acuífero regional, que la transmite hacia las áreas de descarga bajo el control de la gravedad y de la estructura geológica.

Las rocas calizas de la meseta forman un acuífero de buena permeabilidad el cual es evidenciado por los manantiales existentes en la barranca del Río La Venta, así como por pozos con buenos rendimientos ubicados en la porción sur, a lo largo de la carretera que comunica a Ocozocoautla de Espinosa con la Colonia Nuevo México. El resto de la meseta, conforme se acorta la distancia al Río La Venta, se



encuentra drenada por el mencionado río, el cual corre a varias decenas de metros por abajo del nivel de saturación de las calizas. Esta zona cuenta con buenas posibilidades de explotación de agua subterránea.

**Fig.2.3.** Entrada a una de las cavernas pertenecientes al acuífero Ocozocoautla.

Debido a las características geológicas que presenta esta región, el agua subterránea se encuentra en formaciones calcáreas de origen sedimentario y de edad Cretácica eminentemente permeables, por la presencia de áreas y conductos de disolución, que se manifiestan a través de dolinas y cavernas con una orientación general sureste-noroeste.

Las formaciones más antiguas y más recientes que subyacen y sobreyacen a esta formación acuífera se consideran de muy baja permeabilidad, por la presencia principalmente de lutitas y areniscas sin disolución, es decir no manifiestan porosidad.

La precipitación pluvial al caer sobre la superficie del terreno se infiltra casi inmediatamente, sin formar escurrimientos, aunque hacia la porción central se encuentran materiales aluviales constituidos principalmente por arenas y arcillas. Estos materiales se encuentran relleno algunas dolinas y presentar cuerpos que almacenan agua subterránea en menor cantidad que las formaciones calcáreas.

El movimiento del agua subterránea es preferentemente sureste-noroeste hacia el cauce principal del río La Venta, que lo drena parcial o totalmente y que constituye con este motivo el nivel base de drenaje del agua subterránea.



**Fig. 2.4.** Río La Venta (a unos metros de la cascada El Aguacero).



## 2.2.1 Modelo hidrogeológico conceptual.

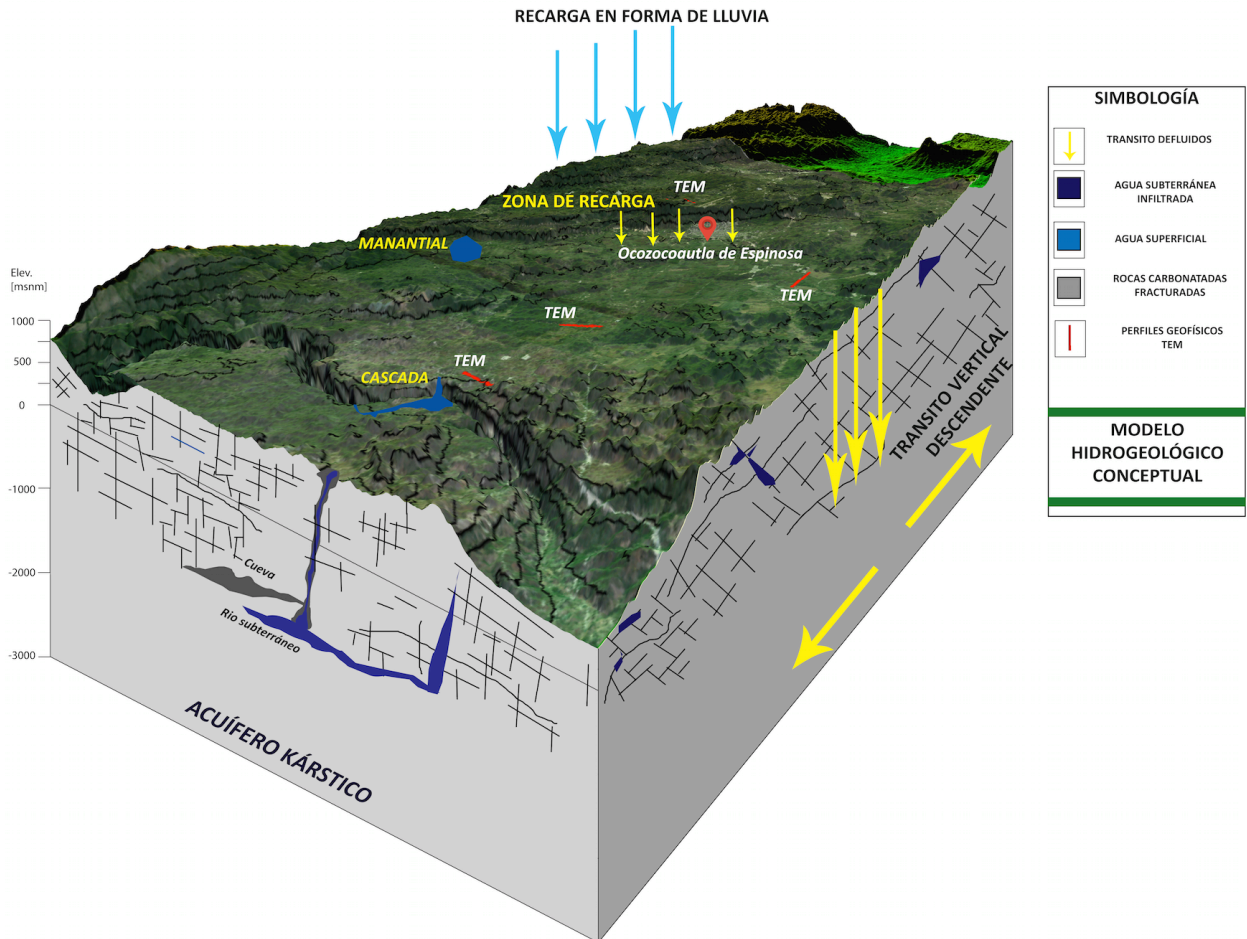


Fig. 2.5. Modelo hidrogeológico conceptual.

A diferencia de los acuíferos granulares, en los acuíferos carbonatados fracturados la recarga y descarga de aguas subterráneas se lleva a cabo de una manera errática, debido a que las rutas de migración del fluido coinciden por un lado, con la interestratificación de la roca y por el otro lado con el sistema de fracturamiento de origen tectónico.

La infiltración obedece a la posición de los sumideros que recolectan los volúmenes llovidos y son transportados por gravedad a diferentes niveles de estratificación, influenciados por los sistemas de fallas y fracturas.

Una particularidad en estos tipos de acuíferos es que los volúmenes recolectados en el subsuelo dependen de la densidad de fracturamiento y de la época o estación del año, ya que en el estiaje los volúmenes son sensiblemente menores a la época de lluvia.

Por lo anterior, la exploración de aguas subterráneas depende del grado de conocimiento geológico local, de la adecuada definición de los estudios geofísicos y del contexto climatológico, además de considerar que no existe un almacenamiento como tal en el acuífero fracturado debido a que la red de fracturas podría descargarse, literalmente, en el caso de agotarse la recarga, o de sobreexplotar dicho acuífero con pozos de extracción.

## 2.3 Fundamentos de la teoría Electromagnética.

Las leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo, tales como las leyes de Coulomb, Ampere, Biot y Savart, Gauss y Faraday, fueron resumidas por James Clerk Maxwell, relacionando los vectores de campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y magnético  $\mathbf{H}$  con las cargas eléctricas y las corrientes.

### 2.3.1 Las ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell son:

$$\text{Ley de Faraday} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{Ley de Ampere} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\text{Ley de Gauss (campo eléctrico)} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\text{Ley de Gauss (campo magnético)} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Donde:

$\vec{E}$  es el vector de intensidad de campo eléctrico [V/m].

$\vec{H}$  es el vector de intensidad de campo magnético [A/m].

$\vec{B}$  es el vector de inducción magnética [Wb/m<sup>2</sup>] o [Tesla].

$\vec{D}$  es el vector de desplazamiento [C/m<sup>2</sup>].

$\vec{j}$  es el vector de densidad de corriente eléctrica [A/m<sup>2</sup>].

$\rho$  es densidad de carga eléctrica.

### 2.3.2 Relaciones constitutivas

Mediante las ecuaciones de Maxwell podemos estudiar los fenómenos electromagnéticos en el dominio del tiempo empleando las relaciones constitutivas desarrolladas por Ward y Hohmann (1988).

$$D = \varepsilon(\omega, E, r, t, T, P) \cdot E \quad (2.5)$$

$$B = \mu(\omega, H, r, t, T, P) \cdot H \quad (2.6)$$

$$J = \sigma(\omega, E, r, t, T, P) \cdot E \quad (2.7)$$

Donde:

$\varepsilon$ : tensor de permitividad eléctrica [F/m].

$\mu$ : tensor de permeabilidad magnética [H/m].

$\sigma$ : tensor de conductividad eléctrica [S/m].

De acuerdo con (Ward y Hohmann, 1988), para simplificar el análisis de la mayoría de los problemas electromagnéticos debemos asumir que los medios son lineares,

isótropos, homogéneos, y que poseen propiedades eléctricas independientes del tiempo, temperatura y presión. Asumimos que la permeabilidad magnética es la del espacio libre  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$ .

Si aplicamos la Transformada de Fourier a la ecuación de la Ley de Faraday (2.1) y a la Ley de Ampere (2.2) respectivamente, usando las ecuaciones constitutivas (2.5), (2.6), y (2.7) obtenemos las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia (Ward y Hohmann, 1988).

$$\nabla \times \vec{E} + i\mu\omega \vec{H} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} - (\sigma + i\varepsilon)\vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

Si decimos que  $\hat{z} = i\mu\omega$  es la impedancia y la admitancia es  $\hat{y} = \sigma + i\varepsilon\omega$ , entonces:

$$\nabla \times \vec{E} + \hat{z}\vec{H} = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \hat{y}\vec{E} = 0 \quad (2.11)$$

### 2.3.3 Ecuación de onda

La propagación de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la Tierra puede ser descrita mediante una ecuación de onda que involucre a las ecuaciones de Maxwell. Entonces, de acuerdo con (Ward y Hohmann, 1988) aplicando el rotacional a las ecuaciones de la Ley de Faraday (2.1) y a la Ley de Ampere (2.2), obtenemos:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) + \nabla \times \left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) - \nabla \times \left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = \nabla \times \vec{j} \quad (2.13)$$

Las ecuaciones constitutivas en el dominio del tiempo, restringidas a medios no dispersivos donde  $\mu, \varepsilon, \sigma$  son independientes del tiempo, son:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.14)$$

$$\vec{B} = \vec{H} \mu \quad (2.15)$$

$$\vec{j} = \vec{E} \sigma \quad (2.16)$$

Sustituyendo en las ecuaciones (2.12) y (2.13):

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \nabla \times \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\mu \vec{H}) \right] = 0 \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} + \nabla \times \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \vec{E}) \right] = \nabla \times (\sigma \vec{E}) \quad (2.18)$$

Simplificando las dos ecuaciones anteriores:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu \nabla \times \left[ \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right] = 0 \quad (2.19)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E}) = \sigma \nabla \times \vec{E} \quad (2.20)$$

Queda:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \left( \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.22)$$

Aplicando la Transformada de Fourier:

$$\nabla^2 \vec{E} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\vec{E} = 0 \quad (2.23)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\vec{H} = 0 \quad (2.24)$$

El número de onda  $k$  se define como  $k^2 = \epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega$ . Las corrientes de desplazamiento son mucho más pequeñas que las corrientes de conducción en materiales del interior de la Tierra,  $\mu\epsilon\omega^2 \ll i\mu\sigma\omega$ , para frecuencias menores a  $10^5$  [Hz], entonces el número de onda se aproxima a  $k = (-i\mu\sigma\omega)^{1/2}$  (Ward y Hohmman, 1988).

En el dominio de la frecuencia:

$$\nabla^2 \vec{E} - i\mu\sigma\omega \vec{E} = 0 \quad (2.25)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\mu\sigma\omega \vec{H} = 0 \quad (2.26)$$

### 2.3.4 Condiciones de frontera.

Según (Ward y Hohmman, 1988) las condiciones de frontera para fenómenos electromagnéticos se derivan a través de las ecuaciones de Maxwell:

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

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (2.27)$$

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

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_n \quad (2.28)$$

- La componente tangencial del campo eléctrico  $E_t$ , es continua a través de la interfase:

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (2.29)$$

- La componente tangencial del campo magnético  $H_t$ , es continua a través de la interfase si no existen corrientes de superficie:

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (2.30)$$

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

$$J_{n1} = J_{n2} \quad (2.31)$$



### 2.3.5 Solución a la ecuación de onda

Existen dos soluciones para las ecuaciones de onda; sin embargo, en este trabajo solo se considerará la primera solución. Para dependencia sinusoidal en el tiempo  $e^{i\omega t}$  (Ward y Hohmman, 1988):

$$\vec{E} = E_0^+ e^{-1(kz-\omega t)} + E_0^- e^{i(kz-\omega t)} \quad (2.32)$$

$$\vec{H} = H_0^+ e^{-1(kz-\omega t)} + H_0^- e^{i(kz-\omega t)} \quad (2.33)$$

$k$  es un número complejo y se define como  $k = \alpha - i\beta$ . Las amplitudes de las ondas son  $E_0^\pm$  y  $H_0^\pm$ , el signo representa la dirección de propagación.

Considerando que las corrientes de conducción dominan sobre las corrientes de desplazamiento  $I_c \gg I_d$ , entonces  $\alpha, \beta$  se definen:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.34)$$

Sustituimos (2.34) en las ecuaciones (2.32) y (2.33), considerando que las ondas de propagación son en  $z^+$ :

$$\vec{E} = E_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.35)$$

$$\vec{H} = H_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.36)$$

A través de estas ecuaciones podemos concluir que como  $\beta$  es un número real,

$e^{-\beta z}$  disminuye conforme aumenta  $z$ . Es decir, la amplitud de la onda electromagnética en una distancia  $\delta$  se atenúa con una relación  $1/e$ . A la distancia  $\delta$  se le conoce como penetración nominal y se define como:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 503 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} \quad (2.37)$$

#### 2.4 Principios del método TEM.

El funcionamiento de este método consiste en una bobina que transmite una corriente a través de ella, generando un campo magnético primario. La corriente se interrumpe abruptamente transcurrido cierto tiempo, dicha interrupción de la corriente, de acuerdo con la Ley de Faraday, ocasionará la presencia de corrientes eléctricas inducidas.

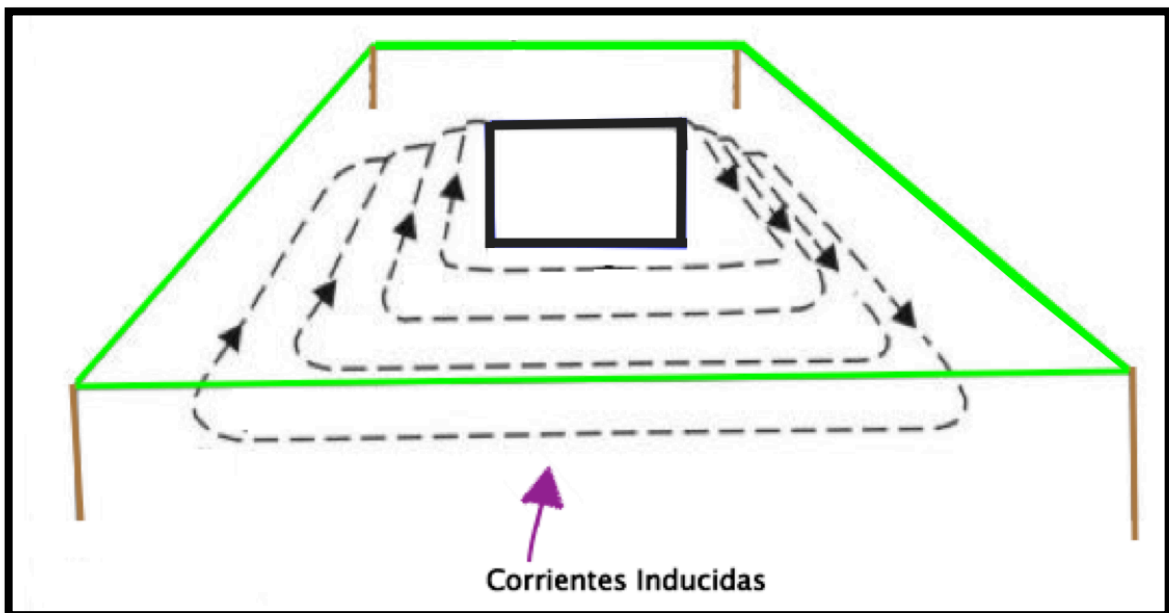


Fig. 2.5 Corrientes inducidas generadas. (Tomado y modificado de Wightman, et al, 2003)

La intensidad de las corrientes inducidas que migran a profundidad disminuye al paso del tiempo, produciendo un campo magnético secundario transitorio. A su vez, se producirá una variación de voltaje captada por la bobina receptora. La variación o decaimiento exponencial del voltaje, una vez procesados los datos, nos proporcionará información la distribución de la conductividad o resistividad del medio estudiado.

En medios poco conductores, los voltajes iniciales serán altos, pero el campo decaerá rápidamente (Nabighian, 1991). La función emitida por el transmisor es de tipo escalón, generada al hacer circular una corriente constante durante determinado tiempo, dicha corriente se corta abruptamente, teniendo un tiempo de espera de equivalente magnitud al usado al enviar la señal, esto genera una señal de tipo rampa en los extremos. Después se vuelve a transmitir la misma corriente pero con polaridad invertida, formando la señal tipo escalón.

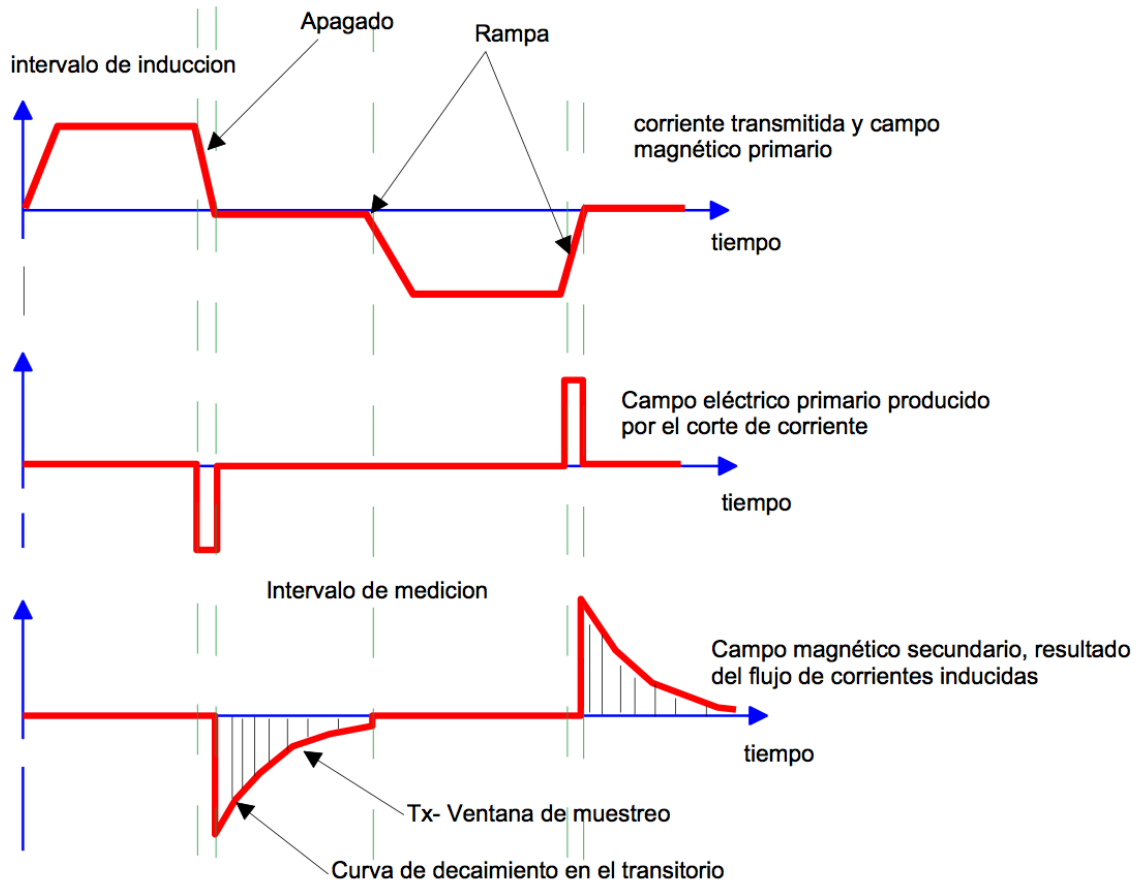


Fig. 2.6 Forma de la corriente inyectada. (Castillo, 2012).

### 2.4.1 Resistividad aparente.

En la práctica, medimos la resistividad aparente  $\rho_a$ , que varía de acuerdo al comportamiento de la variación del campo magnético. Se obtiene mediante la expresión del voltaje registrado en el receptor. Se puede definir, para tiempos cortos, el voltaje (Spies *et al.*, 1986):

$$V = 3mI/\sigma a^3 \quad (2.38)$$

$m$  es el producto del número de vueltas de la bobina receptora por su área.

Para tiempos largo:

$$V = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}} \quad (2.39)$$

La resistividad aparente  $\rho_a$ , queda definida como:

Para tiempos cortos ( $\rho_a$  aproximada a la resistividad verdadera en los estratos someros):

$$\rho_a = \frac{a^3V}{3mI} \quad (2.40)$$

Para tiempos largos ( $\rho_a$  aproximada a la resistividad verdadera en los estratos más profundos):

$$\rho_a = \frac{I^{2/3}a^{4/3}m^{2/3}\mu^{5/3}}{20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}V^{2/3}} \quad (2.41)$$

Si tratamos con una señal tipo escalón, es posible obtener una resistividad aparente válida para todos los tiempos (Christensen, 1995):

$$\rho_a = \frac{\mu a^2}{4t(\theta a)^2} \quad (2.42)$$

## 2.5 Arreglos geométricos usados en el método TEM

Los tipos arreglos descritos en este trabajo están en función de la configuración de la bobina transmisora y la bobina receptora, que tendrán forma rectangular.

- Loop simple

La configuración de este arreglo se utiliza una sola bobina que sirve tanto como transmisora como receptora, actuará como receptora una vez que la corriente se apaga. La bobina se conecta al receptor para poder medir la señal transitoria.

- Loop coincidente

Las bobinas transmisora y receptora son bobinas distintas que coinciden geoméricamente. Funciona de manera similar al loop simple.

- Loop central

Este arreglo es una variante del loop coincidente en el cual se utiliza un dipolo receptor localizado en el centro de la bobina transmisora.

- Loop doble

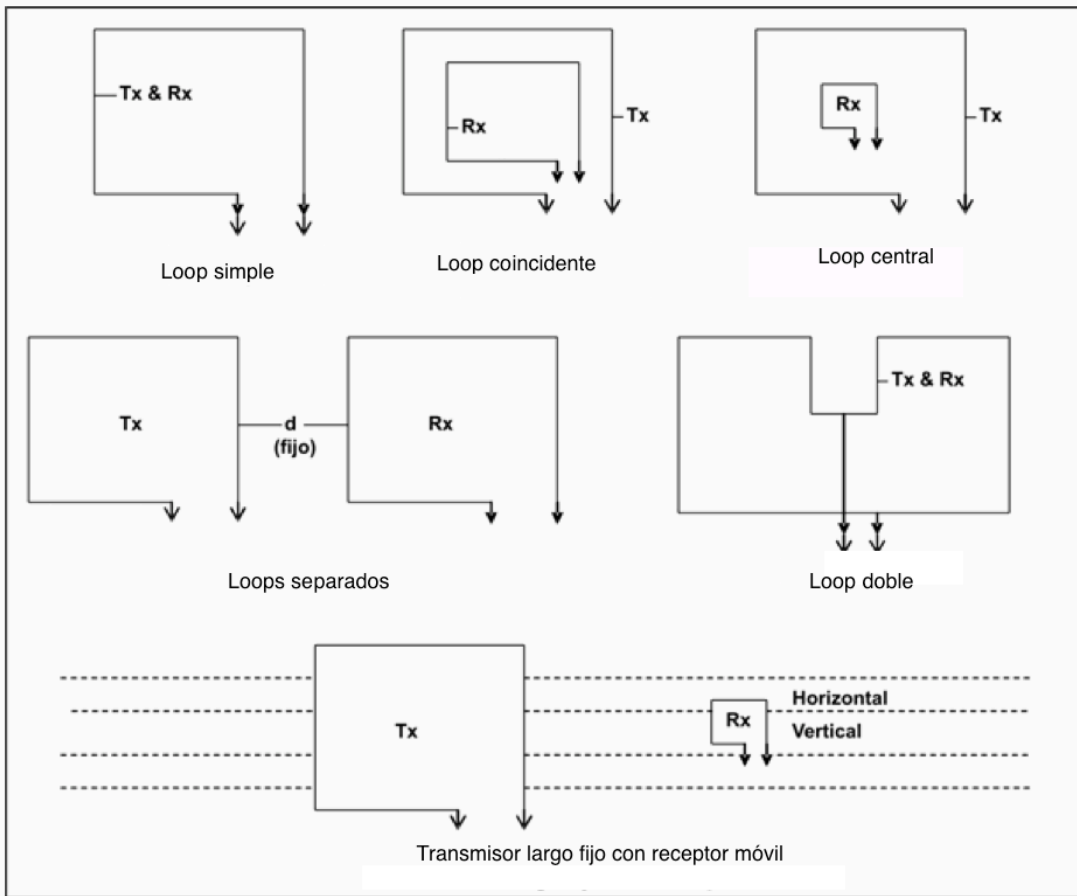
Consiste en dos bobinas adyacentes y conectadas en paralelo. Sirve para reducir el ruido causado por fuentes remotas.

- Loops separados

Las bobinas receptora y transmisora están separadas a una distancia fija. El dipolo receptor se encuentra en el exterior de la bobina transmisora.

- Transmisor largo fijo con receptor móvil

La bobina transmisora es grande y fija, el receptor es pequeño y móvil. Sirve para tomar mediciones a lo largo de líneas perpendiculares a la bobina.



**Fig. 2.7.** Arreglos del método TEM (Nabighian & Macnae, 1979).

## Capítulo 3. Geología e hidrogeología de la zona.

### 3.1 Provincia fisiográfica.

El área está situada dentro de las subprovincias llamadas Depresión Central y Sierra Cristalina. La Subprovincia “Depresión Central” se caracteriza por ser una franja de terreno poco accidentada orientada con rumbo noroeste-sureste, desde casi el límite con el estado de Oaxaca hasta la frontera con Guatemala. En esta área afloran clásticos cenozoicos de consistencia suave, fácilmente erosionables y en la parte media se distribuyen algunas montañas de caliza. Generalmente se registran elevaciones de 600 msnm.

La subprovincia “Sierra Cristalina” o Sierra Madre de Chiapas es una cadena montañosa que principalmente consiste de rocas graníticas, con orientación noroeste-sureste, continuación del macizo montañoso de Centro América formado por un batolito del Paleozoico Superior.

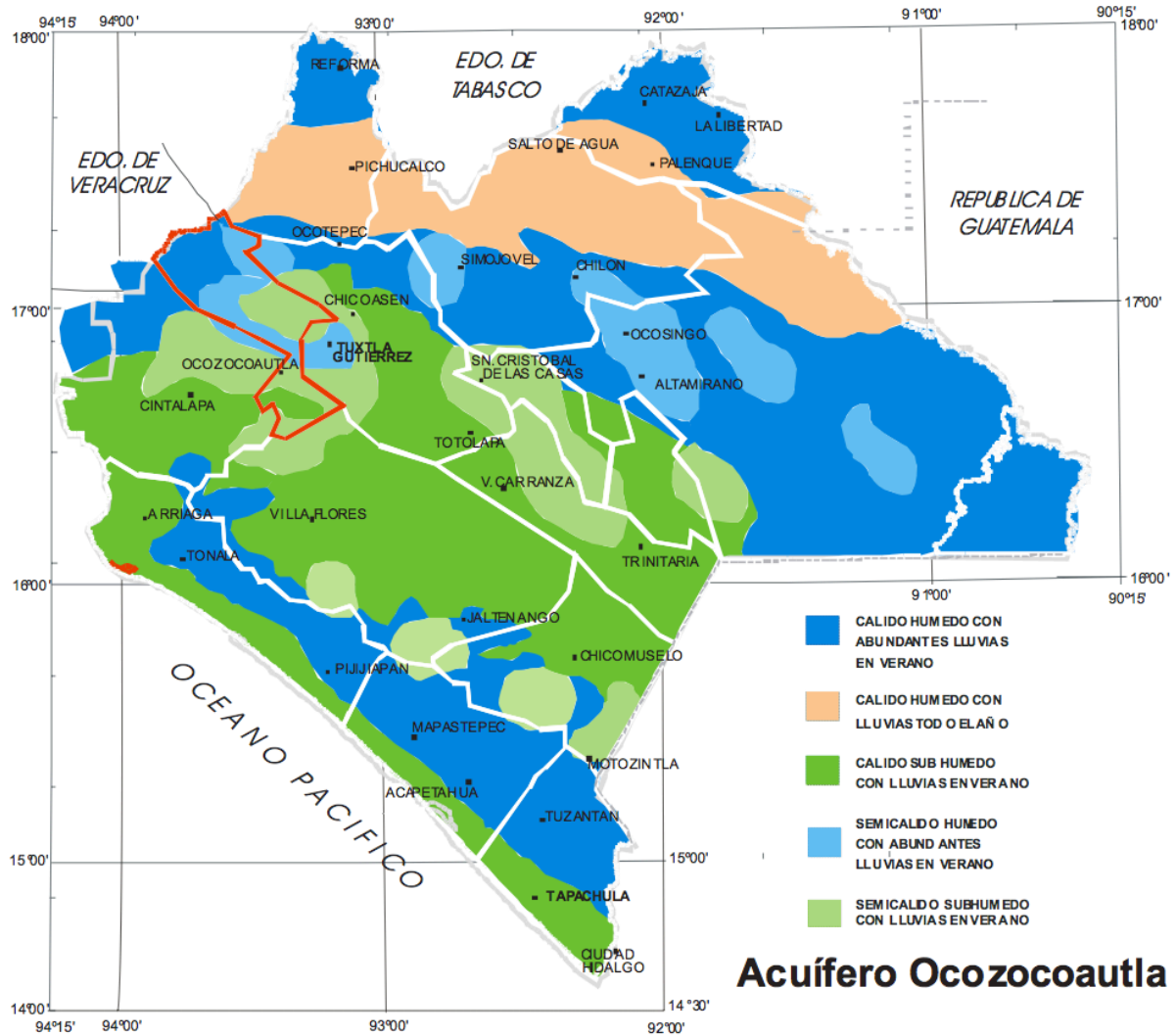
En el extremo noroeste se presentan elevaciones bruscas en las montañas, del orden de 900 m, que aumentan hacia el sureste cerca de la frontera con Guatemala a 2,900 msnm.

### 3.2 Clima.

Geográficamente, el estado de Chiapas queda comprendido dentro de la zona tropical, presentando de acuerdo con su configuración orográfica una gran



variedad de climas que van desde el templado subhúmedo a cálido húmedo con lluvias registradas en todo el año.

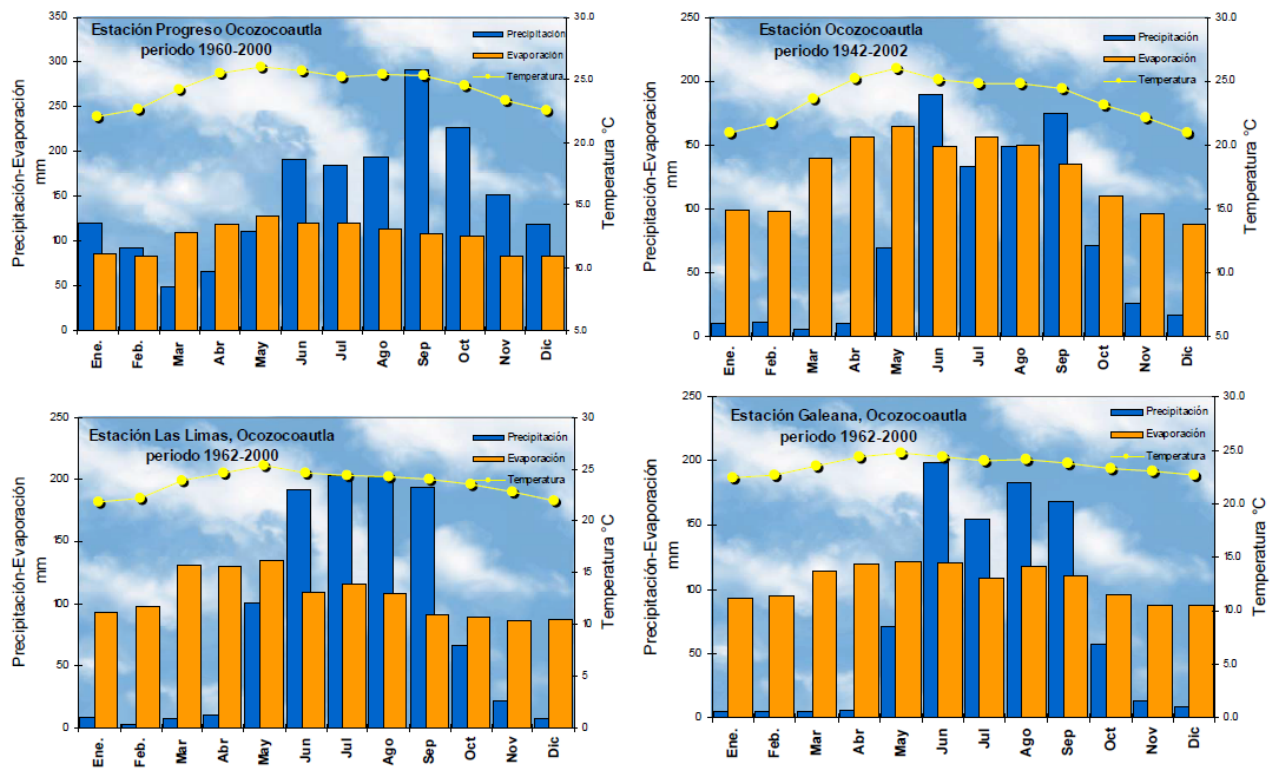


**Fig. 3.1** Clima en la zona del acuífero Ocozocoautla. (CONAGUA, 2009).

Con el fin de conocer las características atmosféricas de la zona de Ocozocoautla de Espinosa, se cuenta con datos climatológicos en el Servicio Meteorológico

Nacional de cuatro estaciones que se encuentran emplazadas en la zona de interés.

Dentro de la superficie que abarca el acuífero se encuentran localizadas las estaciones Climatológicas Ocozocoautla (1942-2002), Progreso (1960-2000), Galeana (1962-2000) y Las Limas (1962-2000).



**Fig.3.2.** Recopilación de información de estaciones climatológicas en la zona de estudio. (CONAGUA,2009)

De acuerdo con las gráficas de precipitación se aprecia que la temporada de lluvias en el área de estudio inicia en mayo y termina en octubre. Cada una de las

estaciones manifiesta picos en la precipitación con diferencias notables, lo que indica diferentes microclimas.

### 3.3. Geomorfología.

En el área se presentan diferencias en el relieve, marcadas por las características litológicas de las rocas aflorantes. Las unidades geomorfológicas son:

- *Meseta de Ocozocoautla*, se extiende de noroeste a sureste en una longitud aproximada de 1,000 msnm. La porción noroeste de la meseta se encuentra disectada por el Río La Venta que ha cavado un cañón de hasta 250 m de profundidad, con paredes verticales.

- *Valles de Cintalapa*, Villaflores y Domingo Chanona, corresponden a zonas bajas generalmente cubiertas por sedimentos aluviales, los cuales presentan ciertas ondulaciones. Se encuentran drenados por ríos de importante caudal que incluyen amplias llanuras de inundación. El valle de Cintalapa está drenado por los Ríos Cintalapa y Zoyatenco, mismos que se unen 2 km al sur del poblado Jiquipilas. Se observan algunos lomeríos y mesetas de pequeñas dimensiones.

Los valles de Villaflores y Domingo Chanona, son de menor extensión que el anterior. El primero, está drenado por el Río Santo Domingo y el segundo por el Río San Juan y su afluente, el Río San Lucas.

- *Sierras Cristalinas*, corresponden a una serie de elevaciones topográficas que se presentan en una gran extensión de la parte sur y suroeste del área. En conjunto tienen formas alargada, con una orientación NW-SE y formas ligeramente redondeadas. El Flanco NE de las sierras desciende con una pendiente relativamente suave, a diferencia del flanco SW que se presenta más abrupto, lo que da la idea de la existencia de bloques afallados.

### **3.4. Geología regional.**

El estado de Chiapas, orográficamente, se conforma por sierras y lomeríos que corresponden a la Sierra Madre de Chiapas y las Sierras al norte de la Depresión Central, además se encuentra la Meseta Central y valles asociados a la erosión de las sierras. Las llanuras presentes en Chiapas están asociadas principalmente a planicies costeras o depósitos aluviales.

Las rocas que constituyen la Mesa de Ocozocoautla, pertenecen al Cretácico Inferior y Medio, siendo en su mayoría calizas; sólo en una pequeña parte del norte afloran areniscas y lutitas del Cretácico Superior, las calizas presentan una topografía kárstica predominando pequeñas elevaciones al este y suroeste de Ocozocoautla de Espinosa y sumideros al sur y sureste.

### **3.5. Estratigrafía regional.**

La base de la columna litoestratigráfica aflorante en el territorio Chiapaneco es de edad proterozoica y está compuesta fundamentalmente por granitoides y

ortogneiss (Weber et al, 2006), cuyas exposiciones se restringen a pequeños afloramientos expuestos hacia la zona costera (Ruiz, 2014).

Cubriendo de manera discordante a las rocas basales, existen también rocas paleozoicas representadas por una serie detrítica perteneciente a las formaciones Paso Hondo, Vainilla y Gruperá. Tales rocas se encuentran afectadas por intrusiones plutónicas que pertenecen al Batolito de Chiapas, lo que geográficamente se denomina como macizo granítico de Chiapas (Ruiz, 2014).

Cubriendo a la secuencia antes descrita, se tiene el depósito de rocas mesozoicas marinas representadas por una secuencia detrítico-calcárea que va del Triásico-Jurásico al Cretácico Superior, representada por las formaciones Todos Santos, Mogoñe, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocoautla y Méndez, las cuales afloran principalmente en la porción centro septentrional de la entidad, constituyendo zonas montañosas abruptas (Ruiz, 2014).

Sobre la secuencia de rocas mesozoicas se encuentra un paquete de rocas cenozoicas cuyo rango de depósito abarca del Paleoceno (Formación Soyaló) al Plioceno (Formación Tres Puentes). Las rocas paleozoicas son de origen marino y constituyen depósitos rítmicos tipo flysch. Por su parte, las rocas eocénicas de naturaleza mixta (continental y marina) representan capas rojas en el límite con el Oligoceno marino, cuyas rocas están representadas por calizas (Formación Macuspana) y rocas detríticas (Formación La Laja), mismas que afloran principalmente hacia el oriente del estado (Ruiz, 2014).

Finalmente las rocas del Plioceno-Holoceno están constituidas por depósitos de limos, arenas, arcillas y depósitos piroclásticos derivados de las actividades de los volcanes Chichonal y Tacaná, así como por materiales aluviales y suelos residuales (Ruiz, 2014).

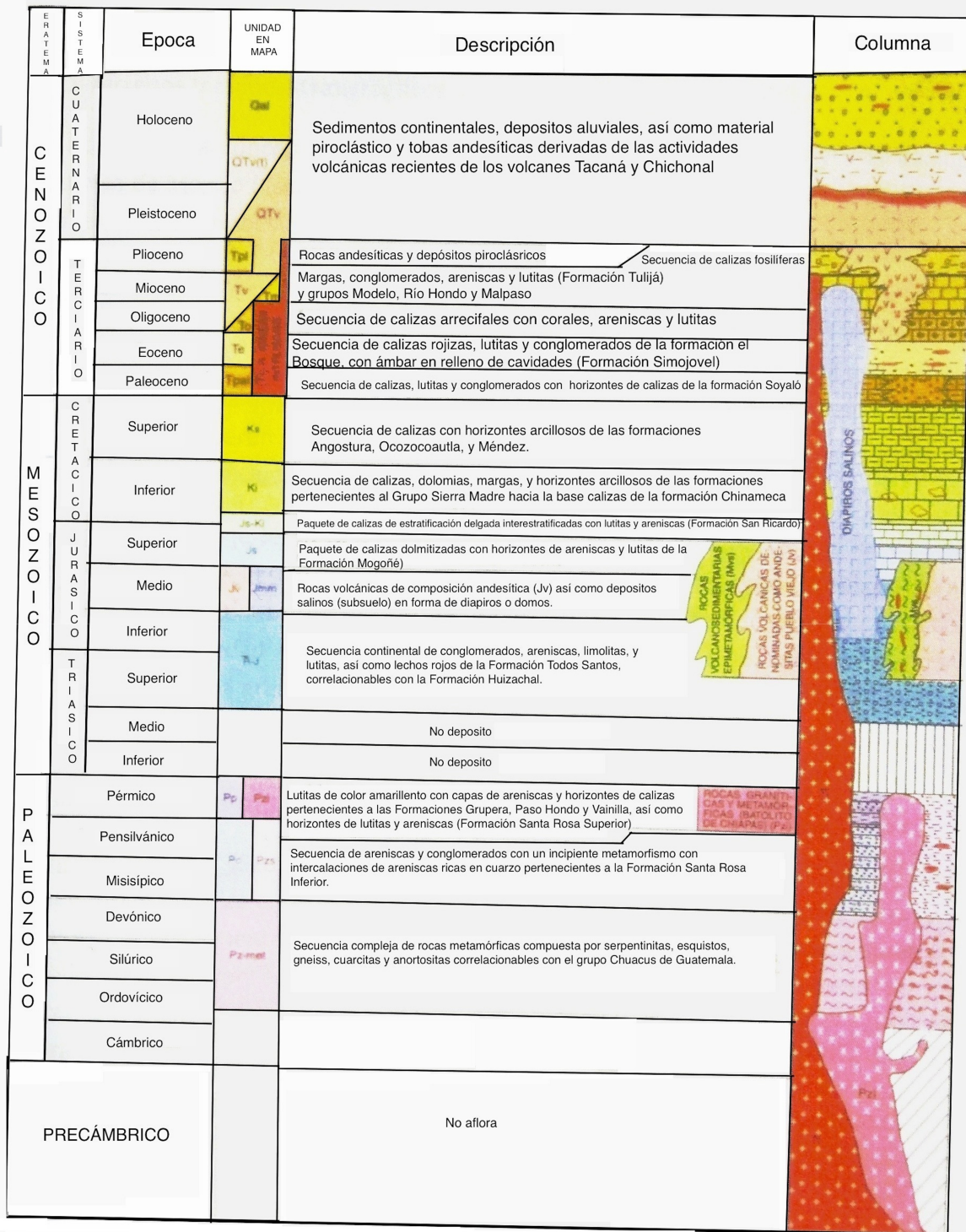


Fig. 3.3. Columna estratigráfica del estado de Chiapas.  
Fuente: Monografía Geológico-Minera del estado de Chiapas (Castro-Mora, 1999).

### 3.6. Estratigrafía local.

Las unidades litoestratigráficas que se han identificado en la zona de Ocozocoautla de Espinosa y en sus inmediaciones, se describen a continuación:

**Formación Todos Santos.**- Conocida también como Lechos Rojos, son las rocas mesozoicas más antiguas, afloran al sur de Cintalapa, mostrando hacia su base una potente secuencia de areniscas rojas de grano grueso a muy grueso con la presencia de fragmentos de granito, rocas efusivas y metamórficas. Al norte de Cintalapa existe un derrame andesítico, y al oriente los Lechos Rojos desaparecen por acúñamiento junto con las capas de la Formación San Ricardo bajo las calizas del Cretácico Medio, para florar nuevamente al Norte de Ocozocoautla de Espinosa, (CONAGUA, 2009).

Esta formación fue definida por Sapper en 1894 para unos sedimentos cercanos a la localidad de Todos Santos Cuchumatán, en el Departamento de Huehuetenango, Guatemala.

Dada su naturaleza continental de este depósito, es difícil determinar su edad (ausencia de fósiles índices); sin embargo, la mayoría de los investigadores piensan que se formó entre el Jurásico Medio o Temprano al Neocomiano. La única evidencia que existe para suponer tal edad ha sido encontrada en el sureste del estado, en el área de la Concordia, en donde descansa sobre sedimentos del Misisípico Tardío y contiene polimorfos del Batoniano.



Aunque no se conoce con certeza el inicio de depósitos de estos lechos rojos, es muy probable que se hayan acumulado en grabens subsidentes relacionados a la protocuenca del Golfo, desde el Triásico Tardío o Jurásico Temprano.

**Formación San Ricardo.-** Sedimentos que afloran sobre la carretera Panamericana, al noreste del puente sobre el río Las Flores, presentan variaciones que van desde calizas de plataforma interna a clásticos terrígenos depositados en ambiente litoral, identificados en las inmediaciones de Cintalapa, el espesor de la Formación disminuye hacia el sureste hasta llegar a una zona de acúñamiento total, al sur de Ocozocoautla de Espinosa, donde el Cretácico Medio descansa directamente sobre el granito (Basamento), (CONAGUA, 2009).

Richards (1963) propuso formalmente este nombre para los sedimentos expuestos a unos 6.4 km al NE de la localidad de San Ricardo, situada a 16 km al este de Cintalapa.

En cuanto a su ambiente de depósito se supone que la unidad de terrígenos fue formada cerca de una llanura aluvial con corrientes entrelazadas, mientras que la parte calcárea debió haberse depositado en aguas marinas poco profundas.

**Formación Sierra Madre.-** Está expuesta en una extensa área de Chiapas, consiste de una secuencia de calizas, dolomías y margas con horizontes

arcillosos. Se divide en tres miembros, Cantelhá, Cintalapa y Jopalbuchil (Ruiz, 2014).

El miembro Cantelhá está constituido por dolomitas con intercalaciones de calizas que permiten suponer un ambiente de depósito de plataforma interna de baja energía. Le subyace a las calizas Cintalapa y cubre en concordancia al Cretácico Inferior. Es la más desarrollada dentro de la sierra, aflora en una franja orientada NW-SE a lo largo del homoclinal de la sierra y en las culminaciones de las estructuras del Altiplano.

Las calizas del miembro Cintalapa se presentan bien estratificadas en un paquete de 700 a 1,600 m de espesor, constituido por intercalaciones de dolomita color crema y calizas dolomíticas, con algunos lentes de pedernal blanco; las cuales se hacen más abundantes hacia el oriente de Tuxtla Gutiérrez. El ambiente de depósito fue de plataforma de escasa profundidad, más somera al E y NE de Tuxtla Gutiérrez abarcando parte de la zona de Cintalapa, en transición con el talud, aunque también cabe la posibilidad de que corresponda a un banco calcáreo en zonas protegidas y de poca circulación.

El miembro Jolpabuchil fue reconocido en el centro del estado, consiste de calizas de textura mudstone, wackstone, wackstone arcilloso de estratificación media a delgada con intercalaciones de lutitas pedernalosas e intercalaciones de brechas

calcáreas. Presenta un espesor que va desde 190 m hasta 800 y 1,400 m al sur de Tuxtla Gutiérrez.

**Formación Méndez.-** Está constituida por rocas clásticas que afloran en la porción noroeste del estado y que representa la cima del Cretácico. Se observa al oriente de las Presas Malpaso y Peñitas, en estos sitios se presenta en forma de estratos de margas, lutitas y una alternancia de lutitas laminares y areniscas de grano fino a medio, con un espesor de 970 m y que descansa discordantemente con la parte inferior del Grupo Sierra Madre. Se considera que existe una discordancia en su contacto superior, ya que se ha reportado la existencia de una brecha en su límite con las rocas del Paleoceno.

**Formación Ocozocoautla.-** Incluye toda una secuencia terrígena localizada en la parte oriente del Valle de Tuxtla Gutiérrez y limitada entre rocas del Paleoceno y las cretácicas de la Formación Sierra Madre, consiste de una secuencia detrítica compuesta por areniscas y conglomerados que gradúan hacia su parte superior a areniscas rojizas con intercalaciones de lutitas y calizas arcillosas con fragmentos de rudistas, su espesor varía entre 600 y 800 m y se correlaciona con la Formación Méndez. Descansa sobre las calizas de la Sierra Madre.

Las características litológicas de la unidad sugieren que fue depositada en un ambiente mixto cercano a la línea de costa y se han encontrado en ella afloramientos que incluso tienen rastros de madera petrificada y trozos pequeños de carbón.

**Formación Angostura.-** Esta unidad y sus equivalentes, las formaciones Ocozocoautla y Boca del Cerro, han sido ampliamente reconocidas en la franja central que cubre de este a oeste al estado de Chiapas, se encuentra expuesta hacia el oeste de Tuxtla Gutiérrez donde se interdigita con la Formación Ocozocoautla. En esta zona, la formación consiste de packstone de estratificación media con fragmentos de rudistas y microfósiles. Aunque en superficie no se logró medir su espesor, éste se estima de alrededor de 600 m y se le asignó una edad Maestrichtiano. En lo que se refiere a su ambiente de depósito, se piensa que fue formada en aguas someras con zonas propicias para el desarrollo de biohermas y en algunas otras, en zonas de talud arrecifal.

**Formación Lacandón.-** En la parte central de la sierra de Chiapas persiste el depósito de calizas en estratos bien diferenciados con un espesor total de 450 m, esta formación se correlaciona en tiempo con la Formación Lacandón localizada y depositada al NE de Guatemala.

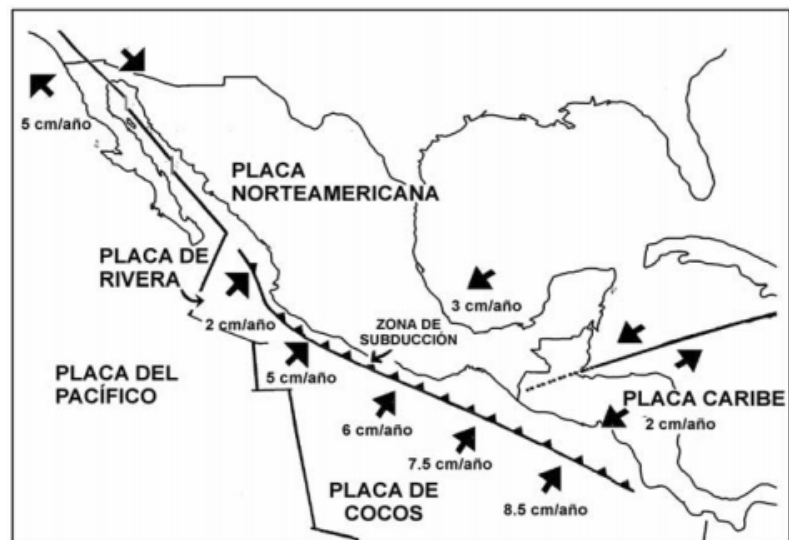
La Formación Lacandón hacia el sureste del estado se manifiesta constituida en su base por brechas polimícticas con matriz calcárea-arcillosa, empacando fragmentos de calizas cretácicas. El ambiente que generó este depósito varió de aguas someras hacia la parte sur y de aguas profundas hacia el norte donde es nombrada Formación Sepur.

Al final del Eoceno e inicios del Oligoceno se manifiesta una etapa de estabilidad tectónica que genera hacia la porción central de la sierra de Chiapas un “hiatus” sedimentario, mientras que hacia la porción central se generan depósitos de

carbonatos de ambiente somero con el desarrollo de arrecifes, caracterizados por alternancias de calizas, brechas y lutitas arenosas.

### 3.7. Tectónica del estado.

En el estado de Chiapas interactúan tres placas tectónicas: la placa de Cocos, la placa Norteamericana y la placa del Caribe. La placa de Cocos subduce bajo la Placa Norteamericana y en el contacto entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe se desarrolla un desplazamiento lateral izquierdo.



**Fig.3.4.** Placas tectónicas y sus correspondientes desplazamientos y velocidades relativas promedio (CENAPRED, 2006).

De acuerdo a Guzmán y Meneses (2000), el estado de Chiapas se divide en cuatro provincias tectónicas: la provincia de las Fallas Laterales, provincia de las Fallas Inversas, las Fallas de Motagua-Polochic y el Batolito de Chiapas.

La provincia tectónica de Fallas Inversas ocupa la porción oriental de la Sierra de Chiapas y la parte centro-norte de Guatemala. En Chiapas, es equivalente a las provincias tectónicas Miramar y Yaxchilan de Sánchez-Montes de Oca (1979),

mientras que es equivalente a Arco de la Libertad y Chapayal Basin de Vinson y Brineman (1963). Esta provincia tiene una morfología superficial en forma de una “Z” ancha, formada por anticlinales estrechos cortados a lo largo de sus flancos por fallas inversas. La sismicidad asociada a esta provincia tectónica es menor que en la provincia de las fallas laterales (Guzmán y Meneses, 2000).

La provincia tectónica de las Fallas Laterales abarca la mayor parte del territorio de la Sierra de Chiapas (Sánchez-Montes de Oca, 1979). Esta provincia está compuesta por un conjunto de bloques que se hunden y se levantan, limitados por fallas laterales izquierdas. En la parte Este de la provincia, las fallas tienden a estar orientadas en la dirección este-oeste, mientras que en las áreas centrales y occidentales las fallas se orientan en dirección de N50°W. Hay nueve fallas en esta provincia, las de mayor longitud son las Fallas Tecpatán-Ocosingo, Malpaso, y Telestaquín-San Cristóbal, con longitudes en el rango de 120 a 170 km. La sismicidad en esta provincia tectónica se caracteriza por sismos moderados y someros (Guzmán y Meneses, 2000).

Las fallas Motagua-Polochic cruzan Guatemala central en un arco cóncavo al norte. El contacto entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe se extiende desde el Caribe, pasa por Guatemala y se interna en el estado de Chiapas. Este límite ha sido definido por el Sistema de Fallas Motagua-Polochic en Guatemala y por varios sistemas de fallas y cabalgaduras que atraviesan el estado de Chiapas (Guzmán y Meneses, 2000). Actividad sísmica reciente en las fallas Motagua (Plafker, 1976; Kanamori and Stewart, 1978) y Polochic (White, 1985) indican que ambas están activas en el presente.

El Batolito de Chiapas se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hasta la frontera con Guatemala, con una longitud aproximada de 300 km con una orientación NW-SE y un ancho de aproximadamente 75 km, aproximadamente paralelo a la Trinchera Centroamericana, está compuesto por rocas intrusivas de composición graníticas a granodioríticas (Rodríguez, 2007). El Batolito de Chiapas se ubica en la porción occidental del estado de Chiapas donde se localiza el contacto entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana, la primera subduce a la segunda.(González *et al.*, 2012).

### 3.8. Geología estructural.

El estudio, toma y análisis de datos estructurales en campo, así como el procesamiento, fue dirigido por el Ing. José Luis Arcos Hernandez y el M.C. Noé Santillán Piña.

#### 3.8.1 Análisis estadístico de fracturas.

Las zonas de muestreo de fracturas se conocen como:

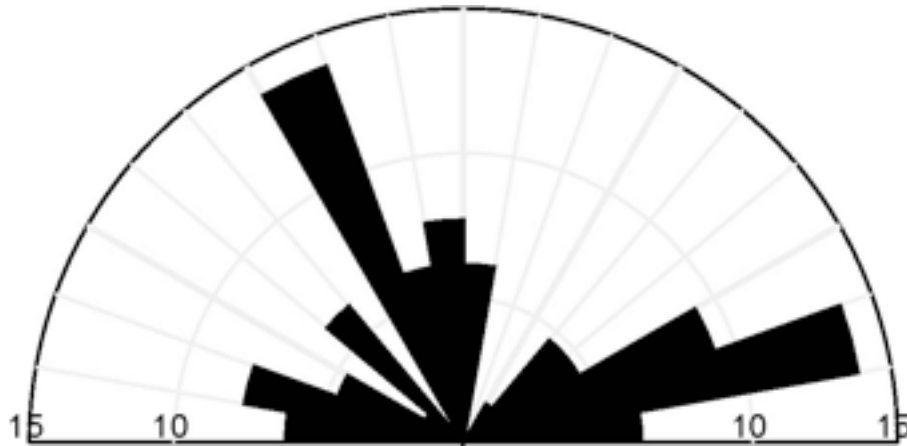
- El Aguacero,
- El Encanto,
- El Aeropuerto,
- El Entronque,
- Zona de Maseca.

Se realizó un análisis con el software de uso libre Stereonet 2011-2013. Los intervalos de clase están a cada 10°. Los números sobre el eje Este-Oeste (eje horizontal) representan la frecuencia de datos, el único eje vertical representa el Norte. A partir del eje N (vertical) se tiene el cuadrante NE, siguiendo el sentido horario. En sentido anti horario se tiene el cuadrante NW, como solo se consideran los rumbos es lo mismo NE que SW y también es lo mismo NW que SE.



## - El Aguacero

En la zona El Aguacero se tomaron 64 datos de planos de fracturas, los cuales se encuentran en el listado del anexo 1. Se tomaron en la margen oriental del río (Fotografía 1). La dirección de la pared vertical varía de  $156^\circ$  hasta  $196^\circ$ . Se aprecian dos familias principales una NW-SE de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  y otra NE-SW de  $70^\circ$  a  $80^\circ$ . Asimismo se aprecia una familia menor de dirección E-W. En la fotografía 2 se aprecian claramente las tres familias. Se muestra además en la fotografía 3 el detalle del afloramiento de calizas de donde se colectaron los datos de fracturas con desarrollo de disolución. Las calizas se presentan estratificadas con un rumbo de  $220^\circ$  y un echado o inclinación de  $25^\circ$ .



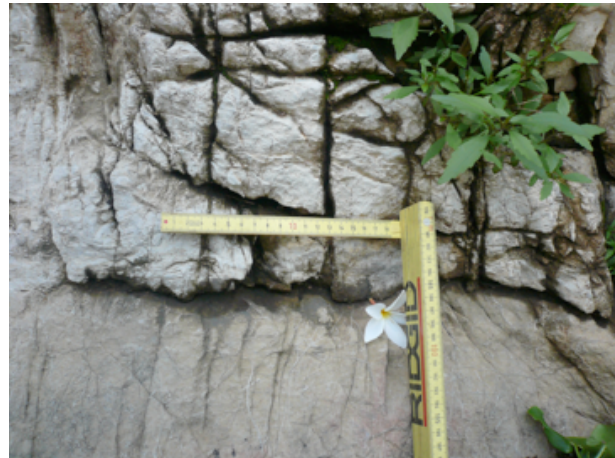
**Fig. 3.5.** Roseta de rumbos de la zona El Aguacero.



**Fotografía 1.** La dirección los planos verticales de las paredes al fondo con la misma dirección del cauce es de entre  $156^\circ$  y hasta  $196^\circ$ . La margen oriental está en la parte izquierda de la foto.

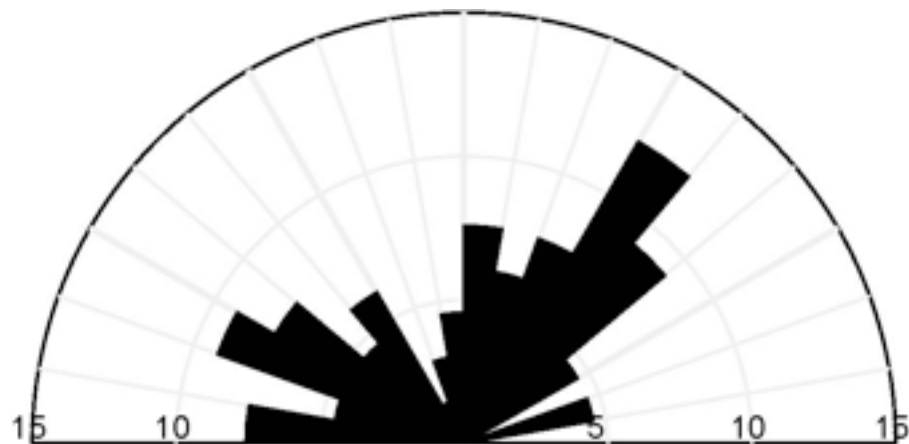


**Fotografía 2.** Las tres familias principales de fracturas en el afloramiento el Aguacero en la margen oriental del río. La alidada de la brújula señala la familia secundaria E-W.



**Fotografía 3.** Detalle del afloramiento de calizas donde se colectaron datos de fracturamiento, nótese que la apertura de las fracturas, en algunos casos llega hasta el centímetro.

- **El Encanto**



**Fig. 3.6.** Roseta de rumbos de la zona El Encanto.

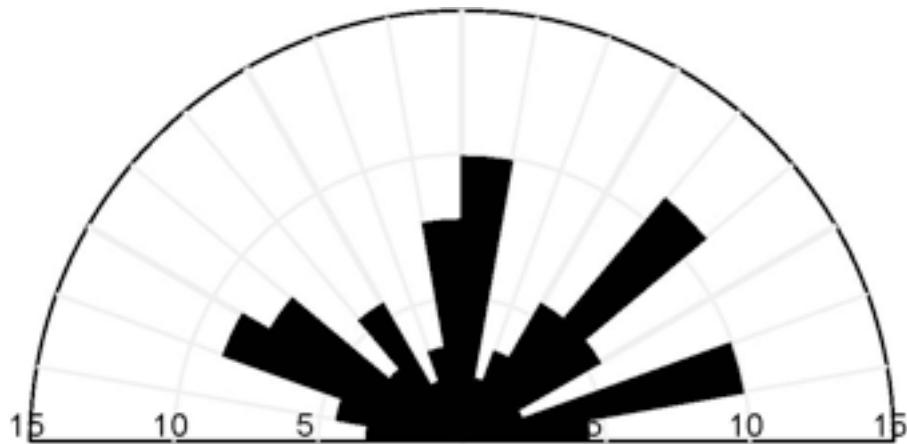


**Fotografía 4.** Estructuras de disolución generadas en las calizas que se encuentran en el entorno del pozo El Encanto. El espejo de agua coincide con el plano de estratificación, mientras que la pequeña caverna coincide claramente con la familia principal de fracturamiento que muestra la roseta de dirección NE-SW 50° y la dirección general de la caverna es de NE 52°.

La zona de muestreo de fracturas *El Encanto*, se encuentra justo en el entorno del pozo El Encanto, perteneciente a la Comisión Estatal de Aguas. La muestra consistió de 66 datos, los cuales se encuentran en el listado del anexo 2. En esta zona afloran estratos horizontales de calizas que muestran gran desarrollo de disolución como lo muestra la fotografía 4. Por su frecuencia destaca una familia principal de dirección NE-SW de 40° a 50°, otra secundaria hacia el NW-SE 60°-70° y unas de menor importancia N-S y otra E-W.

## - El Aeropuerto

La zona El Aeropuerto se encuentra en las coordenadas geográficas  $16^{\circ} 45.94' N$  y  $93^{\circ} 21.54' W$ . La muestra se tomó en un afloramiento (fotografía 5) que se encuentra frente a la puerta del antes aeropuerto cuyas instalaciones ahora pertenecen al CENAPRED estatal y consiste de 60 datos, los cuales se encuentran en el listado del anexo 3. En este afloramiento se presentan una intercalación de calizas margosas de color ocre al intemperismo y beige al fresco, presentan granulometría de media a fina, el espesor de los estratos va de 20 cm hasta 40 cm. Las lutitas son de color ocre y sus espesores van de 15 hasta 40 cm. Ambas presentan estratificación horizontal (fotografía 5).



**Fig. 3.7.** Roseta de rumbos de la zona Aeropuerto.

La roseta muestra claramente una familia principal NE-SW  $40^{\circ}$ - $50^{\circ}$ , dos familias secundarias N-NE  $10^{\circ}$  y NE-SW  $70^{\circ}$ - $80^{\circ}$ , de menor frecuencia hay

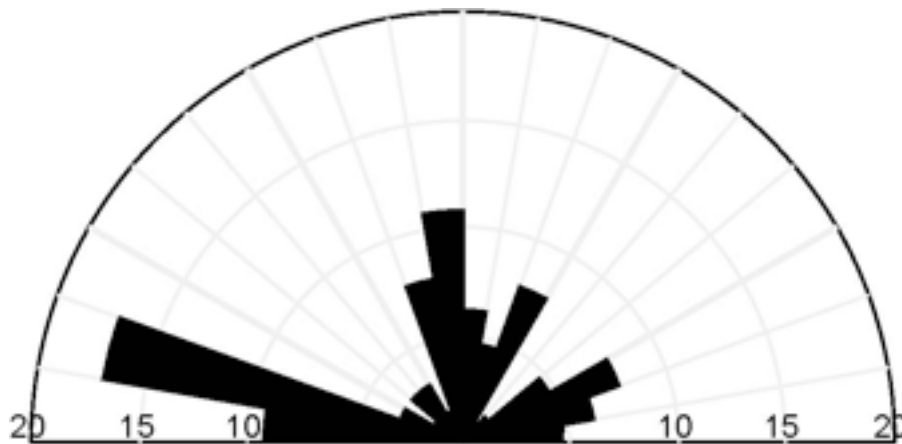
una tercera familia NW-SE  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$  y finalmente se aprecia una familia menor E-W. En la fotografía 5 se puede apreciar el fracturamiento vertical en el afloramiento.



**Fotografía 5.** Afloramiento de margas y lutitas frente al CENAPRED (antes aeropuerto). Se aprecian claramente las fracturas verticales y la estratificación horizontal.

### - El Entronque

La zona El Entronque se encuentra en las coordenadas geográficas  $16^{\circ} 45.11' N$  y  $93^{\circ} 20.51' W$ , es la desviación que se debe de tomar viniendo de Tuxtla Gutiérrez la capital del estado para bajar al poblado de Ocozocoautla de Espinosa. La muestra consistió de 65 datos, los cuales se encuentran en el listado del anexo 4. El muestreo se realizó en los afloramientos encontrados sobre la carretera que baja hacia el poblado, el recorrido del muestreo cruza la Falla Ocozocoautla (fotografía 6).



**Fig. 3.8.** Roseta de rumbos de la zona Entronque.

La Falla Ocozocoautla de es una falla normal de dirección  $100^\circ$  y casi vertical,  $86^\circ$ . Se ubica en el punto de coordenadas  $16^\circ 45.28' N$  y  $93^\circ 21.49'$ . La traza de la falla sobre el mapa no es una recta continua, se trata de una trayectoria quebrada con planos de menor longitud orientados  $20^\circ$ ,  $80^\circ$ . La estratificación varía de  $151^\circ$ ,  $20^\circ$  hasta  $288^\circ$ ,  $20^\circ$ , mientras que en la zona de la falla la estratificación es de  $353^\circ$ ,  $20^\circ$ .



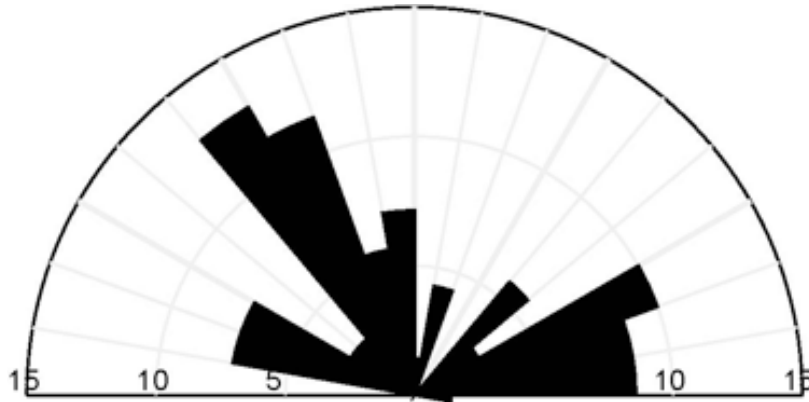
**Fotografía 6.** Plano de la falla Ocozocoautla, afloramiento sobre la carretera Tuxtla Gutiérrez hacia la población de Ocozocoautla de Espinosa. El plano de la falla es el plano vertical que queda de frente al observador.

El análisis de la roseta arroja una familia principal NW-SE  $70^\circ$  a  $80^\circ$ , que coincide claramente con la dirección de la falla SE  $80^\circ$ . Posteriormente se aprecian en orden de importancia una segunda familia de dirección N-S y NW  $10^\circ$ .

NE  $20^\circ$  a  $30^\circ$  y otra familia que por su frecuencia tiene la misma importancia de NE  $60^\circ$  a  $70^\circ$ , es probable que esta última sea el par conjugado de la falla principal.



- **Zona Maseca**



La zona de muestreo *Maseca* se encuentra en el entorno al punto de coordenadas geográficas  $16^{\circ} 44.39' N$  y  $93^{\circ} 23.28' W$ , justo en la intersección de dos carreteras, una local del poblado de Ocozocoautla de Espinosa a la empresa Maseca y la autopista que va hacia San Cristóbal de las Casas (fotografía 7). La muestra consistió de 70 datos, los cuales se encuentran en el listado del anexo 5. La roseta muestra una familia principal en dirección al NW variando desde  $20^{\circ}$  a  $40^{\circ}$ , una familia secundaria de dirección NE-SW  $60^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  y familias menores casi E-W, variando tanto al E como al W desde  $0^{\circ}$ , es decir E franco, y hasta  $20^{\circ}$  hacia ambos lados.



**Fotografía 7.** Afloramiento en la intersección de carreteras cerca de las instalaciones de la empresa MASECA.

En el campo se registró un par de fallas conjugadas de dirección  $65^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $220^\circ$ ,  $90^\circ$ . La fotografía 8 muestra dicho par conjugado, esta familia aparece en la roseta como la familia secundaria de dirección NE  $60^\circ$  a  $70^\circ$  y su conjugada se encuentra en la familia menor NE-SW  $40^\circ$  a  $50^\circ$ .



**Fotografía 8.** Par conjugado de fracturas en el afloramiento Maseca. Se trata de dos planos verticales uno en dirección  $065^\circ$  y otra  $220^\circ$ .



# CAPÍTULO 4. Exploración geofísica.

## 4.1 Implementación en campo del método TEM.

En el estudio se realizaron veinte sondeos Electromagnéticos (TEM), agrupados en 4 perfiles, para definir la distribución y características de los materiales en el subsuelo.

### 4.1.2 Especificaciones de los equipo usados.

Equipo *terraTEM* de la marca Monex GeoScope:

- Voltaje de entrada:  $\pm 10$  [V]
- Receptor: 500 [kHz] con 3 canales simultáneos verdaderos.
- Memoria interna: 1GB.
- Interfase externa: USB para transferencia de datos.
- Medidas de la consola: 53cm x 38cm x 17cm.
- Pantalla LCD a color de 15".
- Peso: 13 [kg].
- Temperatura de operación: -20 a 45°C.



**Fig. 4.1.** Equipo *terraTEM* usado.

Equipo GPS marca GARMIN:

Coordenadas: UTM (X,Y).



**Fig. 4.2.** Gps marca GARMIN usado. (<http://oit.williams.edu/elc/garmin-etrex/>)

La elevación fue tomada de Modelos Digitales de Elevación (MDE) adquiridos del portal del INEGI. En la Tabla 4.1 se presentan las elevaciones correspondientes y las coordenadas de los centros de cada uno de los sondeos TEM.

#### 4.1.3 Ubicación de los sondeos TEM.

Sondeo	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
AG1	444641	1852104	716
AG2	444730	1852356	709
AG3	444716	1852646	713
AG4	444680	1853004	720
AG5	444871	1853328	718
AP1	461295	1854884	1092
AP2	461244	1855273	1111
AP3	461100	1855567	1108
AP4	461113	1855871	1093
AP5	460771	1856118	1110
B01	449254	1851614	757
B02	449190	1852024	753
B03	449227	1852296	752
B04	448902	1852520	749
B05	448922	1852972	752
C01	455785	1847589	774
C02	456346	1847487	774
C03	456606	1847506	774
C04	457153	1847508	776
C05	457546	1847563	780

Tabla 4.1. Coordenadas UTM de los TEM's.

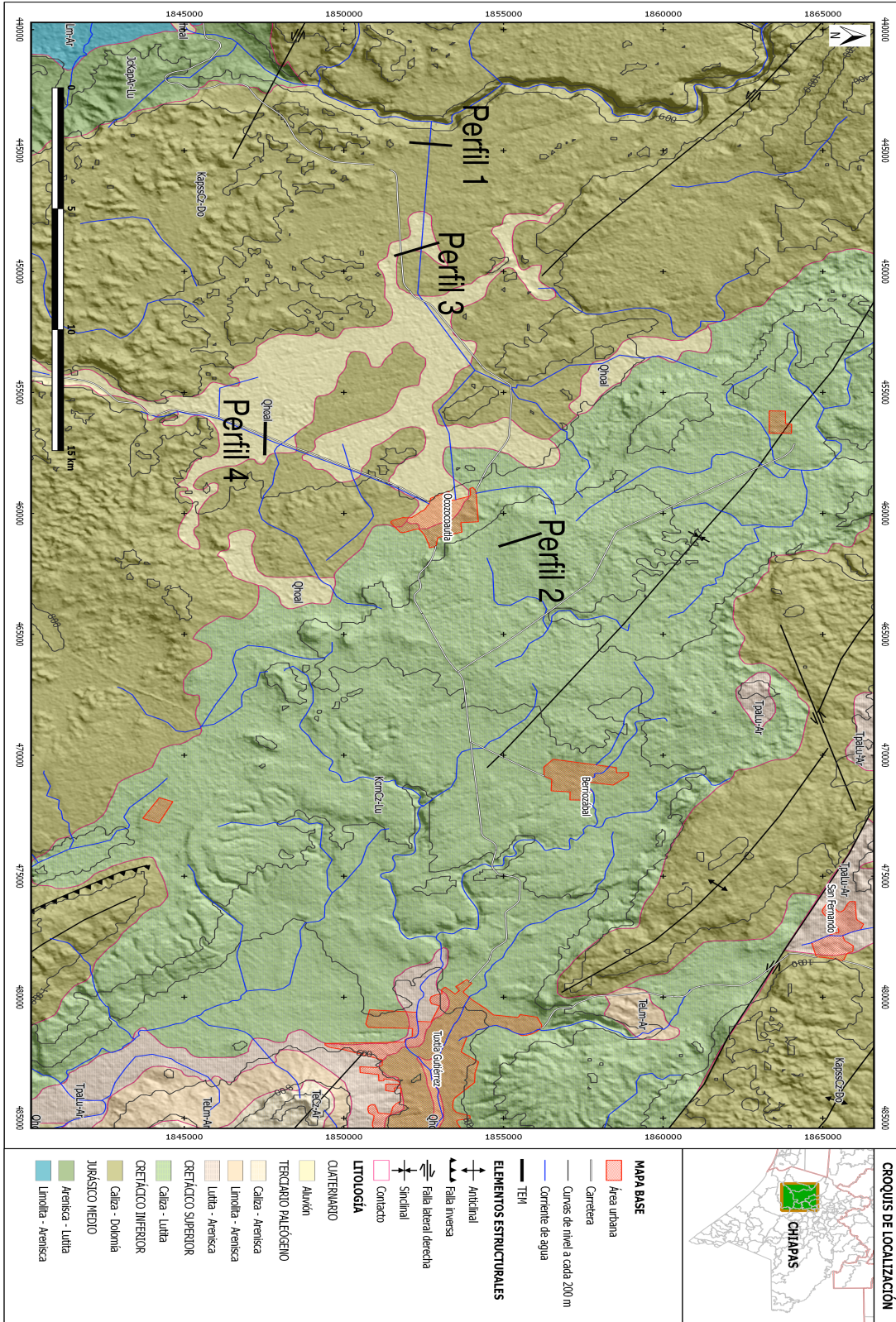


Fig. 4.3. Mapa de ubicación de los perfiles geofísicos.



#### 4.1.4 Arreglo implementado en los sondeos TEM's.

Se utilizó un arreglo *loop simple*, donde una sola bobina que sirve tanto como transmisora como receptora. La bobina era un cable tendido forma cuadrada de 150 [m] de longitud por lado, con un área total de bobina de 22,500 [m<sup>2</sup>].

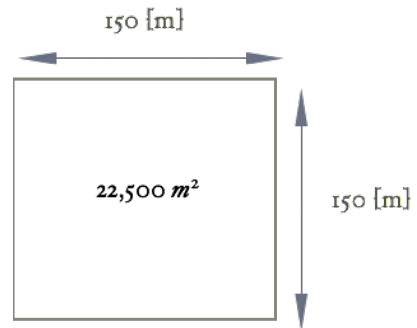


Fig. 4.4. Dimensiones del arreglo.

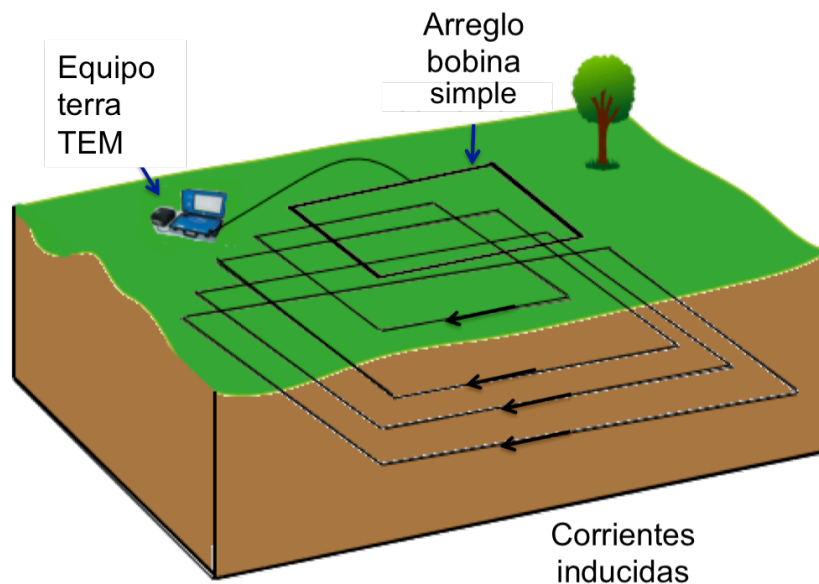


Fig. 4.5. Implementación en campo. (tomado y modificado de <http://www.hgiworld.com/methods/electromagnetic/>)

# Capítulo 5. Procesamiento de datos.

"It is vain to do with more what can be done with fewer"

-William of Occam.

## 5.1. Procesamiento de datos electromagnéticos.

Una vez realizados los 20 sondeos TEM en las inmediaciones del municipio Ocozocoautla de Espinosa, procedemos a descargar la información obtenida del equipo *terraTem* a una computadora, en formato establecido (.SIR). Se leen los archivos de los sondeos en el programa Temix de la compañía Interpex. equivalente. Temix es un paquete de cómputo interactivo de amplio uso en la interpretación de sondeos transitorios, calcula la respuesta del arreglo de bobina no-central aproximando el efecto de cada lado de la espira con un dipolo equivalente (Flores, 2000).

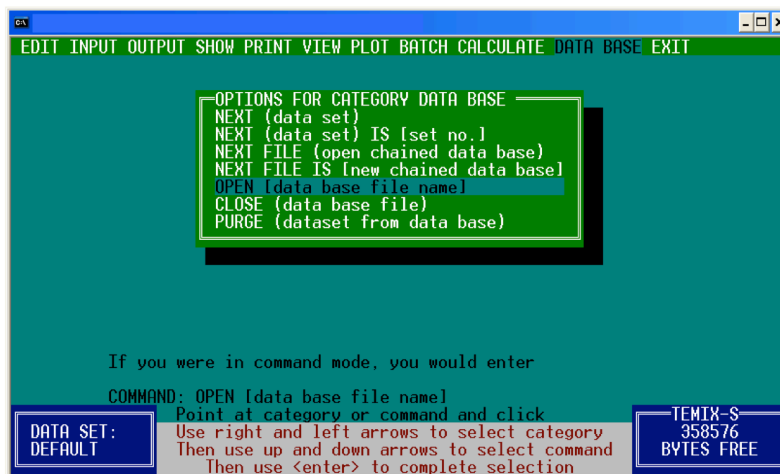


Fig.5.1. Pantalla inicial del Temix para leer los archivos de datos.

Por cada sondeo realizados podemos visualizar todas las curvas registradas, a diferentes ganancias, de decaimiento de voltaje. Se editan para poder obtener una sola curva con la opción de Enmascarar (Mask) que permite remover puntos para los cálculos posteriores, pero sin eliminarlos del set de datos. La curva final obtenida estará en función del tiempo y proporcionará información de la resistividad aparente  $\rho_a$ .

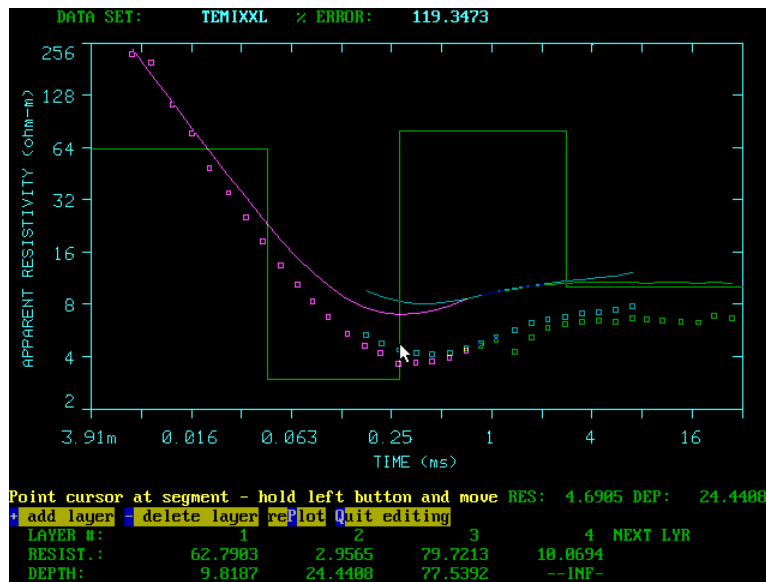


Fig. 5.2. Ejemplo de curvas obtenidas de  $\rho_a$  vs. tiempo (interpex.com).

Los archivos con los datos de las curvas obtenidas anteriormente ( $\rho_a$  vs. tiempo) se guardan en el programa Winglink de la marca GeoSystem, (programa multidisciplinario, para procesar, interpretar e integrar métodos geofísicos en un único modelo de interpretación), en donde se ejecuta un algoritmo de inversión de Occam para cada curva (Constable et al., 1987). *Occam's Inversion* trata de obtener una solución "suave", es decir, sin cambios abruptos en los valores de conductividad (Gasulla, 1999).

Se obtiene un modelo resistividades puntuales con sus profundidades asociadas. Al emplear el algoritmo de inversión de Occam, proponemos un valor de resistividad inicial con profundidades inicial y final. Otra opción es ejecutar el algoritmo de manera automática indicando el numero de capas (máximo 20).

Una vez ejecutada la *Occam's Inversion*, se obtienen modelos geoelectricos, con  $n$  número de capas geoelectricas que pueden ser correlacionadas con la información geológica del área estudiada, mediante los valores de resistividades presentes en el subsuelo.

## Capítulo 6. Análisis y resultados.

Como se mencionó anteriormente, los 20 sondeos TEM fueron agrupados en 4 perfiles, los perfiles se generaron en Winglink.

### 6.1 Perfiles geoelectricos.

De acuerdo a la planeación para ubicar los sondeos, estratégicamente se planteó la distribución geográfica de los 4 perfiles geoelectricos, como se muestra en la tabla 6.1.

<b>Perfil</b>	<b>Sondeos TEM</b>	<b>Orientación</b>
1	AG1, AG2, AG3, AG4, AG5	N-S
2	AP1, AP2, AP3, AP4, AP5	N-S
3	B01, B02, B03, B04, B05	N-S
4	C01, C02, C03, C04, C05	E-W

**Tabla 6.1.** Distribución de los sondeos TEM en los perfiles.

### 6.1.1 Perfil 1.

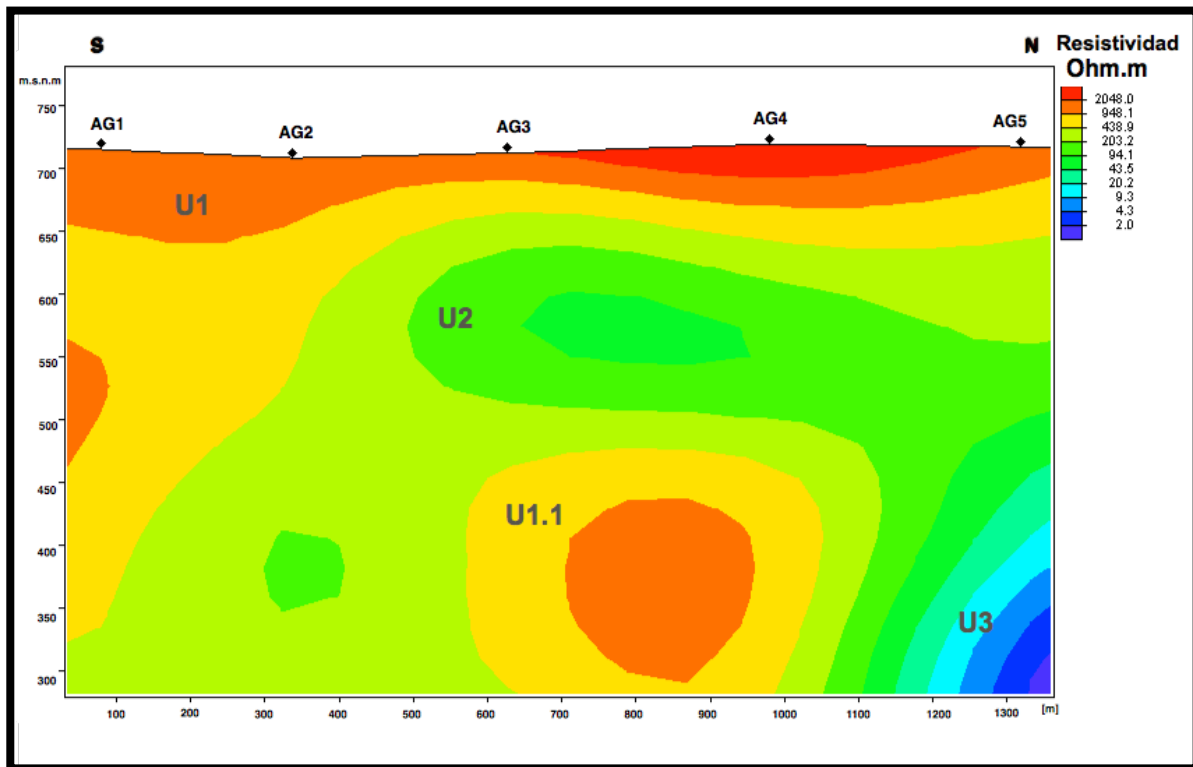


Fig. 6.1. Perfil electromagnético 1.

De acuerdo a los valores de resistividad, en el perfil 1 se distinguen 4 unidades geoelectricas diferentes. La primera unidad, denominada U1, presenta un espesor que varia entre 100 y 170 [m] aproximadamente. Con valores de resistividad que varian entre 600 y 2048 [ohm.m], y que de acuerdo con la verificación geológica realizada en la zona, podemos deducir que se encuentra conformada de calizas y dolomías. En la parte central del perfil, debajo del sondeo AG3, la unidad 1 presenta un estrechamiento, logrando un espesor mínimo, de 100 [m].

La unidad denominada U2, se puede asociar a calizas y dolomías alteradas, presenta valores de menor resistividad, 200 [ohm.m] aproximadamente. El espesor de esta unidad es variable a lo largo del perfil, en la zona sur por debajo

de los sitios AG1 y AG2 varia entre 50 y 150 [m], en la zona central del perfil debajo del sondeo AG3, alcanza un espesor de 200 [m] aproximadamente, mientras que en el norte del perfil disminuye a un rango de espesor de entre 100 y 150 [m].

En la parte central del perfil, con valores resistivos similares a la unidad U1, se encuentra la unidad denominada U1.1, sus valores de resistividad varían de 600 a 1500 [ohm.m], debido a su ubicación, entre los sondeos AG3 y AG4, es posible relacionar a una caverna donde fluye un río subterráneo, que se interconecta a las corrientes que abastecen a la cascada El Aguacero. La U1.1 inicia partir de los 200 [m] de profundidad aproximadamente. En la zona norte del perfil, debajo del sondeo AG5, se distingue una unidad conductora que comienza a partir de los 250 [m] de profundidad, denominada U3, debido a los valores obtenidos de resistividad es posible relacionarla a calizas saturadas.

### 6.1.2 Perfil 2.

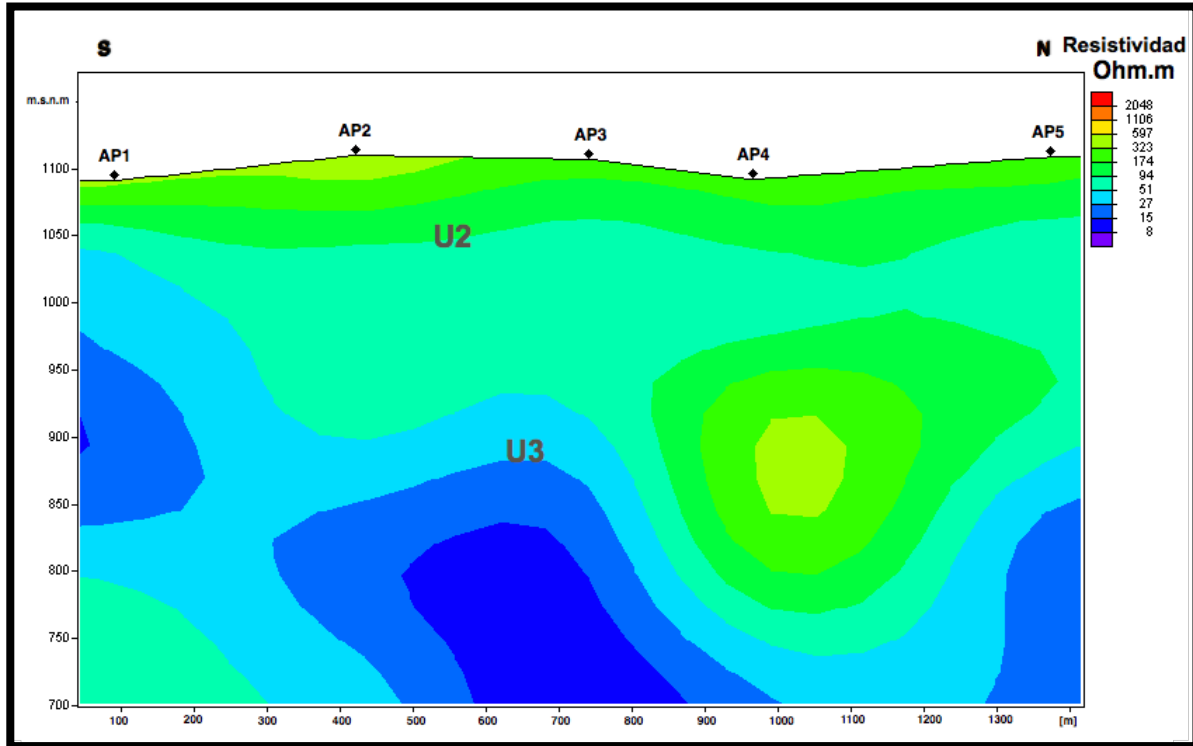


Fig. 6.2. Perfil electromagnético 2.

En el perfil 2, ubicado en la inmediaciones del Antiguo Aeropuerto, se distingue la unidad U2, que se extiende lo largo de la parte somera del perfil. La U2 presenta un espesor de 50 [m] en la zona sur del perfil, debajo del sondeo AP1; mientras que en la zona central llega hasta los 200 m de profundidad, entre los sondeos AP2 y AP3.

La unidad U3 se extiende lo largo de la parte más profunda del perfil. La U3 se encuentra a menor profundidad en la zona sur del perfil, a partir de los 50 [m]. En la zona centro-norte del perfil, entre los sitios AP4 y AP5, la unidad se emplaza hasta los 300 [m] de profundidad. Mientras que en la zona norte del perfil, la unidad emplaza a partir de los 250 [m].



### 6.1.3 Perfil 3.

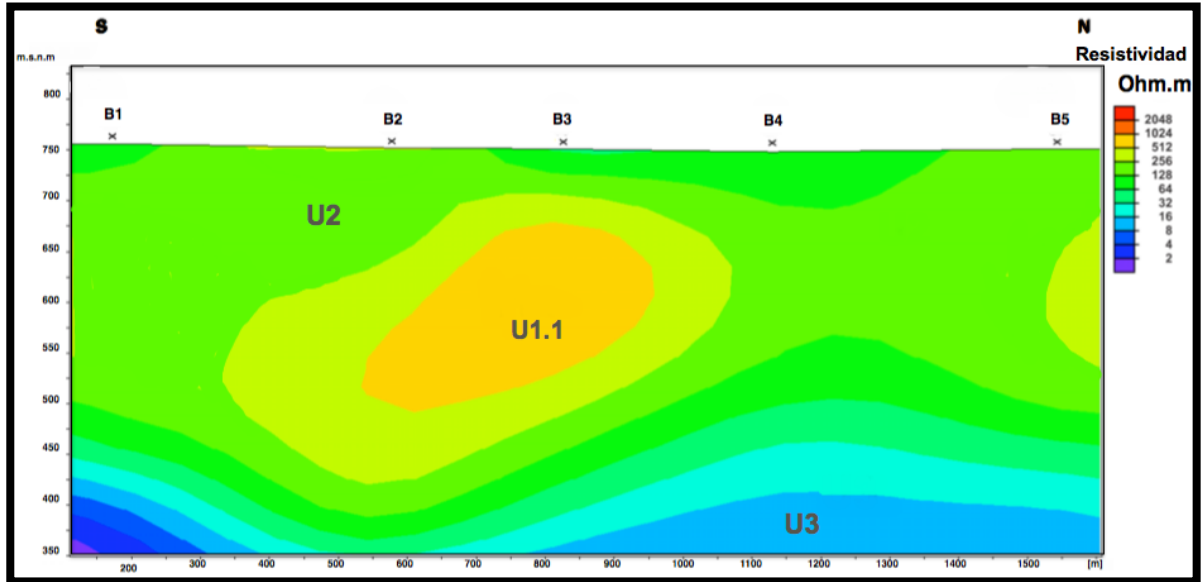


Fig. 6.3. Perfil electromagnético 3.

En el perfil 3, localizado en una zona adyacente a norias y sumideros, cercano al Rancho Tempisque, se distinguen las unidades geoelectricas U1.1, U2 y U3. En la mayor parte del perfil se observa la unidad U2, la cual se asoció a calizas y dolomías alteradas, presenta un espesor que varía entre los 50 y 300 [m], por debajo del sitio B04 es donde presenta mayor espesor.

En la parte central del perfil se encuentra la unidad resistiva U1.1, la cual se puede asociar a la continuación de la caverna por donde fluye un río subterráneo, interconectado a los flujos de agua que abastecen a la cascada El Aguacero.

En la zona más profunda del perfil 3, se encuentra la unidad conductora U3, en la parte norte se presenta a menor profundidad, a partir de los 300 [m]; mientras que al sur del perfil se distingue a partir los 350 [m] de profundidad.

#### 6.1.4. Perfil 4.

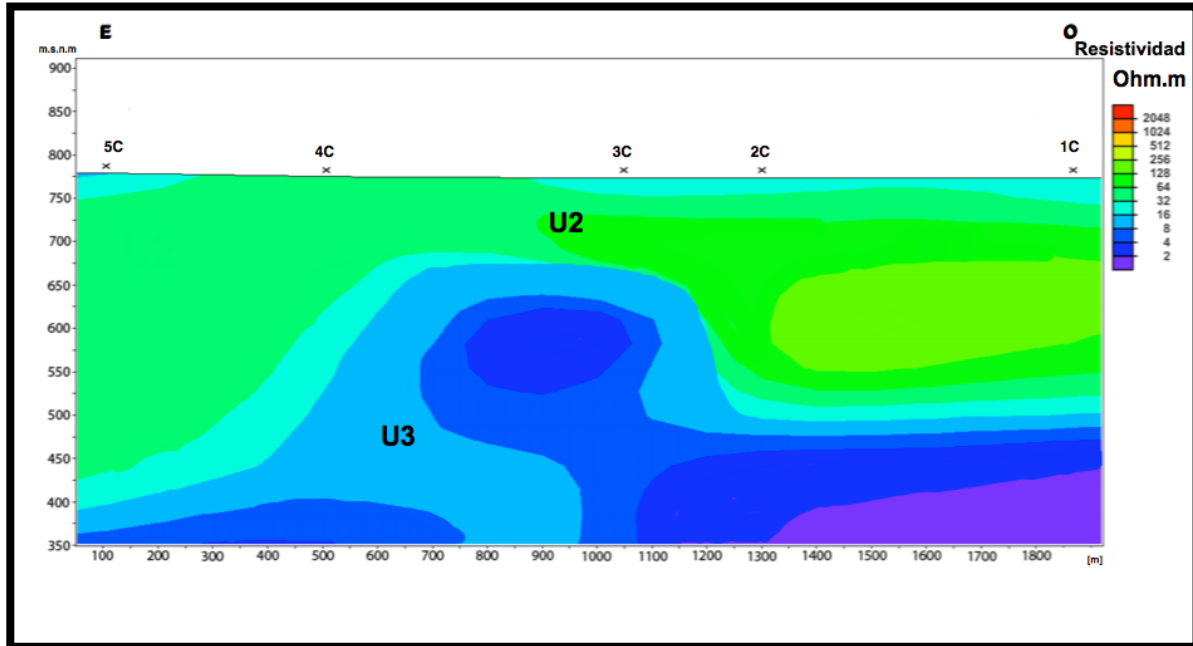


Fig. 6.4. Perfil electromagnético 4.

En el perfil 4, contiguo a los pozos Maseca, Leticia, Jardín y Cielito, se pueden distinguir 2 de las 4 unidades geoelectricas antes descritas. La unidad denominada U2 se ubica en la parte más somera del perfil y se desarrolla a lo largo de todo el perfil 4. La U2 presenta mayor espesor en los extremos del perfil, 300 [m] en la zona Este, y 200 [m] en la zona Oeste. El menor espesor de esta unidad se localiza en la zona central del perfil entre los sitios C03 y C04.

En parte más profunda del perfil 4, se encuentra la unidad conductora denominada U3, la cual podemos relacionar con calizas saturadas, y se desarrolla a lo largo de todo el perfil. En la zona central del perfil, entre los sondeos C03 y C04, la U3 presenta el mayor espesor, 300 [m]. En la zona Este del perfil, la U3 se emplaza

hasta los 250 [m] de profundidad; mientras que en la parte Oeste se sitúa a los 350 [m] de profundidad.

## **Capítulo 7. Conclusiones.**

La zona de estudio fue dividida en 4 de acuerdo a sus capacidades de almacenamiento.

### **Zona 1**

Denominada Antiguo Aeropuerto, topográficamente es un área plana, con zonas de lomeríos, conformada por una serie de sumideros, formados en un ambiente kárstico. La zona se encuentra ampliamente fracturada, fracturas de disolución y algunas fracturas provocadas por un ambiente tectónico. En la entrada de las instalaciones del Antiguo Aeropuerto se tomaron datos estructurales, se observó una familia principal de fracturas NE-SW 40°-50°, dos familias secundarias N-NE 10° y NE-SW 70°-80°, de menor frecuencia hay una tercera familia NW-SE 60°-70° y finalmente se aprecia una familia menor E-W.

Hidrogeológicamente funciona como una zona de recarga, cuyo flujo es predominantemente vertical y descendente y va fluyendo buscando fracturas a diferentes niveles topográficos, prueba de ello es la existencia de manantiales en la zona del valle de Ocozocoautla.

NOMBRE DE REFERENCIA	UTM	
	X	Y
MANANTIAL RANCHO LA ESCONDIDA	463,280.00	1,854,547.00
MANANTIALES INTERCONECTADOS	458,066.00	1,859,798.00
MANANTIAL LA CIENEGA	453,875.00	1,841,506.00

**Tabla 7.1.** Ubicaciones de manantiales de la zona de estudio.



**Fig.7.1.** Manantial La Ciénega.

La interpretación de los sondeos geofísicos electromagnéticos (TEM) indicó que la zona, presenta valores de resistividad que varían entre los 300 y 8 [ohm.m]. No se garantiza un sistema acuífero saturado, por lo menos los primeros 300 [m] de investigación. Cualquier exploración directa o indirecta tendría que ser a mayor profundidad para localizar un almacenamiento. El sondeo medio (AP3) del perfil 2 realizado en la zona del Antiguo Aeropuerto es una zona que muestra una

anomalía relacionada a una zona de saturación que se recomienda profundizar en investigación.

Cabe destacar la existencia de una obra subterránea localizada en el Antiguo Aeropuerto, pero se desconocen los datos de construcción y operación. Podría ser un indicador de la presencia de un nivel saturado.

Esta área es un zona de tránsito de agua subterránea hacia la parte baja que a mayor profundidad convertirá el flujo en horizontal hasta encontrar un zona saturada.

Cualquier aprovechamiento ubicado en esta zona sería de muy bajo rendimiento.

## **Zona 2**

El poblado de Ocozocoautla de Espinosa se encuentra en una área de depósitos aluviales de poco espesor donde se encuentran ubicados varios alumbramientos someros tipo norias cuya profundidad oscila entre 6 y 9 [m]. Debajo de estos rellenos se encuentran las calizas de la formación Sierra madre, de acuerdo al marco conceptual de funcionamientos es probable que los volúmenes infiltrados de la zona alta (Antiguo Aeropuerto) viertan parte de ese volumen a través de las estructuras y aporten agua a estas zonas de aluvión.

Las obras en esta zona presentan niveles freáticos que varían entre 1.65 y 80 [m], cuyo rendimiento está en función del grado de fracturamiento de la zona basal carbonatada en contacto con los aluviones. Los caudales reportados en estas zonas son muy bajos, menores a 1 [l/s].

No se cuenta con exploración geofísica ni perforaciones profundas en este sitio.

En la medida en la que el área de recarga (Antiguo Aeropuerto) siga estando protegida, esta zona continuará con el aporte histórico.



**Figs. 7.2** Noria Belsaín y Noria Parque Ecológico, ubicadas en la zona 2.

### **Zona 3**

La zona ubicada al poniente de Ocozocoautla de Espinosa donde se encuentran los perfiles geofísicos 1 y 3, presenta depósitos aluviales y es el área donde la red de fracturas es el principal conducto por el que fluye el agua a través de corrientes subterráneas, prueba de ello, es la Noria El Espinal. De acuerdo al funcionamiento hidrogeológico, los sumideros localizados en esta área presentan flujo subterráneo errático que dificulta la localización de nuevas obras.

Es seguro que a cierta profundidad exista una red de escurrimiento que se interconecta y aumenta el caudal a diferentes niveles topográficos, evidencia de esto es el pozo el Encanto perforado a 96 [m] con un nivel estático de 80 [m], el Encanto está localizado sobre un área de cavernas cuyo flujo proviene de noreste

hacia Ocozocoautla de Espinosa. Los volúmenes no son tomados del almacenamiento de un acuífero si no del escurrimiento de dicha red, la cual descarga su volumen total en la cascada El Aguacero.



**Fig.7.3.** Pozo de abastecimiento El Encanto. Localizado en 444134 E, 1852758 N.

Los perfiles geofísicos 1 y 3 muestran a mayores profundidades la presencia de posibles flujos. Sin embargo la exploración en el perfil 1 corroboró la presencia de cavernas asociado al pozo el Encanto.



**Fig. 7.4.** Entrada caverna de abastecimiento al Pozo El Encanto.

#### Zona 4.

La zona localizada al sur-oeste de Ocozocoautla, donde se ubica el perfil geofísico 4, cuenta con depósitos aluviales de mayor espesor y tiene la singularidad de que se localiza en un estrechamiento en el que se juntan volúmenes tanto superficiales como subterráneos en cavernas.

REFERENCIA	UTM	
	X	Y
POZO LETICIA	455,757.00	1,845,795.00
POZO MASECA	455,787.00	1,845,637.00
POZO JARDIN. GRUPO ROMA	455,932.00	1,845,357.00
POZO DE ABSTECIMIENTO CIELITO	456,027.00	1,845,938.00

**Tabla 7.2.** Pozos ubicados en la zona 4.

De acuerdo a la exploración geofísica el perfil 4, muestra entre los sondeos 3 y 4 valores de baja resistividad, entre 2 y 8 [ohm.m], asociados a flujo subterráneos en zonas kársticas.



## 7.1. Recomendaciones.

- Mantener el área de lomeríos altos denominada Antiguo Aeropuerto como zona protegida y llevar a cabo acciones de recuperación, es decir, volviendo a cubrir de vegetación la tierra con especies apropiadas, esto debido a que es la principal zona de recarga del área de estudio. “La importancia que tiene la restauración ecológica se deriva de la existencia generalizada de distintas formas de degradación de los recursos naturales y las condiciones ambientales, que tienen su manifestación en aspectos tales como la pérdida de vegetación y suelos, aguas contaminadas; contaminación atmosférica...” (Gálvez, 2002, p.4)
- De acuerdo a la geología y a la exploración geofísica, la zona donde se ubica el perfil 4 es la mejor zona para abastecimiento de agua potable al poblado de Ocozocoautla de Espinosa, en donde en caso de requerirse mayores caudales es necesario ampliar la exploración geofísica a 2 perfiles más con sondeos Transitorios Electromagnéticos de las mismas características usadas en este estudio (bobina cuadrangular con dimensiones de 150 x 150 m, arreglo *bobina simple*) con la finalidad de hacer una localización de pozos puntal probablemente a mayor de 100 m.

- En la zona del Valle de Ocozocoautla, denominada zona 2 en las conclusiones, se sugiere continuar con la extracción de agua sin aumentar el número de excavaciones.
- Para el área en la zona del pozo Encanto, se sugiere la perforación de 1 o 2 pozos adicionales al existente para formar una batería que abastezca una nueva línea hacia Ocozocoautla de Espinosa, sin que sea drenada en su paso hacia el poblado. La idea de colocar esta batería es porque existe la capacidad en épocas de lluvias, pero en épocas de estiaje se recomienda dejar de funcionar 1 o 2 pozos para que no drene demasiado y no impacte la salida subterránea natural denominada cascada el Aguacero.
- Se sugiere la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, cuyo objetivo sea preservar la calidad del agua, antes de su descarga a ríos y cuerpos de agua, tales como el río La Venta. “La importancia de regresar el agua que tomamos de la naturaleza en una condición ‘aceptable’ para que siga su camino dentro del gran ciclo hidrológico de nuestro país y de nuestro planeta, tiene que ver con un aspecto práctico e inmediato de abasto aquí y ahora para nuestras crecientes ciudades, tanto como con la posibilidad de que en un futuro muy cercano nuestros hijos y nietos no puedan contar con reservas de agua apropiadas para consumo humano, anulando su probabilidad de

sobrevivencia junto con la de especies animales y vegetales que lo acompañan” (Lahera, 2010).

# ANEXO 1

Sitios visitados durante los días del 11 al 13 de abril de 2013.

Punto No. 1. Restaurant Casa de Adobe.

Noria. Localización: 0460560 E, 1852946 N, nivel estático 5.36 m, diámetro de 1.36 m, profundidad aproximada de 6.5 m, bomba de 1½ “.

Punto No. 2. Carretera hacia Villa Flores, acceso a la Colonia El Espinal.

Pozo seco. Localización 0456802 E, 1847562 N.

Punto No. 3. Pozo Leticia. Localización 455757 E, 1845795 N. profundidad total 100 m. nivel estático 6.70 m, nivel dinámico 14.90 m, diámetro de la tubería de descarga 8”, posteriormente cambia a 10”, longitud de columna de bombeo 50 m.



**Fig A.1.** Pozo Leticia.

Punto No. 4. Pozo Maseca. Localización 455787 E, 1845637 N, diámetro de la tubería de descarga 10”.



**Fig. A.2** Pozo Maseca.

Punto No. 5. Pozo Jardín. Grupo Roma. Abastecimiento a Ciudad Bonampak. Localización 455932 E, 1845357 N, diámetro de tubería de descarga 6”, después aumenta a 8”.



**Figs. A.3** Pozo Jardín.

Punto No. 6. Noria Finca Reforma. Nivel estático 7.05 m, profundidad total 19 m, diámetro 1.60 m, diámetro de tubería de descarga 2". Uso riego de árboles frutales.



**Figs. A.4.** Noria Finca Reforma.

Punto No. 7. Noria Colonia La Ceiba. Localización 455536 E, 1841506 N, nivel dinámico 3.30 m, diámetro de 1.20 m, diámetro de tubería de descarga 2”.



**Figs. A.5.** Noria La ceiba.

Punto No. 8. Manantial La Ciénega. Localización 453875 E, 1841506 N, caliza más kárstica, con un patrón de fracturamiento bien definido, presencia de mayor porosidad, cambio de pendiente abrupto.



**Fig. A.6** Manantial La Ciénega.

Punto No. 9. Pozo de abastecimiento Cielito. Localización 456027 E, 1845938 N. Diámetro de descarga de 8”, después aumenta a 10”. El bombeo actual es de 75 lps, el aforo dio 100 lps, la profundidad total aproximada del pozo es de 100 m, la cámara de bombeo tiene 52 m. Bomba de 200 hp 1777 rpm. Nivel dinámico 14.35 m. Pozo perforado en 1975.





**Figs. A.7.** Pozo Cielito.

Punto No. 10. Corte geológico. Localización 458767 E, 1851371 N.



Flanco derecho, SW 66° con 27°, mudstone parcialmente dolomitizado, en estratos de 8 a 43 cm y hasta 68 cm, interestratificados con lutitas de 5 a 15 cm de espesor.

Flanco izquierdo, SE 63° con 22°, fracturas perpendiculares a la estratificación dando forma de fragmentos cúbicos.

Datos estructurales del Punto No. 10.:

Rumbo de fracturas con planos verticales

NE 10°	SE 70°	NE 12°	NE 80°
SE 85°	SE 62°	NE 50°	SE 75°
NE 70°	SE 32°	NE 20°	SE 80°
E-W	NE 5°	SE 35°	NE 15°
NE 50°	NE 65°	NW 15°	NE 30°
NE 20°	NE 70°	SE 85°	E-W
NE 40°	NE 68°	NE 36°	

Fracturamiento perpendicular a la estratificación W 67° inclinación al N.

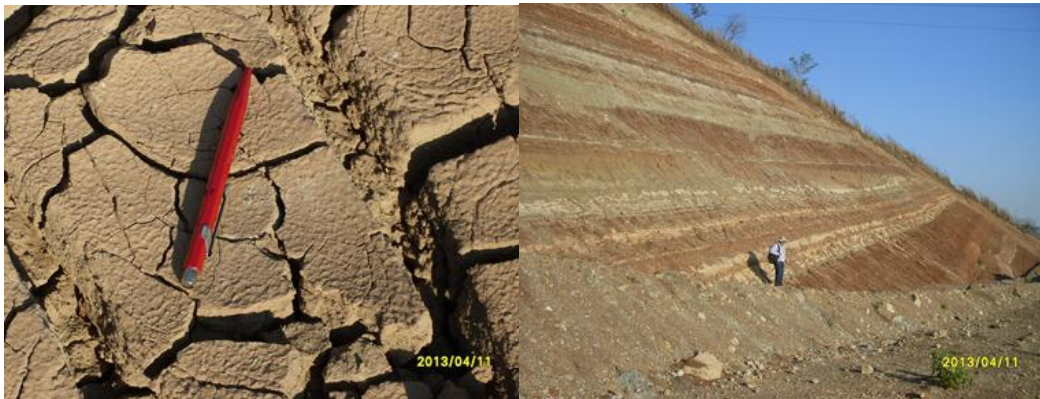
RUMBO	INTENSIDAD	CUADRANTE
NW 76°	78°	N
NW 86°	75°	NE
SW 85°	90°	
SW 75°	90°	

SW 82°	78°	S
NE 76°	88°	SE
NE 80°	82°	SE
W 90°		
NE 86°	74°	SE
SE 85°	57°	SW
SE 80°	59°	SW
SE 8°	90°	
SW 86°	73°	SE
SE 30°	90°	
SW 10°	90°	
SE 40°	88°	SW
NE 70°	65°	SE
SE 20°	90°	
NE 75°	90°	
SE 80°	90°	
NE 70°	90°	
NE 62°	90°	

NE 77°	90°	
NE 78°	90°	

Estrías SW 60°, 90° de inclinación, 58° en sentido pitch horario. Espesores de 31, 27, 18, 50 y 65 cm. Coloración rojiza por oxidación. Hacia la cima existen de 2 a 3 m donde no existe influencia de terrígenos, la coloración es más clara y es menor la densidad de fracturamiento.

Punto No. 11. Formación Soyaló. Localización 462906E, 1850763 N. Lutita interestratificada hacia la parte superior con caliza (NW 30° con 15° al NE).



**Figs. A.9.** Formación Soyaló.

Punto No. 12. Noria seca, localizada en el camino a la entrada al antiguo aeropuerto (escuela Nacional de Protección Civil) 463838E, 1852480 N, profundidad total de 9.0 m, diámetro de 1.84 m.



**Figs. A.10.** Noria cercana a la entrada del antiguo Aeropuerto.

Punto No. 13. Pozo Escuela Nacional de Protección Civil. Localización 461580E, 1854039 N. perforado aproximadamente en 1986, no se tiene dato del nivel al agua subterránea. Profundidad de 200 m, diámetro de succión de 2", diámetro de descarga de 3", llena 8 tanques de 40,000 litros. Bombea 90,000 litros diarios.



**Figs. A.11.** Pozo Escuela Nacional de Protección Civil.

Punto No. 14. Afloramiento afuera de la Escuela Nacional de Protección Civil. Localización 461661E, 1853833 N. Caliza color ocre-gris claro al intemperie, color crema al fresco, wackstone –packstone, espesores amalgamados de 27, 55 y 50 cm de estratificación horizontal.



**Figs. A.12.** Afloramiento afuera de la ENPC.

Punto No. 15. Bajada a Ocozocoautla de Espinosa. Estratos con dirección al W con inclinación de  $17^\circ$  al N, espesores de 1.5, 0.5 y 1.10 m de limolitas, interestratificadas con caliza arcillosa, amalgamados con horizontes de 50, 10, 11, 12, 3, 7 y 6 cm. Fracturamiento NW  $85^\circ$  con  $62^\circ$ , N  $88^\circ$  al E.



**Figs. A.13.** Afloramiento estratificado rumbo a Ocozocoautla de Espinosa.

Punto No. 16. Pozo de abastecimiento El Encanto. Localizado en 444134 E, 1852758 N, profundidad de 96 m, gasto de 37 lps, cámara de bombeo de 88 m, profundidad al nivel estático 80 m, el agua esta siendo tomada de una caverna, diámetro de la tubería de succión de 6", diámetro de la tubería de descarga de 8", el agua se conduce alrededor de 20 km, bomba de 150 HP.



**Figs.A.14.** Pozo El Encanto.

Punto No. 17. Entrada caverna de abastecimiento al Pozo El Encanto. Localización 444046 E, 1852770 N. La roca presenta es una dolomía con porosidad vugular y fracturamiento.



**Figs.** Caverna de abastecimiento al Pozo El Encanto.



Punto No. 18. Conglomerado de Cuarzo. Camino a la Sima de las Cotorras. Localización 4571687 E, 1856867 N. Conglomerado grano soportado de matriz arenosa, compuesto de fragmentos de cuarzo lechoso, gris oscuro (metamórfico); fragmentos de feldespato potásico con cuarzo (intercrecimiento perfitico); fragmentos de conglomerado cementado por sílice, también compuesto de cuarzo.

El cuarzo es de color ocre (jaspe) bien seleccionado y clasificado. La geomorfología del depósito son lomas dispersas con profunda disección. Posible Formación El Bosque, espesor aproximado de 150 m. seguramente nos encontramos en la fase distal, no hay fragmentos de calizas o de material ígneo. Color al intemperie gris y al fresco crema.



**Figs. A.15.** Conglomerado de cuarzo.

Punto No. 19. Camino a la Sima de las Cotorras. Localización 451575 E, 1861144 N. Conglomerado con fragmentos subredondeados de dolomía y caliza mudstone, varía en tamaños de 3 mm hasta 8 cm. Color rojizo.



**Figs. A.16.** Conglomerado con fragmentos subredondeados de dolomía y caliza mudstone.

Punto No. 20. Comunidad Piedra Parada. Contacto entre la caliza de coloración beige y el conglomerado de cuarzo. Localización 454041 E, 1860971 N. rumbo NE 40° con 6° al SE.

Punto No. 21. Camino Ocuilapa-Ocozocoautla. Localización 457904 E, 1857585 N. Conglomerado, con espesor de 1.10 m, fragmentos de 2 hasta 35 mm de cuarzo lechoso redondeado, matriz soportada de arena, interestratificación de 20 cm de arenisca conglomerática.

Presenta imbricación, vector NE 30° con 22°. Estratificación con orientación SE 45° con 20° al NE. Planos de fracturamiento SW 70° con 80° al NW, Se 50° con 81° al SW.



**Figs. A.17.** Contacto entre caliza conglomerado de cuarzo.

Punto No. 22. Noria SAPAM. Localización 460465 E, 1852909 N, diámetro 1.25 m, profundidad total 6.10 m.



**Figs. A.18.** Noria SAPAM.

Punto No. 23. Ojo de Agua. Localización 460943E, 1851771 N, varía de 1 a 8 lps, en alguna época del año llega a secarse. Noria cercana (Trinidad Ruíz Garcia) nivel estático 3.47 m, diámetro 1.10 m, se encuentra en calizas gruesas.



**Fig. A.19.** Noria Trinidad Ruíz García.

Punto No. 24. Noria Belsaín. Localización 461281 E, 1851668 N, nivel estático 3.90 m, diámetro de 2.10 m, diámetro de la tubería de descarga de 1”.



**Fig. A.20.** Noria Belsaín.

Punto No. 25. Pozo Belsaín. Localización 461255 E, 1851684 N, profundidad al nivel estático 9.40 m, diámetro de ademe 10". El pozo no funciona.



**Fig. A. 21.** Pozo Belsaín.

Punto No. 26. Noria Parque Ecológico. Localización 460419 E, 1853560 N, profundidad al nivel estático 1.70 m.



**Fig. A.22.** Noria Parque Ecológico.

# Bibliografía.

**Antigüedad I.**, 2000. *El acuífero kárstico: Metodología de investigación y protección de sus recursos*. Sedeck 1.

**Bakalowicz, M.** 2005. *Karst groundwater: a challenge for new resources*. Hydrogeology Journal. 13:1: 148-160.

**Castillo, González, L.A.** (2012). Estudio de factibilidad hidrogeológica en la porción sur oriente de la ciudad de San Juan del Rio. Qro, con la aplicación de métodos electromagnéticos. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Christensen N. B.**, 1995. *1D imaging of central loop Transient electromagnetic soundings*. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 0:1: 53-66.

**Constable, S.C., Parker, K.L., Constable, C.G.**, 1987. *Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data*. Geophysics, 52:3: 289-300.

**De la Rosa Z. J.L., et al.** 1989. *Geología del estado de Chiapas*.

**Fetter, C. W., & Fetter, C. W.** (2001). *Applied hydrogeology* (Vol. 3, No. 3). New Jersey: Prentice hall.

**Flores Luna, C.**, 2000. *La exactitud del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios*. Geos. 20:2: 70-88.

**Freeze**, R.A., & J.A. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall.

**Gasulla**, Forner, M.1999. *Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales*. (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya.

**Guzmán-Speziale**, M., & Meneses-Rocha, J. J. (2000). *The North America–Caribbean plate boundary west of the Motagua–Polochnic fault system: a fault jog in Southeastern Mexico*. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4), 459-468.

**Kanamori**, H., Stewart, G., 1978. *Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976*. *J. Geophys. Res.* 83, 3427-3434.

**Lahera**, Ramón V. 2010. *Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales*. *Quivera*, 12:2: 58-69.

**Martínez**, Navarrete C., García, García A, 2003. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano: metodología y aplicación al territorio*. IGME, 282 p.

**Nabighian**, M. N., & Macnae, J. C. (1991). *Time domain electromagnetic prospecting methods*. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 2 (part A), 427-509.

**Plafker**, G., 1976. *Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February 1976*. *Science* 193, 1201-1208.

**Reynolds**, Vargas, J. 2002. *Manejo integrado de aguas subterráneas: un reto para el futuro*. Euned.

**Ruiz Arriaga, D.** (2014). *Actualización del mapa geológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Spies B.R., Eggers, Dwight E.,** 1986. The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *Geophysics.* 51:7.

**Stokes, T., Griffiths, P., & Ramsey, C.** (2010). Karst Geomorphology, Hydrology, and Management. *Compendium of forest hydrology and geomorphology in British Columbia.* BC Min. For. Range, 66, 373.

**Tipler, P. A., & Mosca, G.** (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (Vol. 2). Reverté.

**Ward, S. H., & Hohmann, G. W.** (1988). *Electromagnetic theory for geophysical applications.* *Electromagnetic methods in applied geophysics,* 1, 131-311.

**White, R.A.,** 1985. The Guatemala earthquake of 1816 on the Chixoy-Polochic Fault. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, 455-473.

**White, W. B.** (2002). *Karst hydrology: recent developments and open questions.* *Engineering geology,* 65(2), 85-105.

**Wightman, W. E., Jalinoos, F., Sirles, P., & Hanna, K.** (2003). *Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems.* Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IF-04-021, Lakewood.

**Zozaya, A.J.** 2013. *Ecuaciones de Maxwell.*



## **Referencias web**

[www.conagua.gob.mx/](http://www.conagua.gob.mx/)

[www.imta.gob.mx/](http://www.imta.gob.mx/)

<http://winglink.software.informer.com/>

[www.worldbank.org/depweb/spanish/modules/environm/water](http://www.worldbank.org/depweb/spanish/modules/environm/water)

<http://www.interpex.com>

[www.cajondeciencias.com](http://www.cajondeciencias.com)

[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)

<http://www.hgiworld.com/methods/electromagnetic/>

<http://oit.williams.edu/elc/garmin-etrex/>