

03060 1
26



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



**UNIDAD ACADEMICA DE CICLOS PROFESIONALES
Y DEL POSGRADO DEL C C H.
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFISICA**

**POSGRADO
EN CIENCIAS
DE LA TIERRA**

**"PARAMETROS ESTRUCTURALES QUE CONTROLAN LA
HIDRODINAMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN EL
AREA DE ZMAPAN HGO."**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

(AGUAS SUBTERRANEAS)

P R E S E N T A

JOSE ALFREDO RAMOS LEAL

CIUDAD UNIVERSITARIA

JULIO, 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

TESIS

COMPLETA

Esta tesis se la dedico a mis padres

Engracia Leal González

Emiliano Ramos Morales

a mis hermanos

María de Jesús

Martha Elva

Francisco Arturo

Juan Antonio

José Raúl

a mi abuelo

Sebastián Leal Reyes

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Ramiro Rodríguez Castillo por su asesoría en el desarrollo del presente trabajo, sus comentarios y sugerencias fueron muy importantes para la culminación del mismo.

Agradezco a los Drs. Ma. Aurora Armienta Hernández, Tomas González, Miguel Carrillo Martínez y al M. en C. Diego A. Córdoba Méndez miembros del jurado examinador, por sus comentarios y sugerencias en la revisión de esta tesis.

Parte de esta investigación se desarrolló paralelamente con el proyecto binacional Research Experience for Undergraduates (REU) de la National Science Foundation y el IGF de la UNAM. La interacción con las Dras. Lois Ongley, Helen Mango, Allison Laphrop y los estudiantes participantes, fue de gran ayuda para la realización de este trabajo.

También agradezco a los Ings. Alfonso García Escobar, Arturo Castro García, Erik Morales Cacique, Jacobo Guinzber Belmont y José Estrada, por su grata compañía y comentarios en los recorridos de campo.

De la misma manera quiero agradecer a la Dra. Guadalupe Villaseñor, al Ing. Martín Díaz, al Ing. Kinardo por sus comentarios y sugerencias.

A los Ings. Antonio Morales M., Félix Serrano y Marcelino González de la Comisión Nacional del Agua por las facilidades otorgadas en la compilación de la información de trabajos anteriores relacionados con el área de estudio.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN

- 1.1.- OBJETIVOS
- 1.2.- GENERALIDADES
 - 1.2.1.- LOCALIZACIÓN
 - 1.2.2.- VÍAS DE ACCESO
 - 1.2.3.- ANTECEDENTES
- 1.3.- MÉTODO DE TRABAJO
- 1.4.- CARACTERÍSTICAS DESCRIPTIVAS
 - 1.4.1.- FISIOGRAFÍA
 - 1.4.2.- GEOMORFOLOGÍA
 - 1.4.3.- CLIMA
 - 1.4.4.- HIDROGRAFÍA

II. GEOLOGÍA

- 2.1.- SISTEMA JURÁSICO
 - 2.1.1.- FORMACIÓN LAS TRANCAS
- 2.2.- SISTEMA CRETÁCICO
 - 2.2.1.- FORMACIÓN SANTUARIO
 - 2.2.2.- FORMACIONES ABRA - EL DOCTOR
 - 2.2.3.- FORMACIÓN TAMAULIPAS SUPERIOR
 - 2.2.4.- FORMACIÓN SOYATAL
- 2.3.- SISTEMA TERCIARIO
 - 2.3.1.- CONGLOMERADO EL MORRO
 - 2.3.2.- FORMACIÓN TARANGO
 - 2.3.3.- ROCAS VOLCÁNICAS
 - 2.3.4.- ROCAS INTRUSIVAS
 - 2.3.5.- PERIODO CUATERNARIO
 - 2.3.5.1.- CONGLOMERADO ZIMAPÁN
 - 2.3.5.2.- SEDIMENTOS RECIENTES

III. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

- 3.1.- PLIEGUES
- 3.2.- FALLAS Y FRACTURAS

IV. GEOHIDROLOGÍA

- 4.1.- CENSO DE APROVECHAMIENTOS
- 4.2.- CARACTERÍSTICAS GENERALES
- 4.3.- UNIDADES GEOHIDROLÓGICAS
- 4.4.- DIRECCIONES DE FLUJO
- 4.5.- MODELO CONCEPTUAL
- 4.6.- HIDROGEOQUÍMICA
- 4.7.- HIDROGEOQUÍMICA DEL ARSÉNICO
 - 4.7.1.- FUENTES NATURALES DEL ARSÉNICO EN EL ÁREA DE ZIMAPÁN
 - 4.7.2.- CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICA DEL ARSÉNICO
 - 4.7.3.- MODELO HIDRODINAMICO PARA EL ARSÉNICO

V. PARAMETRIZACION HIDROGEOLOGICA

- 5.1.- MÉTODOS DIRECTOS
 - 5.1.1.- MÉTODOS DIRECTOS EN LABORATORIO
 - 5.1.2.- MÉTODOS DIRECTOS "IN SITU"
- 5.2.- MÉTODOS INDIRECTOS
 - 5.2.1.- USO DE TABLAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
 - 5.2.2.- FÓRMULAS EMPÍRICAS
 - 5.2.3.- MÉTODOS GEOFÍSICOS
 - 5.2.4.- MÉTODOS ESTRUCTURALES APLICADOS AL ANÁLISIS DE FRACTURAS
 - 5.2.5.- RELACIONES ENTRE MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS Y UNIDADES GEOHIDOLÓGICAS EN EL ÁREA DE ZIMAPÁN.

VI. MEDICIÓN DE FRACTURAS

- 6.1.- SECCIÓN 1
- 6.2.- SECCIÓN 2
- 6.3.- SECCIÓN 3
- 6.4.- SECCIÓN 4
- 6.5.- SECCIÓN 5
- 6.6.- ANALISIS DE LAS VARIACIONES DE K OBTENIDAS

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 7.1.- CONCLUSIONES
- 7.2.- RECOMENDACIONES

VIII. ANEXOS

- 8.1.- ANEXO A (CENSO DE APROVECHAMIENTOS)
- 8.2.- ANEXO B (COMPILACION DE MUESTREOS DE ARSENICO 1990-1995)
- 8.2.- ANEXO C (PARÁMETROS DEL TENSOR DE CONDUCTIVIDADES Y DATOS DE FRACTURAS)
- 8.2.- ANEXO D (DATOS DE FRACTURAS PARA ROSETAS DE FRACTURAMIENTO)

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

- Figura 1.1.- Localización del área de estudio
- Figura 1.2.- Fisiografía del área de estudio
- Figura 1.3.- Clima de la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 1.4.- Temperatura y precipitación de la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 1.5.- Hidrografía de la cuenca hidrográfica del Tolimán

CAPITULO II

- Figura 2.1.- Geología del área de estudio
- Figura 2.2a.- Sección geológica A-A'
- Figura 2.2b.- Sección geológica B-B'
- Figura 2.2c.- Sección geológica C-C'
- Figura 2.3a.- Sección geológica I-I'
- Figura 2.3b.- Sección geológica II-II'
- Figura 2.3c.- Sección geológica III-III'
- Figura 2.3d.- Sección geológica IV-IV'

CAPITULO III

- Figura 3.1.- Mapa que muestra los principales rasgos estructurales del área de estudio y localización de secciones.
- Figura 3.2.- Localización de roseta de fracturamientos

CAPITULO IV

- Figura 4.1.- Localización de aprovechamientos
- Figura 4.2.- Elevación del nivel estático
- Figura 4.3.- Diagramas de Piper para acuífero en calizas fracturadas
- Figura 4.4.- Diagramas de Piper para acuífero en rocas volcánicas
- Figura 4.5.- Diagrama de Shoeller para acuífero en calizas fracturadas
- Figura 4.6.- Diagrama de Shoeller para acuífero en rocas volcánicas
- Figura 4.7.- Diagramas de Stiff para muestras de agua en la cuenca del Tolimán
- Figura 4.8.- Distribución espacial de iones de Potasio en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.9.- Distribución espacial de iones de Magnesio en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.10.- Distribución espacial de iones de Calcio en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.11.- Distribución espacial de cloruro en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.12.- Distribución espacial de iones de sulfatos en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.13.- Distribución espacial de iones de Sodio en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.14.- Distribución espacial de iones de HCO_3 en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.15.- Distribución espacial de sílice en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.16.- Distribución espacial de Arsénico en la cuenca hidrográfica del Tolimán
- Figura 4.17a.- Diagrama de composición de SO_4/STD
- Figura 4.17b.- Diagrama de composición de Ca/STD
- Figura 4.17c.- Diagrama de composición de HCO_3/STD
- Figura 4.18a.- Diagrama de composición de K/STD
- Figura 4.18b.- Diagrama de composición de Mg/STD
- Figura 4.18c.- Diagrama de composición de Na/STD

- Figura 4.18d.- Diagrama de composición de Cl/STD
 Figura 4.19a.- Diagrama de composición de Mg/Cl
 Figura 4.19b.- Diagrama de composición de Na/Cl
 Figura 4.19c.- Diagrama de composición de Ca/Cl
 Figura 4.19d.- Diagrama de composición de K/Cl
 Figura 4.20a.- Diagrama de composición de As/SiO₂
 Figura 4.20b.- Diagrama de composición de SO₄/SiO₂
 Figura 4.20c.- Diagrama de composición de Mg/SiO₂
 Figura 4.20d.- Diagrama de composición de SO₄/As
 Figura 4.21.- Cuerpos mineralizados en Zimapan
 Figura 4.22.- Gráfica de precipitación media mensual durante un año hipotético en el Pozo El Muhi
 Figura 4.23.- Gráfica de precipitación media mensual en los periodos de 1992-1995, en el Pozo El Muhi
 Figura 4.24.- Oxidación del cuerpo mineralizado durante el periodo de secas.
 Figura 4.25.- Transporte de altas concentraciones de As durante y después de la temporada de lluvias
 Figura 4.26.- Captación de aguas con altas concentraciones de As en pozos

CAPITULO V

- Figura 5.1.- Pruebas Lugeón
 Figura 5.2.- Pruebas de Absorción Nasberg
 Figura 5.3.- Pruebas de Absorción Matzuo-Akai
 Figura 5.4.- Transformación de coordenadas esféricas a cartesianas, X, Y, Z.

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO II

- Tabla 2.1.- Tabla de correlación estratigráfica

CAPITULO IV

- Tabla 4.7.1.- Minerales con Arsénico en la región de Zimapan
 Tabla 4.7.2.- Relación de tipos de rocas y concentraciones de Arsénico

CAPITULO V

- Tabla 5.1 Relación de métodos para obtener la conductividad hidráulica y las Unidades Hidrogeológicas de Zimapan

CAPITULO VI

- Tabla 6.1.- Estadísticas de los valores de *aii* en la sección 1
 Tabla 6.2.- Estadísticas de los valores de *aii* en la sección 2
 Tabla 6.3.- Estadísticas de los valores de *aii* en la sección 3
 Tabla 6.4.- Estadísticas de los valores de *aii* en la sección 4
 Tabla 6.5.- Estadísticas de los valores de *aii* en la sección 4*
 Tabla 6.6.- Resumen de valores de conductividad hidráulica (K) utilizando los diferentes métodos estructurales en calizas fracturadas.

INTRODUCCIÓN

1.1.- OBJETIVOS

El presente estudio tiene como finalidad aportar datos que indiquen zonas favorables para la explotación de agua subterránea de buena calidad, para lo cual se tiene contemplado cumplir con los siguientes objetivos.

- Construcción de redes de flujo del agua subterránea en el área de estudio.
- Proponer un esquema del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.
- Analizar las metodologías de determinación de la conductividad hidráulica.
- Establecer los mecanismos de migración del Arsénico en el área de interés.

1.2- GENERALIDADES

El presente trabajo se analizará la hidrodinámica del sistema acuífero de Zimapán, Hidalgo, para contribuir a un manejo más adecuado del mismo. Para lo cual se presentará un modelo conceptual del funcionamiento geohidrológico del o los acuíferos.

Dada las necesidades de abastecimiento de agua de buena calidad en el municipio de Zimapán durante la década de los 80's, se perforaron algunos pozos profundos para dicho fin. Aparentemente el problema de abastecimiento de agua de este municipio fue solucionado, sin embargo a finales de la década de los 80's, a raíz de los brotes de cólera en diferentes regiones de la República mexicana, la Comisión Nacional del Agua (CNA) realizó muestreos de agua en el municipio de Zimapán, con el fin de detectar la bacteria del cólera, realizó análisis bacteriológicos y químicos, en estos últimos se incluía el Arsénico (As). Los resultados de estos análisis llegaron a la conclusión de que no se tenían brotes de la bacteria del cólera y las concentraciones de As para el agua en algunos pozos y norias rebasaban por mucho las normas de calidad del agua para consumo humano. Estudios posteriores confirmaron que 4 de los principales pozos de abastecimiento y algunas norias contenían valores altos de As.

Actualmente las autoridades han retomado nuevamente el problema de abastecimiento de agua de buena calidad, motivo por el cual la CNA determinó la perforación de cuatro pozos profundos, de los cuales dos no tuvieron el caudal suficiente para satisfacer la demanda de agua de buena calidad y el tercer pozo que aunque tenía el caudal suficiente presentó problemas para su explotación por la oposición de las autoridades locales del poblado de Temuthé y el último pozo (San Pedro) produce al menos 8 lps.

1.2.1.- LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra localizada en los límites de los Estados de Hidalgo y Querétaro. Tiene como límites geográficos los paralelos 20°37.0'-20°53.4' latitud Norte y

los meridianos 99°29.0'-99°15.0' de longitud Oeste (fig. 1.1), en coordenadas geográficas y 450 000 - 474 000 en X, 2 280 000 - 2 310 000 en Y para coordenadas U.T.M., siendo estas últimas la que se utilizaron para las diferentes figuras y para la ubicación de las obras hidráulicas en este estudio. Se encuentra en el Municipio de Zimapán Hidalgo y cubre una superficie aproximada de 720 Km². Abarca partes de las cartas del INEGI F14-68, F14-C69, F14-C58 y F14-C59, escala 1:50 000, incluye la mayor parte de los poblados del Municipio de Zimapán. El área de mayor interés queda delimitada por la cuenca hidrográfica propuesta en el presente estudio, por el arroyo Tolimán, el cual es afluente del Río Moctezuma.

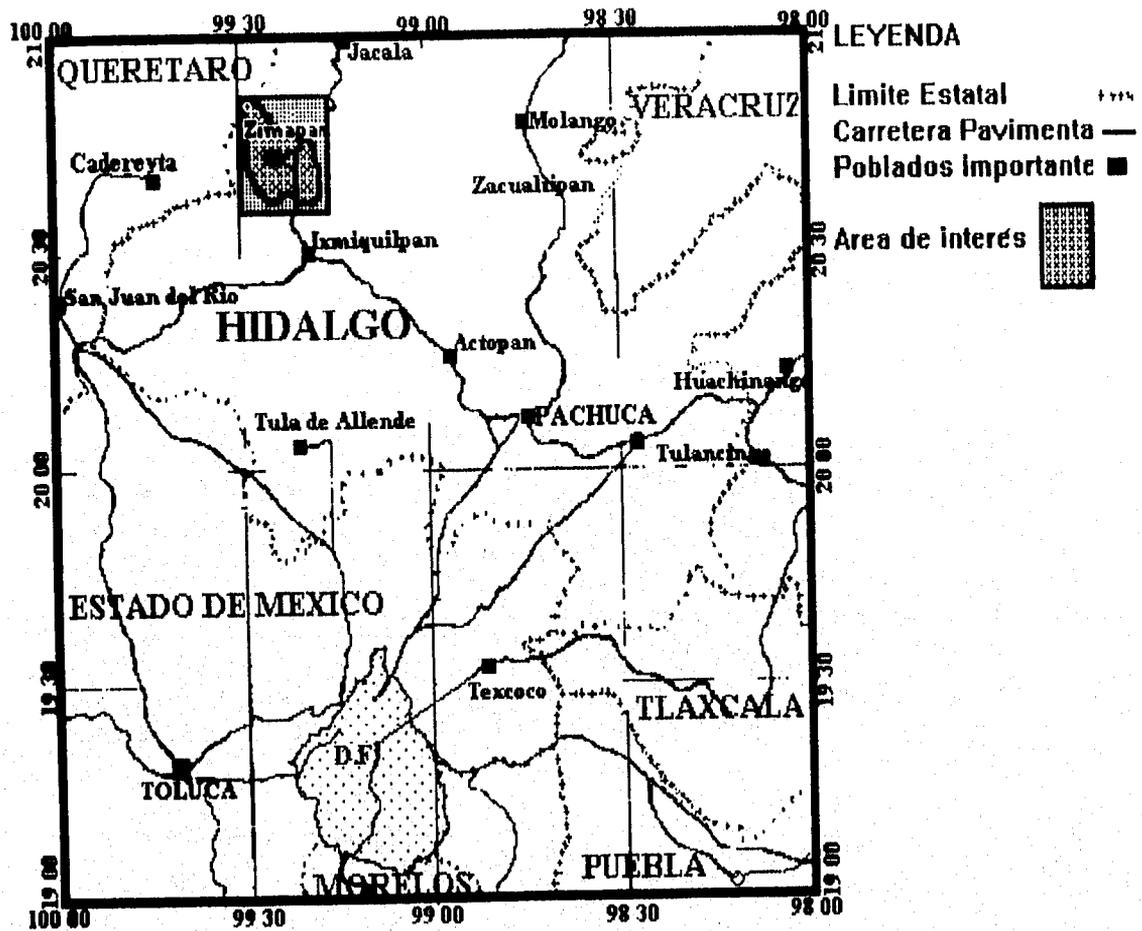


Figura 1.1.- Localización del área de estudio

1.2.2.- VÍAS DE ACCESO

El acceso al área de estudio se puede efectuar por la carretera Federal 85 México-Nuevo Laredo, tramo P.H. Zimapán-Queretaro. Las diferentes localidades están comunicadas por brechas y caminos de terracería transitables todo el año (fig.1.1). La localidad cuenta con una pista de aterrizaje para aeronaves pequeñas.

1.2.3.- ANTECEDENTES

A lo largo de la historia la presencia de As, ha sido reportado en una gran cantidad de localidades como: Irán, Canadá, Japón, Francia, Namibia, Perú, Suiza, U.S.A., México y la antigua U.R.S.S. Nriagu (1994) debido a su amplio uso en ciencia, medicina y tecnología, en muchos casos su presencia fue provocada por fuentes naturales; tiene una gran notoriedad debido a su toxicidad (Armienta et al. 1995).

La presencia de As en México es conocida desde la década de los 60's. Cebrian et al. (1983) reportan diferentes afecciones a la salud en la Comarca Lagunera. Recientemente el As fue reportado por la C.N.A. (1991) y por el Instituto de Geofísica (Armienta y Rodríguez 1993, 1995) en el agua potable en el municipio de Zimapán, en el Estado de Hidalgo.

En área de estudio se han realizado numerosos trabajos geológicos, con objetivos mineros, geotécnicos y geohidrológicos de los cuales podemos mencionar los siguientes:

Entre los estudios más importantes de geología regional y local se encuentran el de Wilson *et al.* (1955) que describe el banco calcáreo El Doctor y redefine una secuencia calcareo-arcillosa denominándola Formación Soyatal. Simmons y Mapes (1956) realizan un estudio geológico en el área de Zimapán y definen unidades como El Fanglomerado El Morro, Fanglomerado Zimapán y Formación Las Espinas (de carácter volcánico). Segerstrom (1961) realiza estudios estratigráficos y estructurales al SW del área del Estado de Hidalgo y describe como formaciones Las Trancas, Santuario, Cerezo, Zumate y Tobas Don Guinyo y define al Grupo Pachuca de origen volcánico. Carrillo B. (1970) propone un modelo de paleogeografía para el área de Valles - San Luis Potosí, en el cual se tiene una plataforma carbonatada bordeada por un cinturón arrecifal. Carrasco (1970) Propone abandonar el termino de Formación El Doctor y utilizar solo Formación El Abra para la región, divide a la Formación El Abra en tres facies; facie Cerro Ladrón, El Socavón y San Joaquín. Carrillo M. y Suter M. (1982,1989) realizan estudios de Estratigrafía y Tectónica en la región de Zimapán. La Comisión Nacional del Agua (C.N.A., 1991, 1992 y 1993, SARH, 1977) ha realizado algunos estudios geohidrológicos en algunos municipios de la región, incluyendo a Zimapán. Armienta y Rodríguez (1993, 1995) realizan estudios de impacto ambiental relacionados con el Arsénico en el área de Zimapán. Arriaga y Daniel (1996) realizan el primer mapa geológico urbano de Zimapán.

1.3.- MÉTODO DE TRABAJO

La investigación se elaboró en las siguientes etapas:

1. Se inició con la recopilación de la información disponible, relacionada con el área de estudio. Se realizó la interpretación fotogeológica para determinar los contactos formacionales y estructuras presentes en el área.
2. Se construyó un plano base escala 1:200 000 el cual comprende la cuenca hidrológica del área de Zimapán Hidalgo.
3. Se realizaron varias etapas de trabajo de campo con la finalidad de realizar un censo de obras hidráulicas (pozos, norias y manantiales), obteniéndose su posición geográfica con la ayuda de un posicionador GPS (GARMIN). Se midió la profundidad al nivel estático y la elevación del brocal.
4. Se realizaron recorridos para verificaciones de contactos geológicos, estructuras (pliegues, fallas y fracturas) y unidades litológicas
5. Se realizaron mediciones de longitud, apertura azimut, tipo de relleno, persistencia, densidad de fracturamiento, echado de fracturas en secciones de 10 a 30 metros. Estas mediciones se efectuaron en diferentes puntos del área en calizas de la Formación Tamaulipas Superior y Formación El Abra.
6. El trabajo de gabinete consistió en la construcción de planos geológicos, hidrológicos, hidrogeoquímicos, de nivel estático, estructurales, secciones geológico-estructurales, figuras y esquemas.
7. Se procesaron en hojas de cálculo, los datos de campo para obtener valores de conductividades en medios fracturados.

1.4.-CARACTERÍSTICAS DESCRIPTIVAS

1.4.1.- FISIOGRAFÍA

De acuerdo a la división de provincias fisiográficas para la República Mexicana, publicada por Raisz (1959), el área de estudio se encuentra en los límites de las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental y El Eje Volcánico Trans-mexicano (fig. 1.2).

1.4.2.- GEOMORFOLOGÍA

El tipo de relieve que se observa en el área de estudio esta relacionado al tipo de roca y a los procesos endógenos y exógenos que han actuado en la región, provocando que en la mayor parte de la región el relieve sea controlado por pliegues con una orientación preferencial

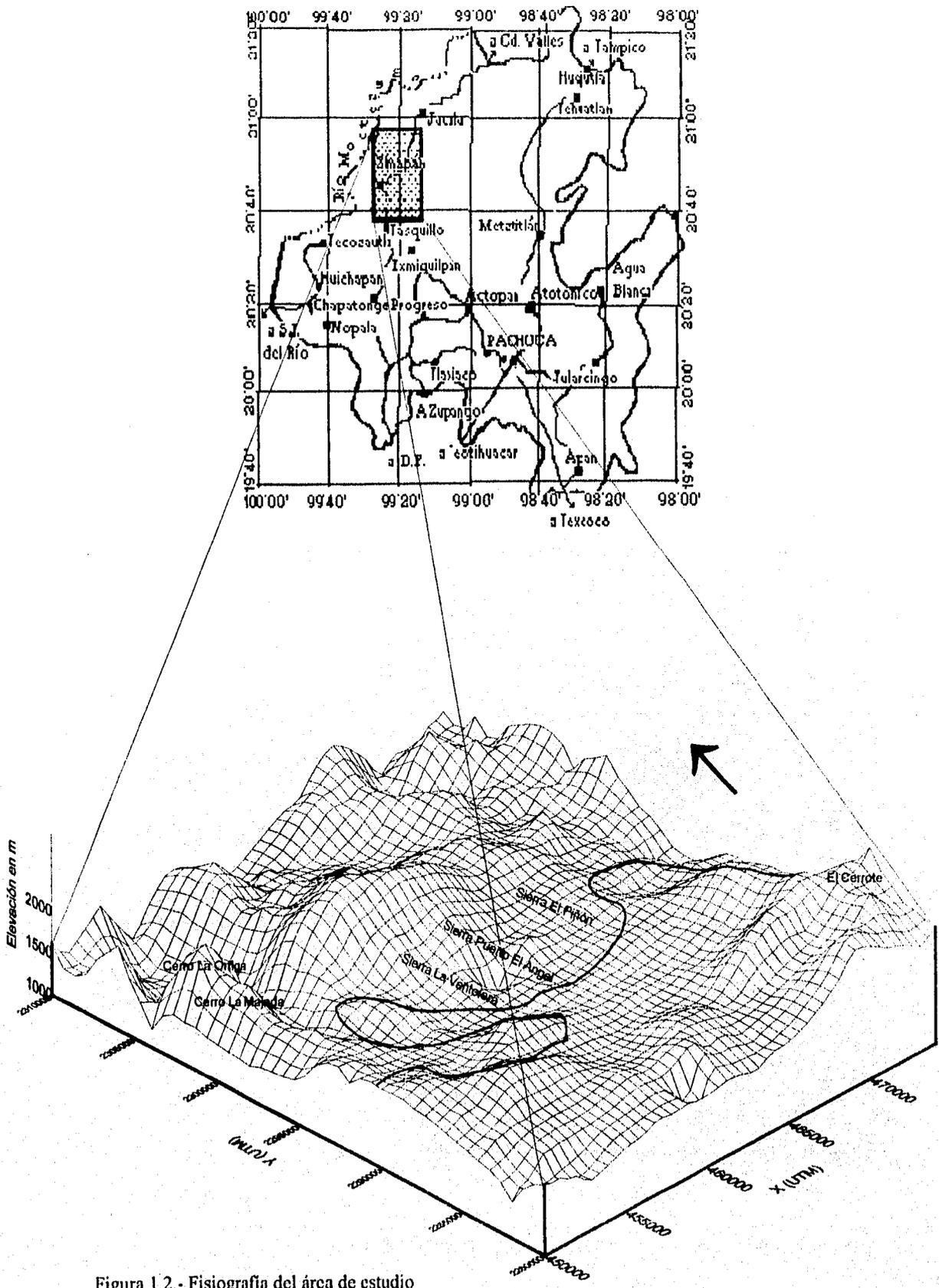


Figura 1.2.- Fisiografía del área de estudio

NW-SE que forman una zona de sierras altas y alargadas, de estas sierras podemos mencionar El Monte, Puerto El Ángel, El Peñón, Bonanza y Daxhi (fig. 1.2).

En la parte sur del área, el relieve está controlado por cerros redondeados y generalmente menos escarpados formados en rocas volcánicas (fig. 1.2).

1.4.3.- CLIMA

La presencia de cadenas montañosas pertenecientes a la Sierra Madre Oriental y al Eje Volcánico Trans-mexicano producen una fuerte influencia sobre el clima de la región. Por un lado la Sierra Madre Oriental, actúa como barrera fisiográfica impidiendo que el aire marítimo penetre más adentro del continente y en general produce climas relativamente estables con respecto a la presencia de ciclones. Por otro lado, la presencia de montañas influyen en la cantidad y distribución de la temperatura y humedad en la región; debido a esto en la región se tienen los siguientes tipos o subtipos de climas, (INEGI, 1994) escala 1:1000,000 (fig. 1.3):

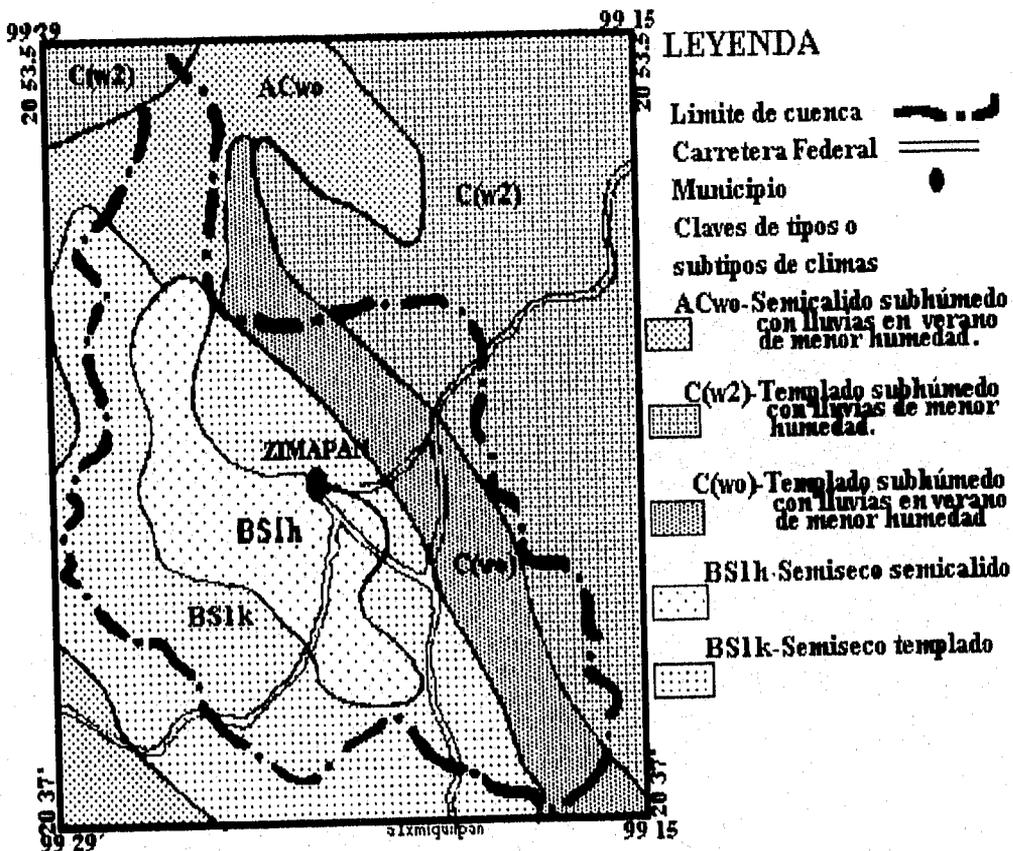


Figura 1.3.- Tipos de climas en la cuenca hidrográfica del Tolimán

ACwo.- Semicálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad, con temperatura media anual de 18° a 20°C y con precipitaciones de 800 a 900 mm, siendo estas las mayores precipitaciones de la zona de recarga, este tipo de clima se presenta en la parte norte central del área de estudio (figs. 1.3 y 1.4).

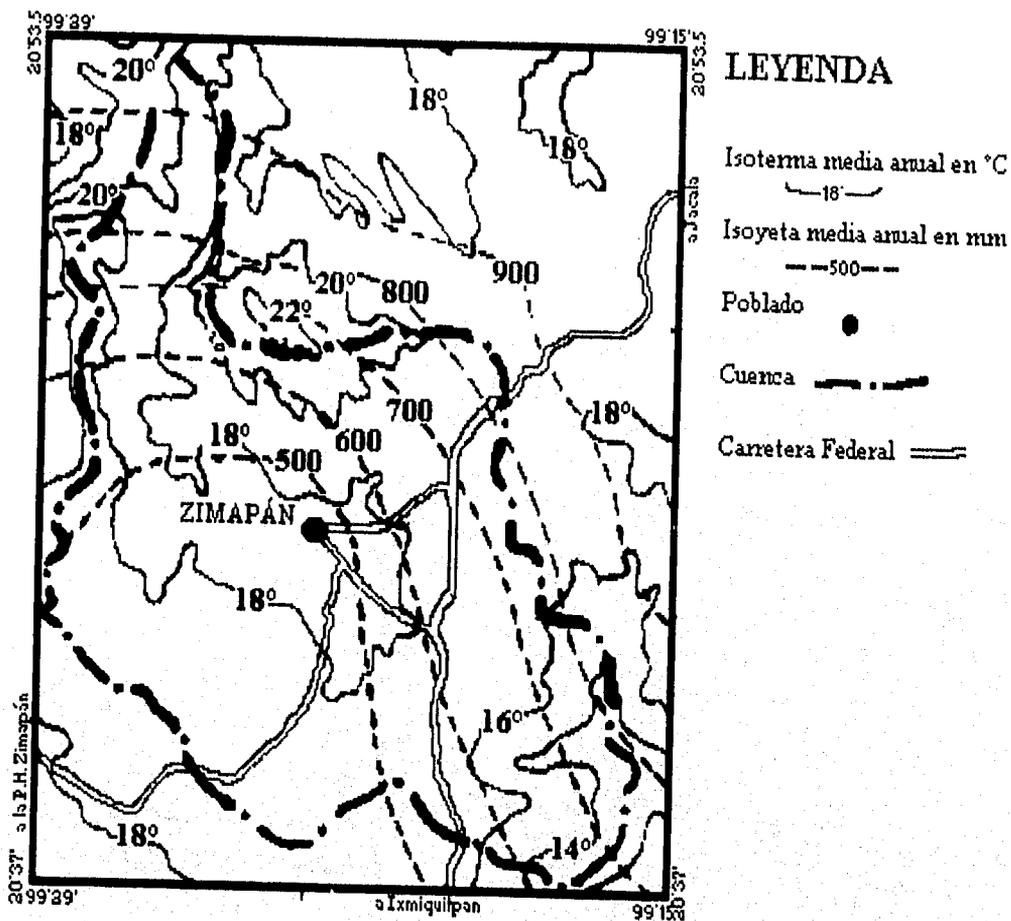


Figura 1.4.- Temperatura y precipitaciones en la cuenca hidrográfica del Tolimán

C(w2).- Templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad, con temperatura media anual de 18°C y precipitación media anual de 900 mm, se presenta en la parte oriental del área y en una pequeña porción en el extremo superior izquierdo (figs. 1.3 y 1.4).

C(wo).- Templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad, con rangos de temperaturas media anual de 14° a 20°C y precipitaciones de 600 a 700 mm, este subtipo de

clima se localiza en un cinturón con orientación NW-SE al noreste de Zimapán (figs. 1.3 y 1.4).

BS1h.-Semiseco semicálido con temperatura media anual de 18°C y precipitación media anual de 500 mm, siendo estos los menores valores de precipitación en la cuenca, este subtipo de clima se encuentra en las proximidades del arroyo Toliman (figs. 1.3 y 1.4).

BS1k.- Semiseco templado, con un rango de temperaturas media anual de 16° a 18°C y precipitaciones de 500 a 600 mm, este subtipo de clima se ubica principalmente en la parte sur-occidental del área y al norte de Zimapán (figs. 1.3 y 1.4).

1.4.4.- HIDROGRAFIA

La cuenca del Arroyo Tolimán (delimitada por la cuenca hidrográfica) tiene un área aproximada de 650.2 Km², algunos arroyos tributarios principales son Santiago, Agua Santa, San Juan, Agua Blanca, Detzani, Las Pilas y San Antonio (fig. 1.5).

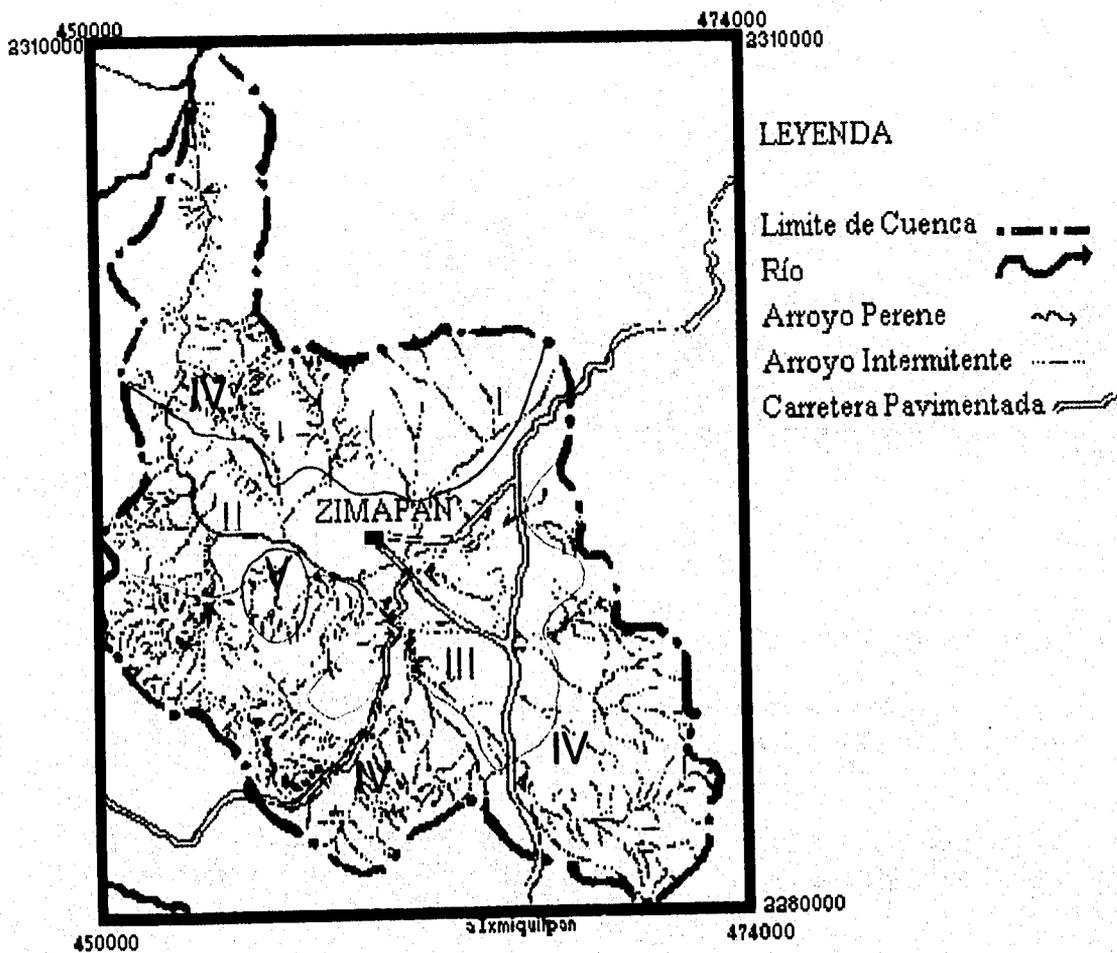


Figura 1.5.- Hidrografia de la cuenca del Tolimán

El orden de las corrientes a escala 1:50 000, es de 4, las características (densidad, integración, espaciamiento, etc.) del drenaje que se presenta en la cuenca hidrográfica están asociadas con la litología y estructuras, para fines de descripción de drenaje la cuenca hidrográfica del Tolimán fue dividida en 5 zonas.

Zona I

En calizas predomina un drenaje poco espaciado, enrejado, asimétrico, integrado y poco denso, éste se desarrolla en las grandes sierras al norte de Zimapán (fig. 1.5).

Zona II

En lutitas se desarrolla un drenaje dendrítico, muy denso e integrado, se presenta en los alrededores de los poblados de La Majada, La Ortiga, El Dedho, San Antonio y Botinha (fig. 1.5).

Zona III

En tobas el drenaje predominante es dendrítico simétrico, poco denso y poco espaciado, no integrado, esto se presenta principalmente en los grandes valles de Coaxithi, Santiago, Agua Blanca (fig. 1.5).

Zona IV

En rocas volcánicas como basaltos, latitas y andesitas sobresale el drenaje dendrítico asimétrico, integrado, ocasionalmente radial centrífugo, esto se observa en los alrededores de La Estanzuela, Tathi, El Cerrote y Agua Blanca (fig. 1.5).

Zona V

Un drenaje subparalelo muy local se desarrolla en los conglomerados al NE del Cerro del Daxhi (fig. 1.5).

II.- GEOLOGÍA

ESTRATIGRAFÍA

El presente trabajo no pretende ser un estudio detallado de estratigrafía, sin embargo se utilizará la nomenclatura más reconocida en el área ya que existe controversia en cuanto a la gran cantidad de términos utilizados para diferentes unidades del área, así por ejemplo, algunos describen a la Formación Tamaulipas Superior como Formación Cuesta del Cura, la Formación El Abra y como Formación El Doctor, la Formación Soyatal como Formación Mezcala y Formación Méndez.

La Formación Las Espinas como Grupo Pachuca y la Formación Tarango como Tobas Don Guinyo y Grupo San Juan.

Se describen unidades geológicas cuyas edades van del Jurásico Superior al Reciente (fig. 2.1). La columna estratigráfica incluye rocas sedimentarias, ígneas (volcánicas y plutónicas) y metamórficas de contacto (tabla 2.1).

Para la descripción de unidades, así como para una mejor visualización de las relaciones estratigráficas entre las diferentes unidades se construyeron secciones geológicas con orientación N-S y E-W (figs. 2.2 y 2.3).

2.1. SISTEMA JURÁSICO

2.1.1 Formación Las Trancas

Definición, distribución y expresión fisiográfica

Esta unidad fue definida por Segerstrom (1961) en el poblado de las Trancas, Hidalgo. Se refiere a una serie de lutita filíticas, fisiles con concreciones de arenisca, toba y rocas arcillosas intercaladas con grauvaca. Esta unidad aflora en la porción centro y nororiental del área de estudio y en los alrededores del poblado de las Trancas. Geomorfológicamente se identifica como cerros de topografía bastante suave (fig. 2.1).

Litología y Espesor

En la parte inferior existe limolita y lutita calcárea intercaladas con caliza micrítica y algunos estratos de arenisca de estratificación delgada. En la parte superior predominan calizas micríticas de estratificación delgada a media con intercalaciones de marga y lutita calcárea.

Esta unidad está constituida por lutita, limolita, arenisca y en ocasiones caliza arcillosa, en estratos medianos y delgados, su coloración es generalmente gris claro a oscuro, Bernabe (1991) identificó 3 miembros:

ERA	PERIODO	SERIE	PISO EUROPEO	Area de Xajba	Area de Progreso	Area Jaipan sur de la	Area de Zimapan
				Mendoza R. (1990)	Facultad de Ingenieria UNAM 1985	Plataforma Valles S.F. Carrillo B. (1974)	Presente Teals (1996)
CENOZOICO	Q	RECIENTE		Aluvion Basalto	Aluvion Basalto		Aluvion Basalto
		PLEISTOCENO		Tarango	Tarango San Juan		Cg Zimapan Tarango
		MIOCENO		Rocas volcanicas	Tobaa Don Guinyo Grupo Pachuca		Rocas Volcanicas
		OLIGOCENO		Grupo El Morro	Grupo El Morro		El Morro
		PALEOCENO					
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	Maestrichtiano				
			Seno Campaniano				
			niano Santoniano	Mexcala	Mexcala	Mezcala-Cardenas	
			ano Coniaciano			San Felipe	
			Turoniano	Soyatal	Agua Nueya	Soyatal	Soyatal
		MEDIO	Cenomaniano			Agua Nueya	
			Ahlano	El Doctor	Cuesta del Cura	El Abra	Kd
		INFERIOR	Apilano		Abra		Ks
			N Barroisiano		Olata		Ka
			e				
			l Hauterlyviano				
			m Valanginiano				
			i				
			n Barroisiano				
JURASICO	SUPERIOR		Tithoniano				
			Kimmeridgiano				
			Oxfordiano		Las Trancas		Las Trancas
	MEDIO		Calloviano	No aflora			
			Batoniano				
			Bajoniano			No aflora	No aflora
			Adjeniano				
			L Toarciano				
			a Pliensbaquiano				
			l Sinemuriano				
	o Hettangiano						
TRIASICO	SUPERIOR						
	MEDIO			Huitzchal			
	INFERIOR			No aflora			

Q Cuaternario, Kd Formación El Doctor, Ka Formación El Abra y Kts Formación Tamaulipas Superior

Tabla 2.1.- Correlación estratigráfica

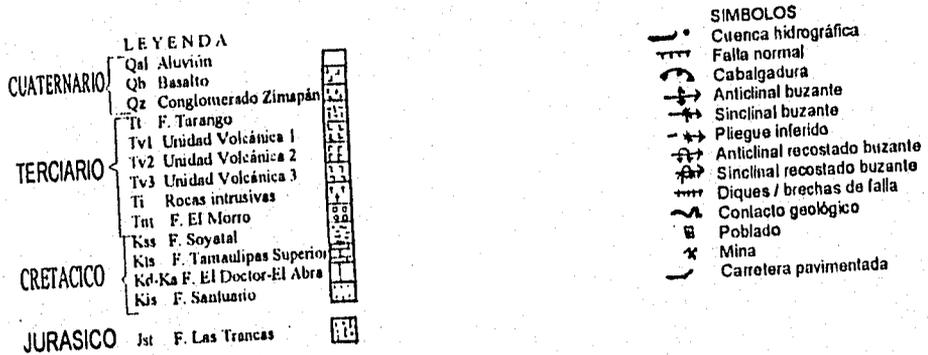
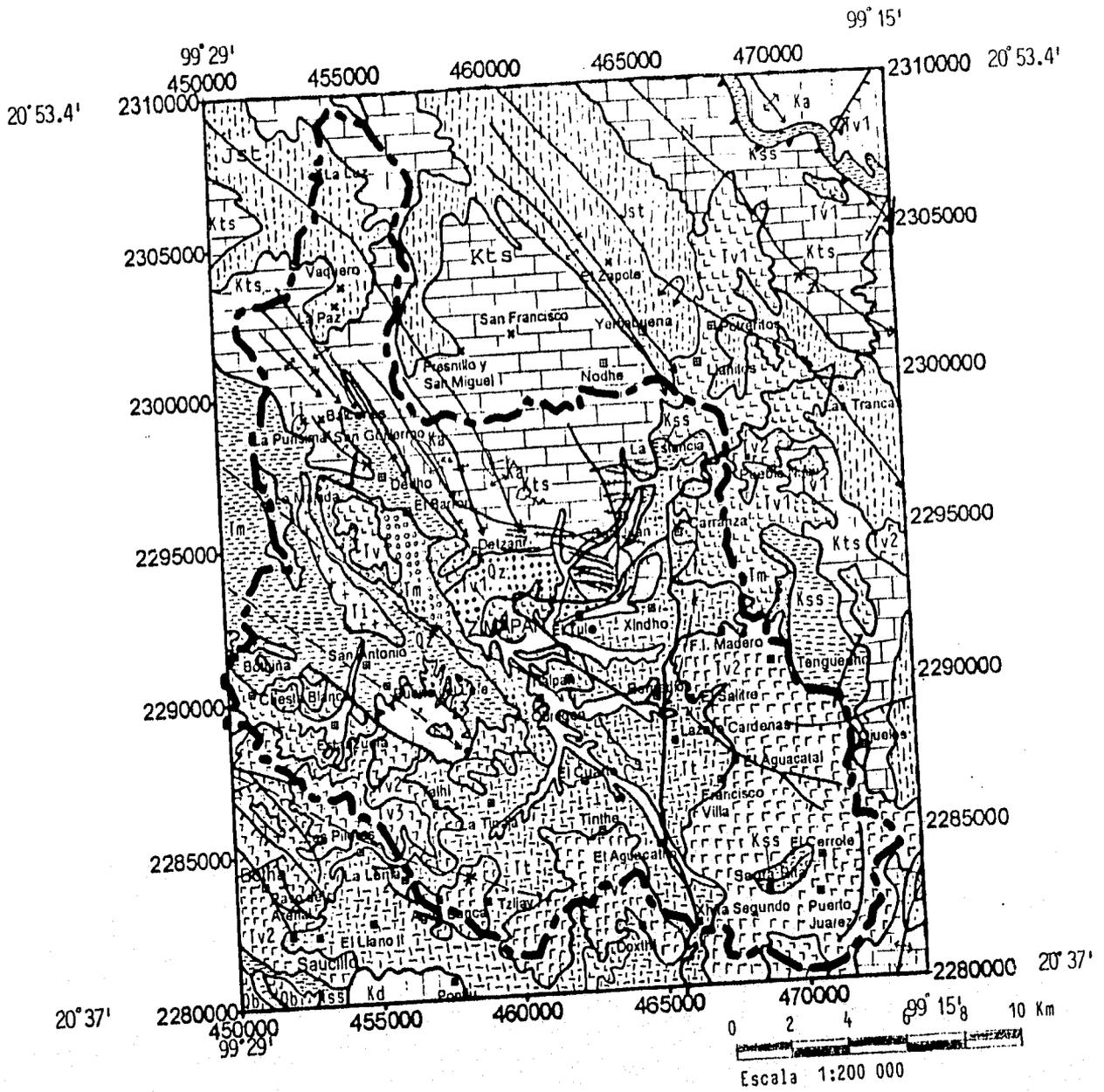
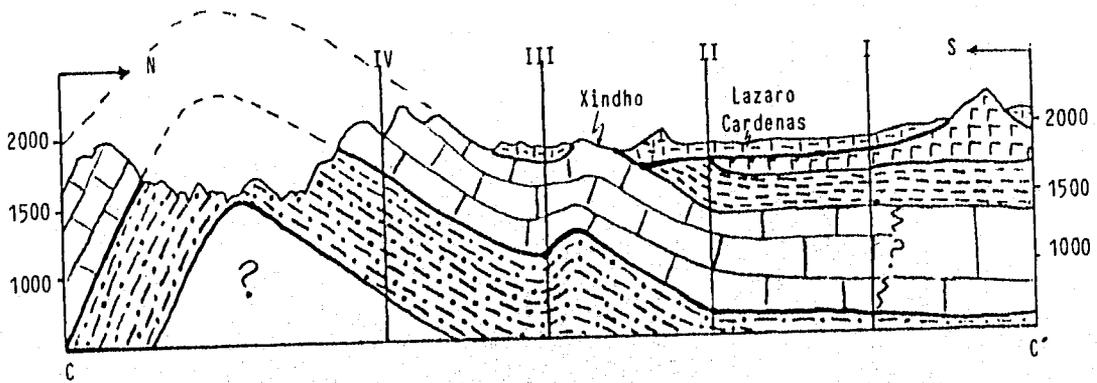
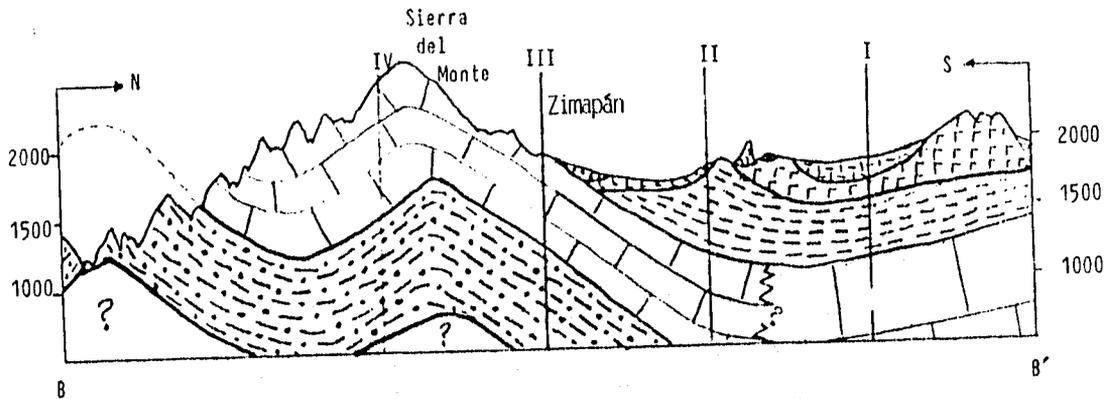
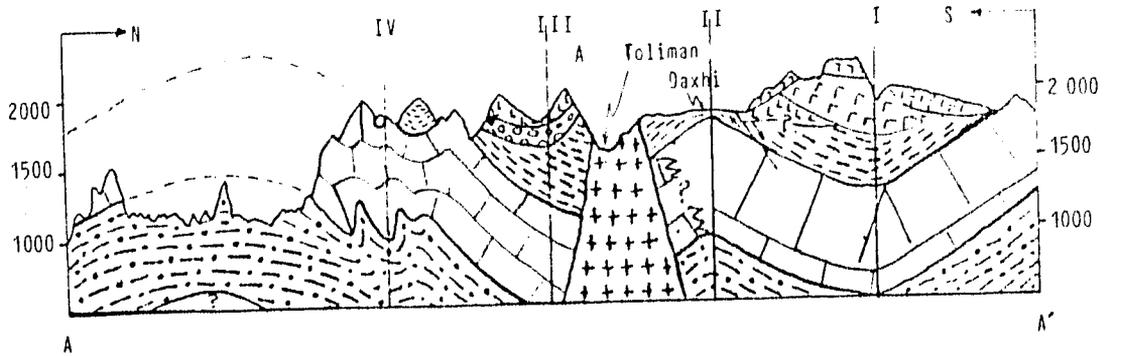


Figura 2.1.- Geología del área de estudio (modificada de Carrillo y Suter, 1982)



ESCALA HORIZONTAL 1:200 000
 0 2 4 6 8 10 Kilometros

SIMBOLOS
 - - - - - Fallo normal
 • Cabalgadura
 + + + + + Diques / brechas de falla

LEYENDA

CUATERNARIO
 Qal Aluvión
 Qb Basalto
 Qz Conglomerado Zimapán

TERCIARIO
 Tt F. Tarango
 Tv1 Unidad Volcánica 1
 Tv2 Unidad Volcánica 2
 Tv3 Unidad Volcánica 3
 Ti Rocas intrusivas
 Tm F. El Morro

CRETACICO
 Kas F. Soyatal
 Kts F. Tamaulipas Superior
 Kd-Ka F. El Doctor-El Abra

JURASICO
 Jst F. Las Trancas



Croquis de localización de secciones

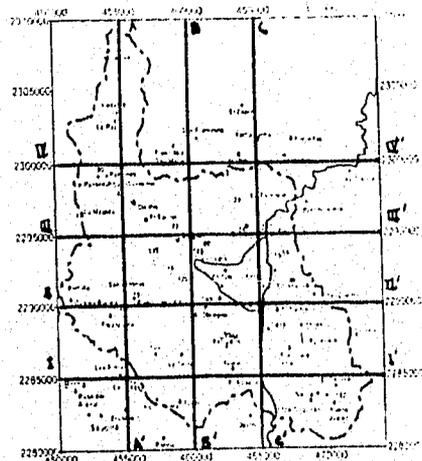


Figura 2.2.- Secciones geológicas AA', BB' y CC', con orientaciones N-S

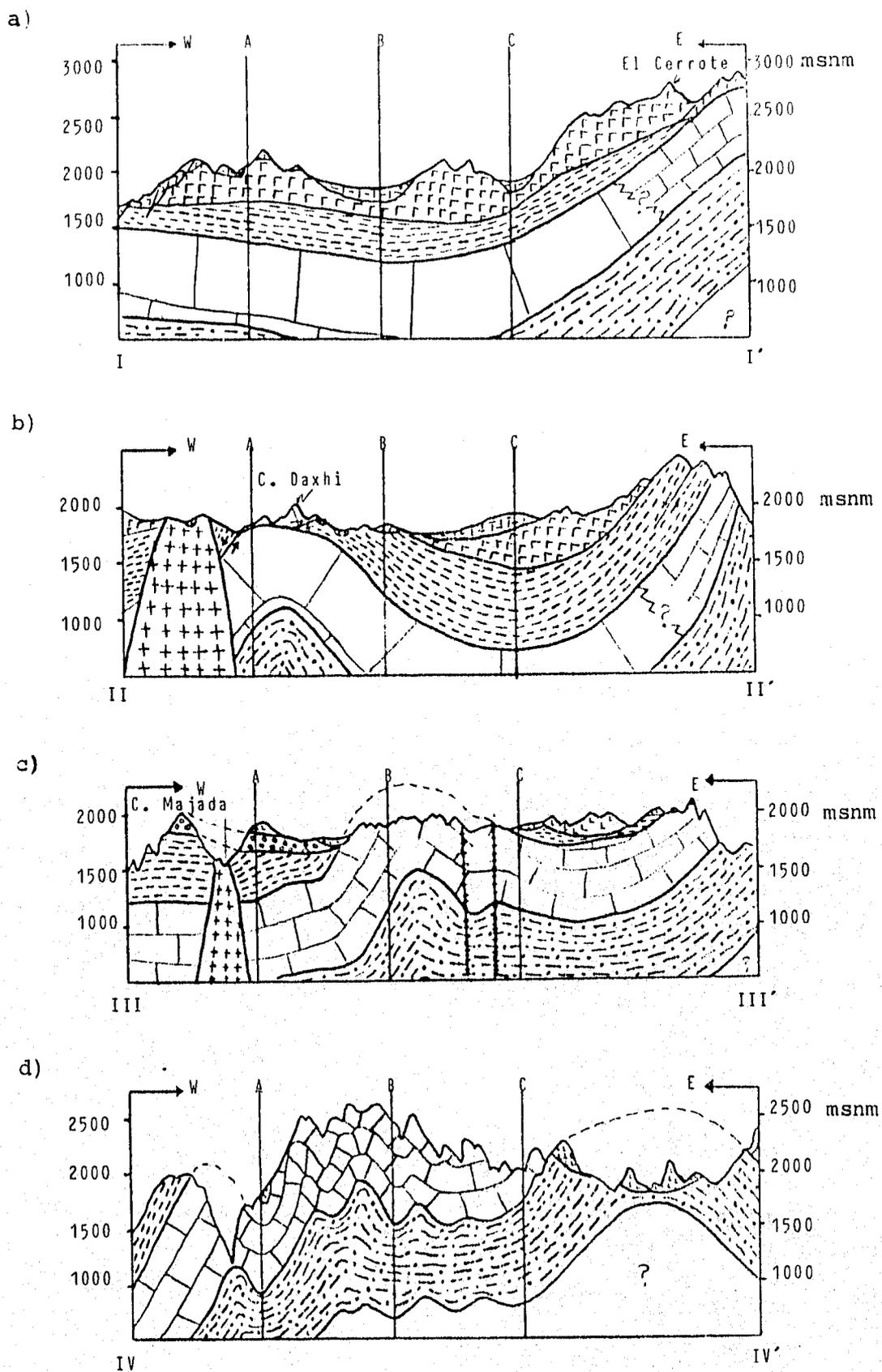


Figura 2.3.- Secciones geológicas I-I', II-II', III-III' y IV-IV', con orientaciones E-W.

El miembro inferior presenta horizontes de toba de grano fino y arena tobácea de estratificación media, la característica de este miembro es la predominancia de volcanoclastos.

El miembro medio consiste en alternancia de horizontes calcáreo-arcillosos, formados por arena tobácea de color rojizo y toba de grano fino-medio de color pardo claro, en espesores de 10-40 cm, se llegan a presentar capas de mudstone-wackestone y horizontes lutíticos.

El miembro superior consiste de alternancia de caliza de textura mudstone-wackestone, intercalada con horizontes lutíticos.

En la cuenca epi-continental de Zimapán el espesor aflorante alcanza hasta 1000 m. En un corte estructural balanceado, se estima que esta formación está en la base del despegue generalizado a ~ 3 Km por debajo del nivel del mar (Carrillo-Martínez comunicación personal). En el presente estudio no se midieron secciones en esta unidad, sin embargo en la literatura se reportan espesores mínimos de 100 m y espesores máximos de 3000 m Carrillo y Suter (*op. cit.*) y Mendoza (*op. cit.*) (figs. 2.2 y 2.3).

Relaciones Estratigráficas

La Formación Las Trancas subyace transicional y concordantemente a la Formación Santuario, su contacto inferior no aflora en el área de estudio. Esta razón sugiere tectónica de cobertura (Carrillo-Martínez comunicación personal).

Edad y Correlación

Fries Jr. (1965) reporta amonitas *Mazapillites sp.*, Imlay (1948) examinó una colección de fósiles colectada por Segerstrom *et al.* (*op. cit.*) y reportan amonitas desenrolladas y litocerátidas de edad kimeridgiana.

Esta unidad es correlacionable con la Formación Pimienta, Tamán en el noreste de Puebla y Veracruz; con la parte superior de la Formación Chimeco y parte inferior de la Formación Mapache en el sur de Puebla y noroeste de Oaxaca; con la Caliza Zuloaga y Formación la Gloria en el noreste y norte de México.

Ambiente Sedimentario

Barrera y Guerrero (1984) reportan estructuras como bloques caídos, depósitos de derrumbe y deslizamiento (slumps) y reportan un mayor número de clastos hacia el área del Tolimán, así como una secuencia Bowma que corresponde a ambientes turbidíticos; tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que el tipo de ambiente de depósito corresponde a turbiditas del tipo 3 ó pelíticas, al norte de Zimapán y del tipo 2 o arenopelíticas, al noroeste.

2.2. SISTEMA CRETÁCICO

2.2.1. Formación Santuario

Definición, Distribución y Expresión Topográfica

Con el nombre de Formación Santuario, Segerstrom (*op. cit.*) se refiere a una secuencia de caliza de color gris oscuro, calcarenita, lutita filítica y grauvaca, dando como localidad tipo los afloramientos observados en las inmediaciones de el poblado El Santuario, ubicado a 22 Km de Ixmiquilpan, Hidalgo.

La Formación Santuario se encuentra expuesta en el extremo suroriental del área de estudio (fig. 2.1). Debido a que La Formación Santuario es poco resistente a la erosión, ésta se presenta con relieve bajo.

Litología y Espesor

La Formación Santuario esta constituida por estratos gruesos de mudstone intercalados con lutita laminar. Najera (1984) reporto variaciones laterales, de tal forma que en el área de Tolimán presenta mayor cantidad de terrigenos y al oriente del área de estudio un mayor contenido de carbonatos. En los cortes litológicos del pozo Ixmiquilpan 1 de PEMEX se reportan 570 m de espesor.

Relaciones Estratigráficas

La Formación Santuario subyace concordante a la Formación Tamaulipas Superior del Albiano Cenomaniano y descansa concordantemente sobre la Formación Las Trancas del Jurásico Tardío.

Edad y Correlación

De acuerdo a los fósiles descritos en diversos estudios (Segerstrom, *op. cit.* y Najera, *op. cit.*) relacionados con el área, en esta unidad se han reportado amonitas del genero *Distoloceras sp.*, *Deshayesites sp.*, *Gargasiceras sp.*, y *Protetragonites sp.*, que sitúan a esta unidad en el Neocomiano (Valanginiano-Hauteriviano)-Aptiano.

Se correlaciona con la Formación Tamaulipas Inferior, Formación Xochicalco en Morelos, Formación Cupido y Taraises en norte y noreste de México respectivamente.

Medio Ambiente

Con base en las litofacies y variaciones reportadas se interpreta, para esta unidad un ambiente marino de turbidita distal.

2.2.2. Formación El Abra (El Doctor)

Definición y Distribución

Heim (1926) designó como Formación El Abra a una secuencia de caliza arrecifal que aflora en el Cañón del Abra, ubicado en el Km 543 del ferrocarril Tampico- San Luis Potosí. De igual forma Wilson *et al.* (1955) la denominaron Caliza El Doctor por el poblado del mismo nombre.

En la región ha habido controversia en cuanto a la nomenclatura, con respecto a la Formación El Doctor y Formación El Abra, ya que litológicamente no hay diferencia entre una y otra. Carrasco (1970) propone abandonar el nombre de Formación El Doctor y usar únicamente el nombre de Formación El Abra, para las rocas depositadas en la Plataforma Valles San Luis; su nomenclatura solo se debe al lugar geográfico en donde fue descrita. El mismo Carrasco (*op. cit.*) describe para la Formación El Abra 3 facies, definidas por Wilson *et. al.* (*op. cit.*) quien describe 4 subfacies de la Formación El Doctor. Facies La Negra (El Doctor), Facies Cerro Ladrón (Formación Abra), Facies Socavón y Facies San Joaquín (Formación Tamaulipas Superior).

En el presente trabajo se mantienen las nomenclaturas de Formación El Abra y El Doctor, tomando en cuenta que la única diferencia entre la Formación El Abra y El Doctor es su localización geográfica.

La Formación El Abra queda expuesta escasamente en los núcleos de los anticlinales Puerto del Ángel y La Ventonera. La parte que correspondería a la Formación El Doctor quedaría expuesta en El Cerro El Daxhi y al Sur del Poblado Pontiu (fig. 2.1).

Litología y Espesor

En el área de estudio las unidades El Doctor y El Abra, consisten de caliza (packstone-grainstone) de estratificación gruesa a masiva, con abundantes fragmentos de rudistas, caprinidos, monopleuridos, toucasia, ostrea y nódulos de pedernal negro, que corresponden a facies de talud, Carrasco (*op. cit.*) describe para la Formación El Abra 3 facies; Facies Cerro Ladrón (Formación El Abra con caliza de estratificación delgada-mediana de color gris oscuro a gris claro) que corresponde a ambiente de plataforma restringida, Facies Socavón con caliza clástica de color gris claro y conglomerado de estratificación gruesa, de ambiente pre-arrecifal y Facies San Joaquín (Tamaulipas Superior con caliza de color gris oscuro en estratos gruesos con horizontes de pedernal negro y lutita) de ambiente de cuenca profunda.

En facies de plataforma esta unidad alcanza espesores de 1,500-2,000 m, en tanto que en facies de cuenca tiene espesores de 300-1,200 m, Carrillo y Suter (1982).

Ambiente Sedimentario

A nivel regional existen dos plataformas carbonatadas que corresponden al Banco Calcáreo El Doctor y a la Plataforma-Valles San Luis Potosí, las cuales son separadas por una cuenca intracratónica, en Zimapán (Formación Tamaulipas Superior) Carrillo y Suter (*op. cit.*).

Edad y Correlación

Por su contenido de *Nummuloculina heim*, *Biolumina sp.*, *Calcisphaerula innominata*, *Pithonella ovalis* y *Stomasphaera-sphaerica*, se sitúa a esta unidad en el Albiano-Cenomaniano Wilson *et. al.* (*op. cit.*) y Carrasco (*op. cit.*).

Las formaciones El Doctor y El Abra se correlacionan con la Formación Aurora del norte de México, con las formaciones Cipiapa y Morelos en Puebla y Morelos respectivamente, mientras que la Formación Tamaulipas Superior lo hace con la Formación Cuesta del Cura y Tamabra en Hidalgo y San Luis Potosí.

2.2.3. Formación Tamaulipas Superior

Definición, Distribución y Expresión Fisiográfica

Originalmente el nombre de Tamaulipas fue utilizado por L. W. Stephenson en 1921 (en Padilla y Sánchez, 1982) durante un trabajo privado en la Sierra de Tamaulipas. Posteriormente Belt en 1925 (en Padilla y Sánchez, *op. cit.*) utiliza este nombre en una publicación de descripción general.

Durante los años 20's se utilizó este término indistintamente, tanto unidades del Neocomiano como del Albiano-Cenomaniano, finalmente Muir (1934) divide a esta Formación en dos miembros separados por un horizonte de lutita con pedernal negro, dicho horizonte fue nombrado Horizonte Otates (equivalente a la Formación La Peña). El miembro inferior es restringido a edad Neocomiano-Aptiano Tardío, en tanto que el miembro superior es de edad Albiano-Cenomaniano. En numerosos trabajos consultados se denomina como Formación Cuesta del Cura.

La Formación Tamaulipas Superior se encuentra expuesta en la parte nororiental del área de estudio (fig. 2.1). Esta unidad forma grandes sierras alargadas con pendiente muy abrupta (anticlinales Bonanza, Puerto El Ángel, La Ventolera y El Carrizal).

Litología y Espesor

Esta unidad está constituida en su parte inferior de estratos de espesor delgado-mediano de caliza y caliza arcillosa color gris oscuro, con abundante pedernal negro en forma de nódulos y bandas. Hacia la parte superior de dicha unidad, aparece caliza arcillosa de estratificación delgada, de color gris oscuro que interperiza con una coloración rojiza y anaranjada, en la que el contenido de pedernal disminuye notablemente.

No se midieron espesores en estas unidades, sin embargo, en trabajos anteriores Wilson *et al.* (*op. cit.*), Simmons y Mapes (*op. cit.*) y Carrasco (*op. cit.*) se estiman espesores que varían de 200 y 1,200 m, siendo este último aparentemente aumentado por tectónica (Carrillo-Martínez comunicación personal) (figs. 2.2 y 2.3).

Relaciones Estratigráficas

Esta unidad sobreyace transicional y concordantemente a la Formación Las Trancas y Formación Santuario, lateralmente pasa transicionalmente a la Formación El Abra y El Doctor, subyace concordantemente a la Formación Soyatal y discordantemente a las rocas volcánicas terciarias y al Conglomerado El Morro.

2.2.4. Formación Soyatal

Definición y Distribución

Esta unidad es nombrada y redefinida por Wilson *et al.* (1955) al referirse a una secuencia alternante de caliza arcillosa de color gris oscuro, intercalada con delgados horizontes de lutita calcárea, haciéndose más arcillosa hacia la cima.

En el área de estudio se encuentra distribuida al oeste de Zimapán, en los alrededores de los poblados Detzani, Barron, Dedhó, al oriente del poblado Tenguedhó, Santa Rita, Garabato y en el extremo norte del área de estudio (fig. 2.1).

Litología y Espesor

Esta unidad en su cima está compuesta principalmente por lutita color gris claro que intertemperiza en verde oscuro y en su parte media una alternancia de lutita y caliza arcillosa de estratificación delgada y media. En su base predomina la caliza arcillosa y calizas.

Según Wilson *et al.* (*op. cit.*) su espesor máximo es de 150 m, Simons y Mappes (*op. cit.*) midieron una sección de 700 m en el arroyo Tolimán, aunque estiman un espesor de aproximadamente 1000 m, (figs. 2.2 y 2.3).

Relaciones Estratigráficas

La Formación Soyatal sobreyace en forma concordante y transicionalmente a la Formación Tamaulipas Superior, y Formación El Doctor, subyace discordantemente al Conglomerado El Morro, y a las rocas volcánicas de la Formación Las Espinas.

Edad y Correlación

Debido a la presencia de *Inoceramus Labiatus Shlotheim* e *Hippurites resectus*, nanoplankton reportada por Segerstron (*op. cit.*), Wilson *et al.* (*op. cit.*), Kiyokawa (1981),

y por Mendoza (1990), esta unidad se sitúa en el rango estratigráfico del Turoniano Tardío al Campaniano.

Esta unidad se correlaciona con las Formaciones Agua Nueva, al noreste de México, con la parte inferior de la Formación San Felipe, Grupo Xilitla, Formación Cuautla, Mexcala e Indidura en el centro del país.

Ambiente de Depósito.

Mendoza (*op. cit.*) describe unidades arcillo-arenosas al oeste del área de estudio, por lo que al parecer, esta unidad presenta ambientes turbidíticos de tipo 3 ó pelítico en los alrededores de Zimapán y el Dedhó y tipo 2 ó areno-pelítico al oeste del área de estudio.

2.3 SISTEMA TERCIARIO

2.3.1. Conglomerado El Morro

Definición y Distribución

Simons y Mappes (*op. cit.*) definen como Conglomerado El Morro a un paquete de conglomerado calcáreo, cementado por una matriz calcárea de color rojiza, intercalada con basalto y andesita cuya localidad tipo se encuentra en el Cerro el Morro al noreste de Zimapán, Hidalgo.

Se encuentra expuesta en su localidad tipo y en los alrededores de poblados como Venustiano Carranza, Francisco I. Madero, El Aguacatal, la Majada y La Ortiga (fig. 2.1).

Litología y Espesor

Esta unidad está constituida por conglomerado polimictico compuesto de caliza, margas, arenisca, andesita, basalto y toba, así como limolita de color verde y morado; la matriz de dichos conglomerados está compuesta por grauvacas de grano medio y fino con cementante calcáreo, su redondez varía de subanguloso a subredondeado. Lateralmente los conglomerados llegan a interdigitarse con rocas volcánicas (Formación Las Espinas). Según Simons y Mappes (*op. cit.*) el espesor de esta unidad puede alcanzar hasta 400 m, (figs. 2.2 y 2.3).

Relaciones Estratigráficas.

Esta unidad descansa discordante sobre las Formaciones Soyatal, El Doctor, El Abra y Tamaulipas Superior y es cubierta en forma discordante por rocas volcánicas de composición máfica e intermedia. En ocasiones es cortado por diques dioríticos y monzoníticos.

Edad y Correlación

Con base en sus relaciones estratigráficas, esta unidad se sitúa en el Terciario Inferior. Puede correlacionarse con el Conglomerado Rojo de Guanajuato y con el Conglomerado Balsas en Morelos y Guerrero.

Ambiente de Depósito

Basados en su litofacies y relaciones de campo observadas se relaciona a esta unidad con un ambiente terrestre de abanicos aluviales en facies proximales de grano grueso.

2.3.2. Formación Tarango

Definición y Distribución

Con el nombre de Formación Tarango, Bryan (1948) describe un paquete de sedimentos vulcano-sedimentarios expuestos al suroeste de la Colonia Mixcoac en la Ciudad de México.

En el área de estudio esta unidad se encuentra rellenando los valles de los arroyos al occidente y al sur de Zimapán y alrededores de los poblados de Venustiano Carranza, Remedios, Francisco I. Madero, Lázaro Cárdenas, La Tinaja y El Cuarto (fig. 2.1).

Litología

En el área de estudio esta unidad esta formada por material vulcano-sedimentario constituido por un paquete de tobas intercaladas con sedimentos aluviales con horizontes de conglomerados polimícticos, sus clastos redondeados y subredondeados son de caliza, limolita y rocas volcánicas en una matriz limo-arcillosa y arenosa de color rojo.

Relaciones Estratigráficas

Sobreyace discordantemente a la Formación Las Espinas, Conglomerado El Morro y Conglomerado Zimapán y subyace concordantemente a sedimentos recientes.

Edad y Correlación

Dada las relaciones estratigráficas de esta unidad, se le sitúa en el Plioceno-Pleistoceno, probablemente se correlaciona con la Formación Atotonilco en Querétaro e Hidalgo; Formación La Borreguita y Santo Domingo en San Luis Potosí; Formación Cuernavaca y Grupo Chichinautzin en Cuautla y Valle de México.

Ambiente de Depósito

La parte vulcano-sedimentaria de esta unidad se depositó en un ambiente fluvial principalmente.

2.3.3. Rocas Volcánicas

Debido a que existe diferente nomenclatura para las rocas volcánicas; en el presente trabajo se utilizara la descrita por Mendoza (*op. cit.*) debido al detalle con que se analiza la descripción de dichas rocas volcánicas. Basado en sus características litológicas y relaciones espaciales, las rocas volcánicas fueron divididas en cuatro unidades de las cuales solo tres se reconocieron en el área, ya que la cuarta unidad volcánica no aflora.

En la Formación Las Espinas, Cantagrel y Robin, (1979) fecharon lavas andesíticas de la parte superior por el método K-Ar, obteniendo una edad de 9.0 ± 0.3 m. a.

Primera Unidad Volcánica

Corresponde al Grupo Pachuca descrito por Segerstrom (*op. cit.*) ó Formación Las Espinas descrito por Simmons y Mapes (*op. cit.*) en el Cerro las Espinas al noroeste de Zimapán, esta unidad también se encuentra expuesta en los alrededores de los poblados de Zimapán, La Estanzuela, El Salitre, El Cuarto, Tenguedhó, Venustiano Carranza, Llanitos y Potreritos, (fig. 2.1). Consiste de rocas composición básica e intermedia, lo cual incluye rocas como basaltos, andesitas y brechas volcánicas.

Esta unidad sobryace discordantemente al Conglomerado El Morro, a las rocas cretácicas y pre-cretácicas y es cubierta en forma concordante por la segunda unidad volcánica y por la Formación Tarango, Conglomerado Zimapán y sedimentos recientes.

Segunda Unidad Volcánica

Esta unidad esta formada por rocas silíceas, lo cual incluye rocas como tobas líticas, piroclastos, aglomerados volcánicos que se localizan en los alrededores de los poblados de Doxthi, Puerto Juárez, Santa Rita, El Cerrote, Ojuelos, Pueblo Nuevo, El Aguacatal y Francisco Villa (fig. 2.1).

Esta unidad volcánica sobryace concordantemente a la primera unidad volcánica y discordantemente a las unidades cretácicas y pre-cretácicas, es cubierta concordantemente por la Formación Tarango y sedimentos recientes.

Tercera Unidad Volcánica

Está constituida por rocas silíceas, como toba vítrea, brecha volcánica y riolitas, se encuentran expuestas en el Cerro Las Piletas y Bothá. Descansa concordantemente sobre la segunda unidad volcánica y subyace concordantemente por la Formación Tarango y sedimentos recientes (fig. 2.1).

2.3.4. Rocas intrusivas

En la región afloran numerosos cuerpos intrusivos grandes o como apófisis y diques con una composición variada. Los cuerpos intrusivos se encuentran emplazados en las formaciones Las Trancas, Tamaulipas Superior, Soyatal y El Morro, normalmente presentan aureola de metamorfismo de contacto, produciendo skarn en calizas (Cerro Daxhi), hornfels en lutita (Arroyo Tolimán y Arroyo San Antonio) o silicificación en calizas y lutita (Arroyo Tolimán). Las apófisis son de composición monzonítica, cuarzo-monzonítica, cuarzo-latítica y cuarzo-sienítica; se localizan en Agua Blanca, Arroyo El Efé, Arroyo Tolimán y Mendoza R. (*op. cit.*) los reporta en el noreste del Sector Xajha.

Las edades de los cuerpos intrusivos varían entre 50 y 40 m.a. Kiyokawa (1981, en Carrillo y Suter 1982)

Los diques se encuentran aún más distribuidos, Simmons y Mapes (*op. cit.*) cartografiaron una gran cantidad de ellos, cuya composición varía de andesita, diorita, monzonita, riolita, latita cuarcífera y traquita. A lo largo del arroyo Tolimán puede apreciarse diques de composición monzonítica y diorítica cortando hornfels y al intrusivo félsico del arroyo Tolimán, lo cual implica que estos diques son posterior al intrusivo félsico.

Para los objetivos del estudio, son de gran interés los diques que se encuentran en las calizas de la Formación Tamaulipas Superior en el Cerro El Muhi, al norte de Zimapán, generalmente los diques se encuentran en una zona con brechas de falla, en los que además hay material hidrotermal rellenando fracturas. La presencia de material hidrotermal no necesariamente tiene el mismo origen que los diques de composición máfica, ya que estos estarían asociados a fuentes con material más ricos en silice.

2.3.5. Periodo Cuaternario

2.3.5.1. Conglomerado Zimapán

Fue definido por Simmons y Mapes (*op. cit.*) para referirse a un paquete de conglomerados que aflora en Zimapán y sus alrededores.

Está formado principalmente por clastos subangulosos-subredondeados de calizas, los cuales están cementados por caliche. Simmons y Mapes (*op. cit.*) estiman un espesor de 15 m, su distribución es muy local, ya que solo se encuentra en los alrededores de Zimapán.

2.3.5.2. Sedimentos Recientes

Están formados por depósitos aluviales y coluviales, alojados en los causes y márgenes de los arroyos El Tolimán, Santiago, San Juan, Las Huertas, Agua Blanca, Tierra Colorada, Río Moctezuma y en las vertientes del relieve abrupto (fig. 2.1).

Gravas, cantos rodados, arena, limo y arcilla componen estos depósitos aluviales, el origen de estos clastos es sedimentario (calizas, arenisca y limolita), volcánico (tobas, brechas volcánicas, basaltos, andesitas y piroclastos) e intrusivo (monzonita y diorita).

III. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las principales estructuras geológicas de la región corresponden a pliegues y fallas, producidas por la acción de esfuerzos compresivos y distensivos asociados a la Orogenia Laramide, estos se produjeron principalmente en las rocas jurásicas y cretácicas de la región. Sólo se describen los rasgos más importantes, los cuales serán retomados posteriormente desde del punto de vista del funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos de área.

3.1. PLIEGUES

Entre los más importantes se puede mencionar el anticlinal de Bonanza, anticlinorio El Piñón, , Puerto El Ángel, La Ventolera, Balcones; asociados a estos se encuentran sus respectivos sinclinales como el del Aguacate que ocupan los valles desarrollados paralelos a los anticlinales, algunos de los cuales son cubiertos por rocas volcánicas y vulcano-sedimentarias (fig. 3.1).

El anticlinal de Bonanza está situado en el extremo nororiental del área de estudio, tiene una orientación NW-SE, se trata de un pliegue cerrado, con núcleos en la Formación Las Trancas y flancos en la Formación Tamaulipas Superior.

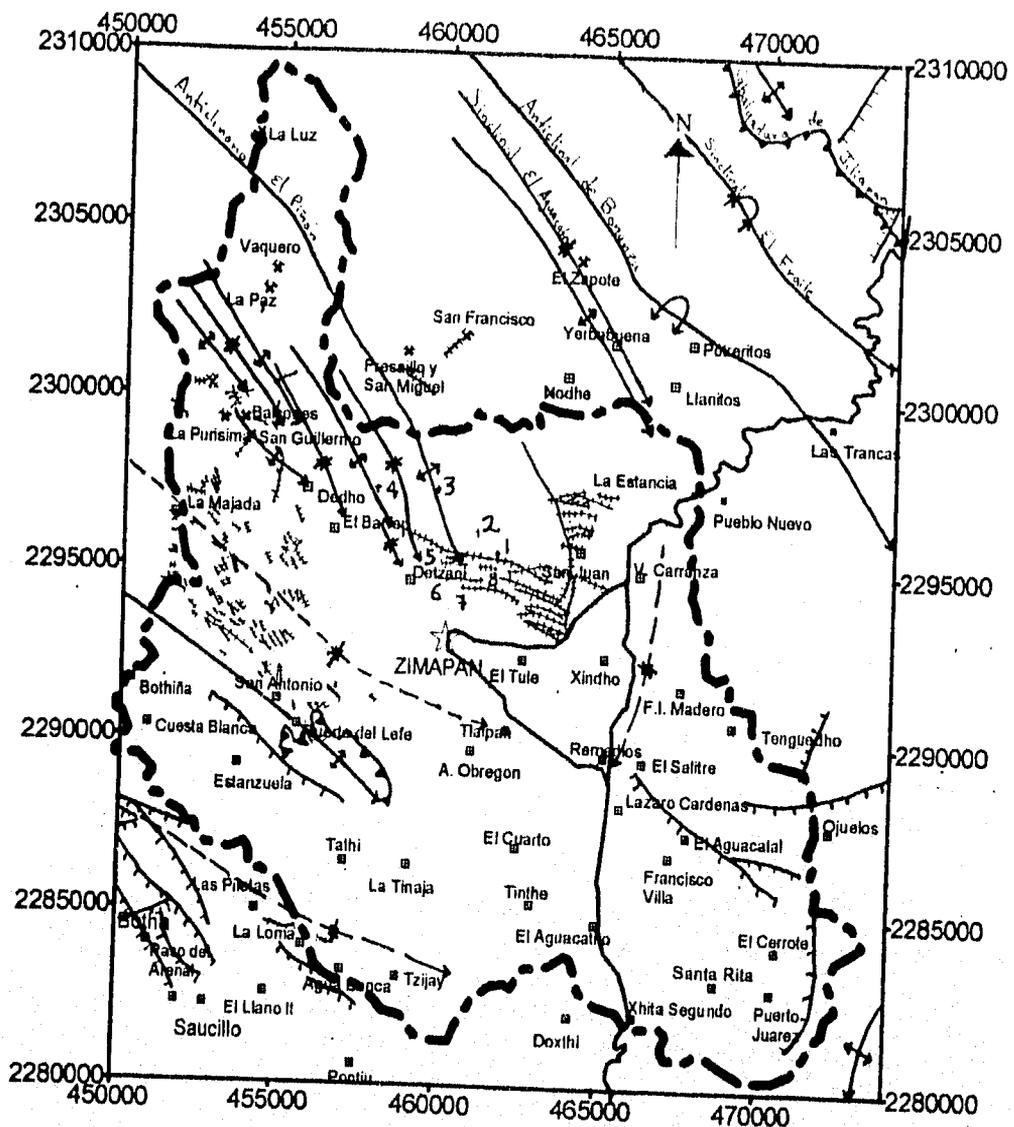
El sinclinal El Aguacate se desarrolla paralelo al flanco occidental del anticlinal de Bonanza, tiene una menor longitud, es un pliegue simétrico buzante al SW, con núcleos en la Formación Soyatal.

El anticlinorio El Piñón atraviesa diagonalmente la parte norte del área de estudio, está formado por múltiples pliegues simétricos pequeños, con orientación NW-SE, buzando al sureste, en las cercanías de los poblados de Las Huertas, El Muhi, Los Carrizos y San Juan.

El anticlinal Puerto El Ángel se encuentra al norte de Zimapán, pasa por el poblado del cual toma el nombre, tiene una orientación NW-SE, se trata de un anticlinal ligeramente asimétrico, buzante al sur cerca de las Huertas y Zimapán (fig. 3.1).

El anticlinal La Ventolera se desarrolla paralelo al Anticlinal Puerto El Ángel, se trata de un anticlinal simétrico y sufre una ligera torsión a la altura del poblado de La Ventolera, en donde se vuelve ligeramente simétrico. Al igual que el anterior buza al sur en la cercanías del poblado de Detzaní (fig. 3.1).

El anticlinal El Carrizal, tiene una orientación similar a los anticlinales de La Ventolera y Puerto El Ángel; se trata de un anticlinal simétrico buzante al sureste cerca del poblado del Dedhó y al parecer sufre una ligera flexión a la altura de la mina de San Guillermo (fig. 3.1).



SIMBOLOS

- Cuenca hidrográfica
- Falla normal
- Cabalgadura
- Anticlinal buzante
- Sinclinal buzante
- Pliegue inferido
- Anticlinal recostado buzante
- Sinclinal recostado buzante
- Diques / brechas de falla
- Poblado
- Mina
- Carretera pavimentada

ESCALA 1:200 000

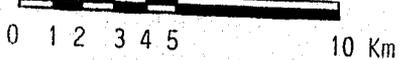
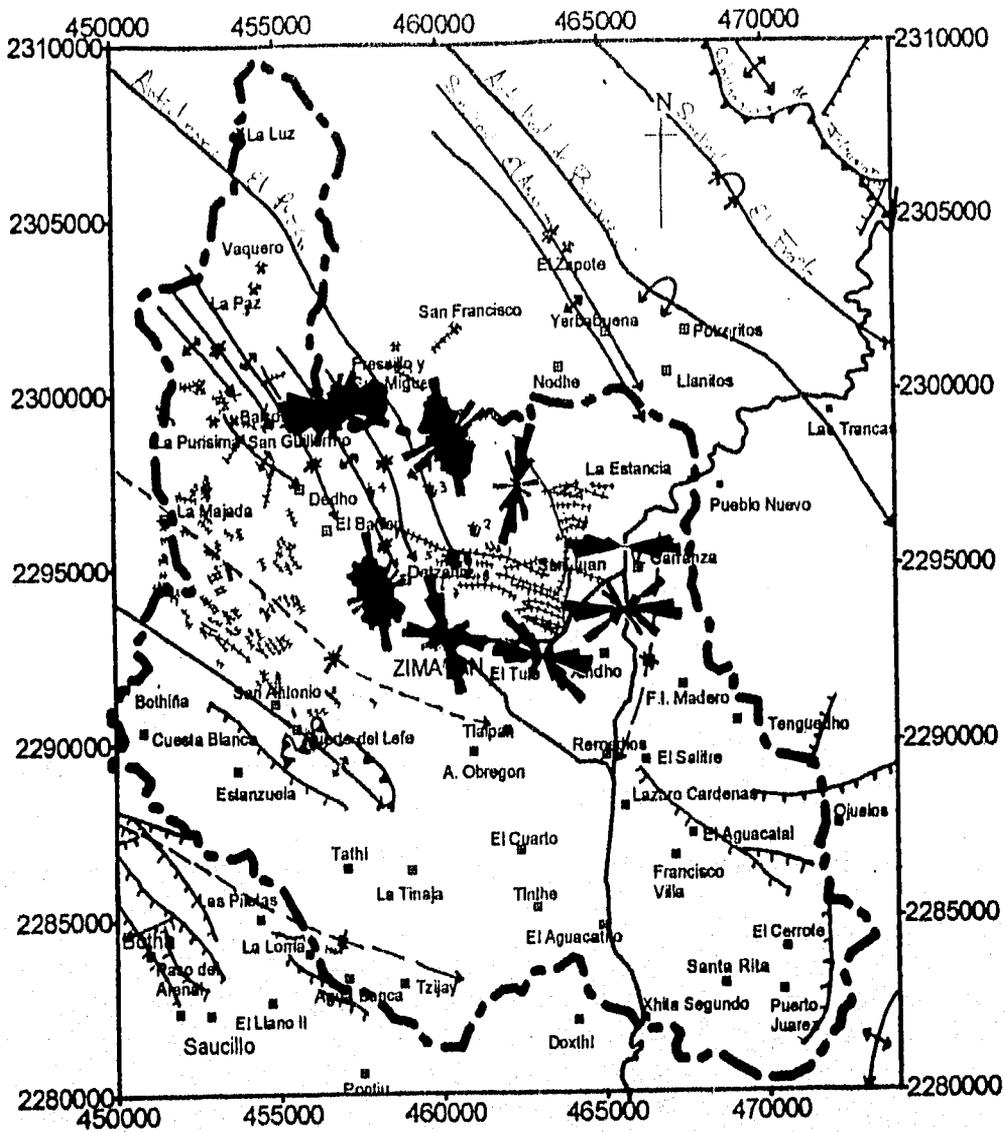


Figura 3.1.- Geología Estructural del area de estudio y localización de secciones



SÍMBOLOS

- Cuenca hidrográfica
- ||||| Falla normal
- ~ Cabalgadura
- ⊕ Anticlinal buzante
- ⊖ Sinclinal buzante
- ⊕ Pliegue inferido
- ⊕ Anticlinal recostado buzante
- ⊖ Sinclinal recostado buzante
- Diques / brechas de falla
- Poblado
- x Mina
- Carretera pavimentada
- >>> Localidad de medición de fracturamiento

ESCALA 1:200 000

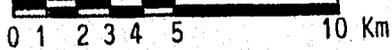


Figura 3.2.- Geología Estructural y localidades de medición de fracturamiento en Zimapán

3.2. FALLAS Y FRACTURAS

Formando parte de las estructuras laramídicas se localizan dos cabalgaduras de gran dimensión a nivel regional, aunque en el área de estudio solo afloran segmentos cortos de estas (fig. 3.1).

La cabalgadura de Jiliapan se localiza en el extremo nororiental, en donde la Formación Tamaulipas Superior se encuentra sobre la Formación Soyatal.

En la cabalgadura del Doctor, en el Cerro El Daxhi se encuentra a la Formación El Doctor sobreyaciendo a la Formación Soyatal, dicha cabalgadura pertenece a la gran estructura llamada Cabalgadura El Doctor, cuya traza es interrumpida en los alrededores de los poblados de Cuesta Blanca y La Estanzuela, debido a la presencia de rocas volcánicas que cubren dicha traza. La dirección de deslizamiento de ambas estructuras es hacia el noreste.

Las estructuras post-laramídicas observadas son principalmente fallas de tipo normal y fallas de desplazamiento lateral las cuales están asociadas a las zonas de brechas de falla y generalmente cortan en forma casi perpendicular a los pliegues laramídicos.

Las fallas normales son de menores dimensiones, se hallan expuestas en rocas volcánicas y sedimentarias, de estas podemos mencionar las fallas que se encuentran en los alrededores de Paso El Arenal y Botha, en donde se tiene una serie de fallas imbricadas con orientación principal NW-SE, con el bloque caído al Suroeste.

En los alrededores de la Estanzuela se encuentra otra falla normal con orientación NW-SE y bloque caído al SW.

Simmos y Mapes (*op. cit.*) reportan una falla normal con el bloque caído hacia el SW, en la barranca El Malacate al NW del poblado El Dedho. Dicha falla normal pone en contacto a las Formaciones Soyatal y Tamaulipas Superior.

Entre Zimapán y El Cerro El Daxhi se localiza otra falla con orientación NW-SE con bloque caído al NE, esta falla pone en contacto a la Formación Soyatal y al Conglomerado El Morro; paralela a ésta se haya otra falla normal con el bloque caído al suroeste.

Al norte del poblado de los Ojuelos, a lo largo de la Barranca Tenghedó, Arteaga P. (*op. cit.*) reporta una falla normal con orientación NW-SE, con el bloque caído al suroeste. Al oriente del poblado de Puerto de Juárez en las unidades volcánicas se observan escarpes de fallas normales con orientación NE-SW con el bloque caído al oeste, fallas similares se observan en la barranca del Aguacatal, (fig. 3.1).

Tanto en los alrededores del poblado del Muhi como al norte de Zimapán se encuentra un conjunto de diques-brechas de falla con orientación casi E-W algunas con relleno de material hidrotermal. En ocasiones puede observarse estrías de falla con desplazamiento lateral,

orientadas N70°E, probablemente la presencia de zonas brechadas se deba este tipo de desplazamientos (fig. 3.1).

En trabajos previos se hace mención a las falla el Muhi (Simmos y Mapes, *op. cit.* y Armienta y Rodríguez, *op. cit.*), sin embargo en el presente estudio no se encontraron evidencias de campo de la presencia de dicha falla, aunque se encontraron zonas de brechas de falla, asociadas a diques que pudiesen corresponder a dicha estructura.

Para el estudio de fracturamiento se realizaron mediciones de fracturas a través de 8 secciones en diferentes sitios, de 8-30 m de longitud, ubicados en las formaciones El Abra y Tamaulipas Superior (fig. 3.3). Del análisis estadístico de las fracturas, se encontró que existen al menos 3 sistemas de fracturas, siendo el más consistente el de dirección E-W. Sin embargo es importante hacer mención que dichas mediciones se realizaron al azar sin tomar en cuenta, la posición de las capas, posición del pliegue, posición de la línea de medición ("scanline") con respecto a la posición del pliegue o de las capas, esto pudo haber influido para que no haya un sistema predominante, como se ve en las rosetas de dirección (fig. 3.3).

IV.- GEOHIDROLOGÍA

4.1. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

A fin de conocer las características de explotación del agua subterránea del área en estudio, se efectuó un censo de aprovechamientos (pozos, norias y manantiales) que consistió en recorridos de campo, durante los cuales se ennumeraron los aprovechamientos consecutivamente de acuerdo a como se fueron registrando. El resumen de dichos datos se encuentra en el anexo A, la localización de los aprovechamientos se muestra en la figura 4.1, elaborado a escala 1:200,000. Esta localización se realizó utilizando el posicionador GPS GARMIN, el cual tiene un margen de error de ± 10 m. A continuación se describen las características más sobresalientes de los aprovechamientos censados en campo.

4.2. CARACTERISTICAS GENERALES

Los aprovechamientos censados fueron 90 en total; de los cuales 13 corresponden a pozos, 52 a norias, 25 a manantiales y 1 galería; además se utilizaron otros 17 aprovechamientos (norias, pozos y manantiales) reportados por otros estudios previos, realizados por C.N.A. (1977, 1992, 1994) y el Instituto de Geofísica (1993 y 1994) (fig. 4.2). Cinco pozos se encuentran perforados en calizas, captando agua de las Formaciones del Cretácico Superior localizados en Zimapán localidades periféricas El Detzani y El Muhi. La elevación mínima del nivel estático en calizas fue de 1708 msnm en el Muhi y la máxima fue de 1782 msnm en Zimapán (Anexo A).

Ocho de los pozos fueron perforados en rocas volcánicas; como se puede ver el número de pozos perforados en la cuenca de Zimapán es muy reducido, teniéndose así profundidades máximas de 180 m y mínimas de 130 m, con caudales máximos de 50 lps, C.N.A. (*op. cit.*). Las elevaciones de los niveles estáticos en pozos en rocas volcánicas varían de 1750 msnm en Alvaro Obregon y 1881.7 msnm en Venustiano Carranza (Anexo A).

Cabe mencionar que los últimos 4 pozos perforados por la Comisión Nacional del Agua fueron en roca volcánica y solo 2 de 4 resultaron productores y únicamente uno está equipado (Pozo San Pedro) y actualmente produce 8 lps.

Las norias son el tipo de aprovechamiento que predomina en el área de estudio, éstas son perforadas con diámetros de 1 a 2.5 m y profundidades de 5 a 30 m, con caudales de 1 a 4 lps C.N.A. (*op.cit.*). La mayor parte de las norias han sido perforadas en rocas volcánicas en los valles de los arroyos Santiago, Agua Blanca y Tolimán en Zimapán.

Respecto a los manantiales censados, 10 afloran en calizas, 2 en skarn, 2 en conglomerados, 3 en caliza-lutita, 7 en roca volcánica y uno en relleno.

4.3. UNIDADES GEOHIDROLOGICAS

Las diferentes unidades hidrogeológicas, fueron clasificadas de acuerdo a estimaciones de conductividad hidráulica relativa como acuíferos (conductividad hidráulica alta), acuitardos (conductividad hidráulica moderada) y acuífugos (conductividad hidráulica baja), lo anterior tomó en cuenta la composición litológica, el grado de fracturamiento, la presencia de aberturas de disolución, así como la presencia de aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias y manantiales) localizados durante el censo de obras hidráulicas realizado en Julio-Agosto de 1995.

Dentro de las unidades que forman acuíferos se encuentran las Formaciones El Doctor, El Abra, Tamaulipas Superior y algunas unidades de rocas volcánicas (brechas, conglomerados y material piroclástico). Como acuitardos se encuentran las Formaciones Tarango, El Morro, Conglomerado Zimapán y algunas unidades volcánicas (tobas, riolitas, andesitas y basaltos). Dentro de los acuífugos se encuentran las Formaciones Soyatal, Las Trancas y Santuario, considerándose como barreras de fondo debido a su alto contenido de lutitas.

Por el tipo de material y por el tipo de porosidad presente en las diferentes unidades hidrogeológicas de la cuenca, el acuífero puede ser de dos tipos:

- | | |
|-------------------------------|---|
| | Formación El Abra (Doctor) |
| Sistema en medios fracturados | Formación Tamaulipas Superior |
| | Rocas Volcánicas (Unidades 1, 2 y 3) |
| | Conglomerado El Morro |
| | Formación Tarango (horizonte conglomeráticos) |
| Sistema en medios granulares | Conglomerado Zimapán |
| | Aluvión |

La importancia acuífera de cada una de estas unidades depende de factores como: área de captación de la recarga, barreras de fondo y laterales y comunicación hidráulica con el resto de las unidades permeables. Desde este punto de vista el Conglomerado El Morro funciona como transmisor; el Conglomerado Zimapán es poco importante económicamente debido a su reducido espesor y distribución; de igual forma el material aluvial carece de importancia debido a su escasa distribución y espesor; la presencia de gran cantidad de material arcilloso y la falta de continuidad de los horizontes conglomeráticos y arenosos en la Formación Tarango reduce su importancia.

Tanto las rocas carbonatadas como las unidades volcánicas tienen mayor importancia, debido a su amplia distribución en la zona de recarga y a sus espesores. Las características y el papel que juegan tanto las rocas carbonatadas como las rocas volcánicas en la hidrodinámica de la cuenca se detallan en el modelo conceptual.

4.4. DIRECCIONES DE FLUJO

Se construyó un plano con configuración del nivel estático para el acuífero en rocas volcánicas con los datos de los aprovechamientos obtenidos durante el censo de Julio de 1995 (figs. 4.1 y 4.2). Cabe mencionar que para dicho plano se utilizaron datos de norias, pozos y manantiales, siendo los primeros los de mayor distribución en el área, debido a que la mayor parte del área se abastece de norias y algunos manantiales.

En general las direcciones de flujo del medio granular y fracturado en las rocas volcánicas siguen las direcciones de flujo superficiales observadas en la cuenca hidrológica. Esta tendencia se observa más tarde en la distribución de iones, en donde sin considerar las norias cercanas a jales mineros y residuos de fundidoras, se tiene una concentración mayor hacia Zimapán.

Para el acuífero en calizas no fue posible construir el plano de elevaciones del nivel estático debido a la falta de datos y a la presencia de una serie de diques en los alrededores de Zimapán que pueden actuar como fronteras de flujo, no permitiendo así la configuración de dichos planos.

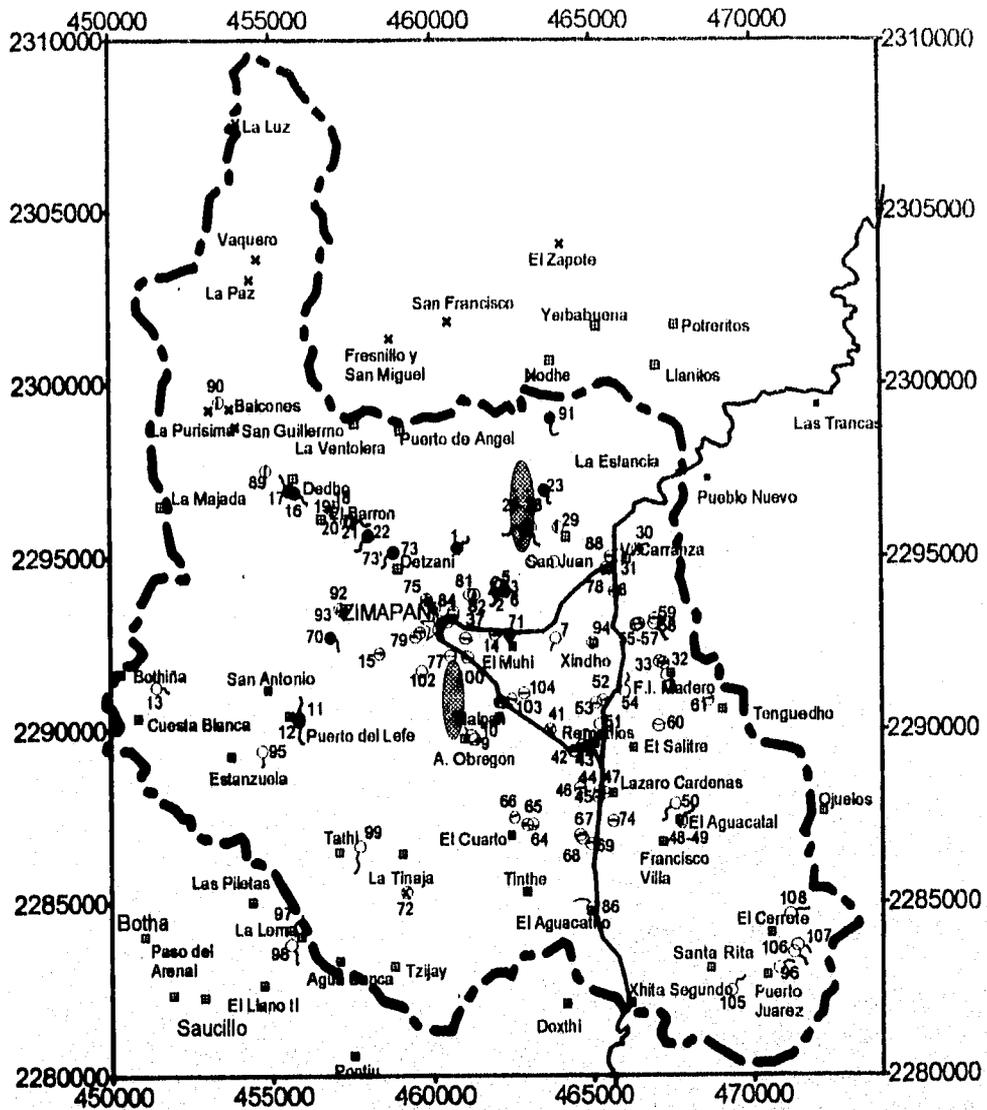
Las direcciones de flujo en medio fracturado definido por rocas calizas tiene una orientación NE-SW, fluyendo hacia el SW y E-W en las zonas de brecha de falla. Es importante mencionar que dichas direcciones de flujo son controladas por el fracturamiento de los pliegues orientados con la misma dirección, así como por las fallas asociadas a los pliegues, diques y zonas de brechas con orientación E-W al norte de Zimapán (figs. 3.1 y 3.2).

4.5. MODELO CONCEPTUAL

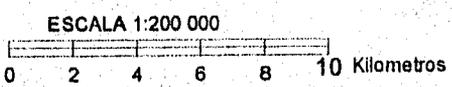
El área de interés quedó delimitada por la cuenca hidrológica superficial del arroyo Tolimán. Dada la relación espacial que existe entre las diferentes unidades geohidrológicas, se consideraron dos acuíferos, formados por calizas fracturadas y por rocas volcánicas en medio granular y fracturado, separados hidráulicamente por un acuífugo (Formación Soyatal).

Los acuíferos en rocas volcánicas son tanto del medio granular como del medio fracturado y se consideran en esta área como de flujo local, los acuíferos en calizas fracturadas fueron consideradas como de flujo intermedio a regional.

Realizando un análisis de los componentes de la cuenca hidrológica podemos decir que la zona de recarga de los medios fracturados en las rocas volcánicas, se encuentran en la parte sur de la cuenca, en los cerros cercanos a los poblados de La Loma, Agua Blanca, Douthi, Xhita Segundo, El Cerrote, Ojuelos, Tenguedhó y Venustiano Carranza y sus zonas de descarga se encuentran en las cercanías de los poblados de Tathí, Temuthé, El Aguacatal Puerto Juárez, Santa Rita, Alvaro Obregón, El Salitre, Xindhó y Zimapán (fig. 4.1).

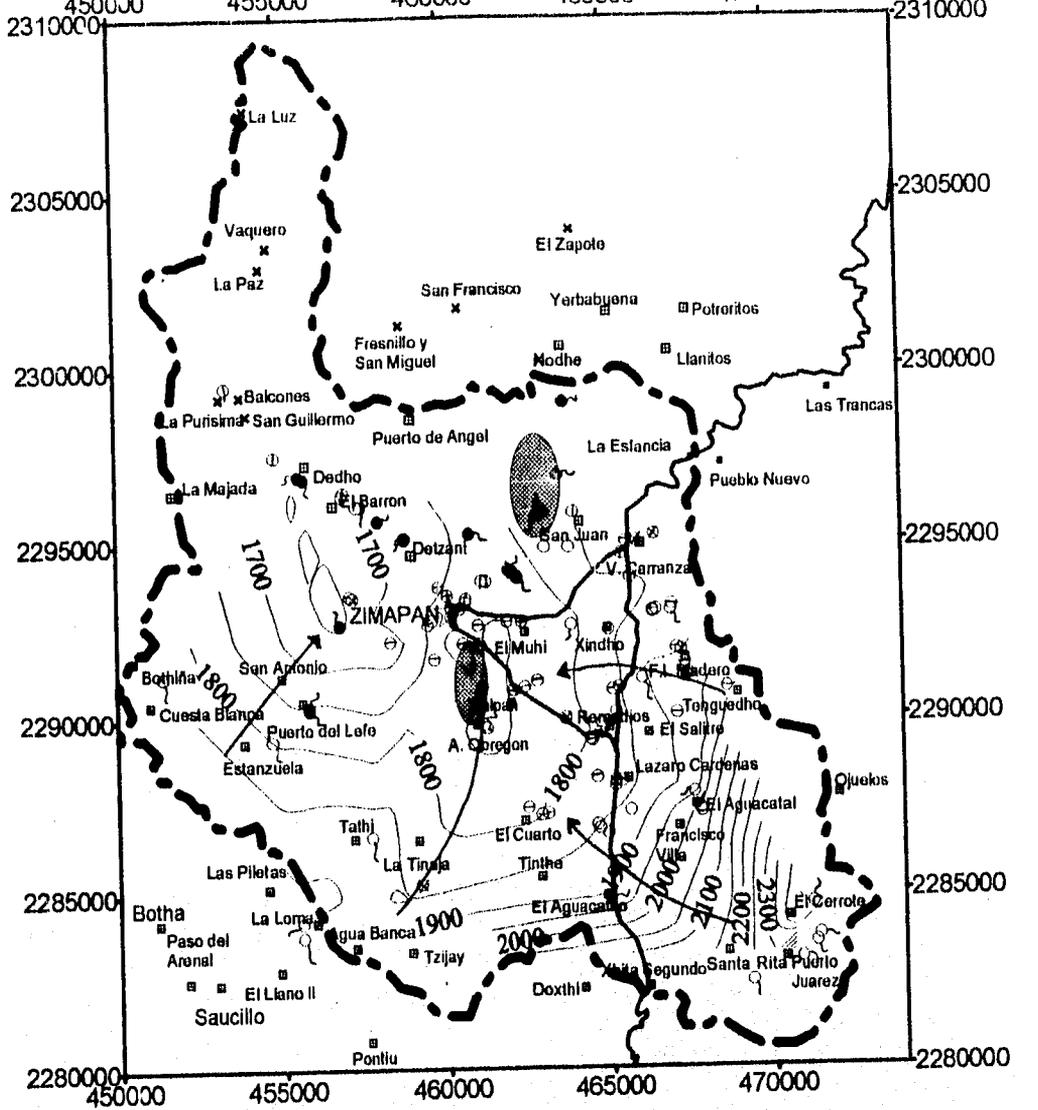


SIMBOLOS



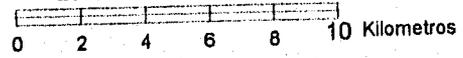
- Cuenca hidrográfica
- Curva de igual valor de elevación del nivel estático, cada 100 m (elevación sobre el nivel del mar)
- Líneas de direcciones de flujo
- Pozo en caliza
- Pozo en roca volcánica
- Noria en caliza
- Noria en roca volcánica
- Manantial en caliza
- Manantial en roca volcánica
- Cabeccra municipal
- Poblado
- Mina
- Carretera pavimentada
- Área propuesta para perforaciones exploratorias

Figura 4.1.- Localización de aprovechamientos hidráulicos en la cuenca hidrográfica del Tolimán



SIMBOLOS

ESCALA 1:200 000



- Cuenca hidrográfica
- Curva de igual valor de elevación del nivel estático, cada 100 m (elevación sobre el nivel del mar)
- Líneas de direcciones de flujo
- Pozo en caliza
- Pozo en roca volcánica
- Noria en caliza
- Noria en roca volcánica
- Manantial en caliza
- Manantial en roca volcánica
- Cabecera municipal
- Poblado
- Mina
- Carretera pavimentada
- Área propuesta para perforaciones exploratorias

Figura 4.2.- Elevación del nivel estático del acuífero en rocas volcánicas de la cuenca hidrográfica del Toluca (Julio, 1995)

El acuífero en rocas volcánicas tiene como fronteras en su base a la Formación Soyatal, lateralmente la Formación Soyatal actúa en ocasiones como frontera en los flancos de sus pliegues (bordes del valle del Tolimán y Tenguedhó).

Por otro lado los cuerpos intrusivos y la gran cantidad de diques en los alrededores de Cuesta Blanca, San Antonio, Puerto Lefe, y Agua Blanca también actúan como fronteras laterales. Basados en lo anterior, al parecer la principal salida que tiene el acuífero en rocas volcánicas es a través del valle del arroyo Tolimán.

La presencia de fallas normales como la del Cerrote y el Aguacatal actúan como zona de alta conductividad hidráulica y como conductos principales de flujo como lo manifiestan los manantiales del Cerrote, Puerto de Juárez y El Aguacatal (fig. 4.1).

Para los medios fracturados formados en calizas, el área de recarga se encuentran en las sierras altas formadas por los anticlinales de Bonanza, Puerto El Angel, La Ventolera, El Carrizal y el Anticlinorio de El Piñon en donde se tiene una precipitación anual mayor (800 mm/año) y una mayor vegetación. Se considera como áreas de descarga, la zona de manantiales de Los Carrizos, Las Huertas, San Juan y Los Barron y el 3x. Este último aunque tiene un gasto muy bajo se encuentra cerca de la cima del cerro al norte de Zimapán, a unos 2002 msnm; de acuerdo a Toth (1966), las aguas bicarbonatadas evolucionan a facies sulfatadas hacia las áreas de flujo ascendente en las zonas de descarga, esto se confirma con los valores altos de sólidos totales disueltos (STD), SO_4 y Cl para este manantial (Anexo A).

Al parecer dicha zona de descarga esta asociada a la gran cantidad de diques y brechas de falla con orientación E-W que cortan a las calizas de la Formación Tamaulipas Superior, formando barreras de muy baja conductividad hidráulica en presencia de diques y zonas de alta conductividad hidráulica en presencia de brechas de falla, evidencia de esto es la presencia de freatofitas o cambio de tipo de vegetación, así como la presencia de manantiales en los bajos topográficos alineados a las zonas de brechas (manantial San Juan, Las Huertas, Carrizos y los Barrón).

4.6. HIDROGEOQUIMICA

La calidad hidrogeoquímica del agua de la zona de estudio fue evaluada con la ayuda de la base de datos de análisis químicos realizados por el Departamento de Química Analítica del Instituto de Geofísica durante los años de 1992, 1993, 1994 y 1995, Armienta *et al.* (*op. cit.*), C.N.A. 1977 y 1993 (*op. cit.*).

De acuerdo a los diagramas de Piper, el agua de la región se clasificó como bicarbonatada cálcica las asociadas principalmente a calizas, mixtas las localizadas en las inmediaciones de Zimapán y algunas como sulfatada calcica el manantial 3x y las ubicadas en sitios cercanos a jales (figs. 4.3 y 4.4).

Como era de esperarse, esto mismo fue observado en los diagramas de Schoeller, en donde puede verse al menos 3 agrupamientos de aguas (figs. 4.5 y 4.6). La distribución espacial de

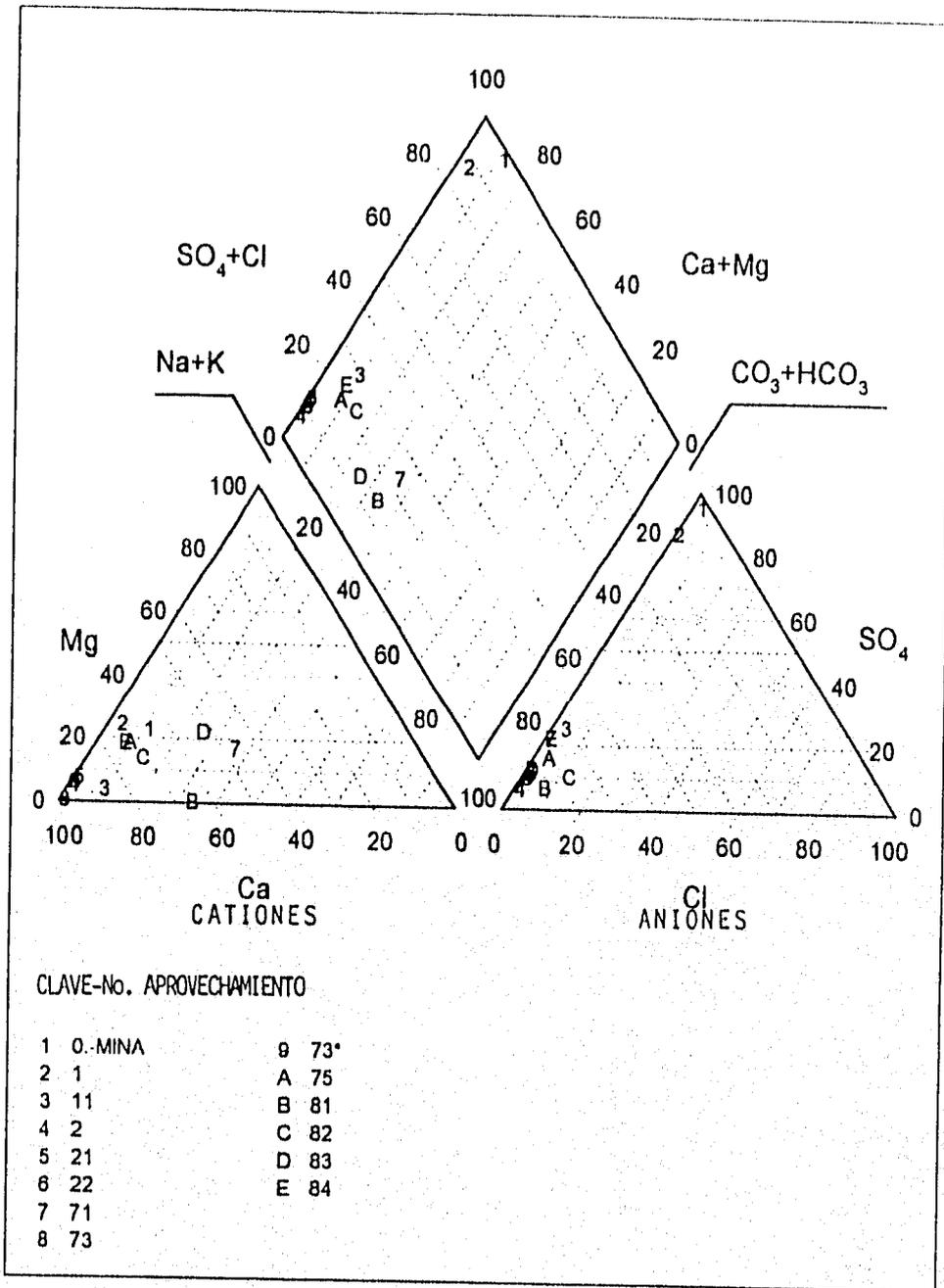


Figura 4.3.- Diagrama de Piper para acuífero en calizas fracturadas

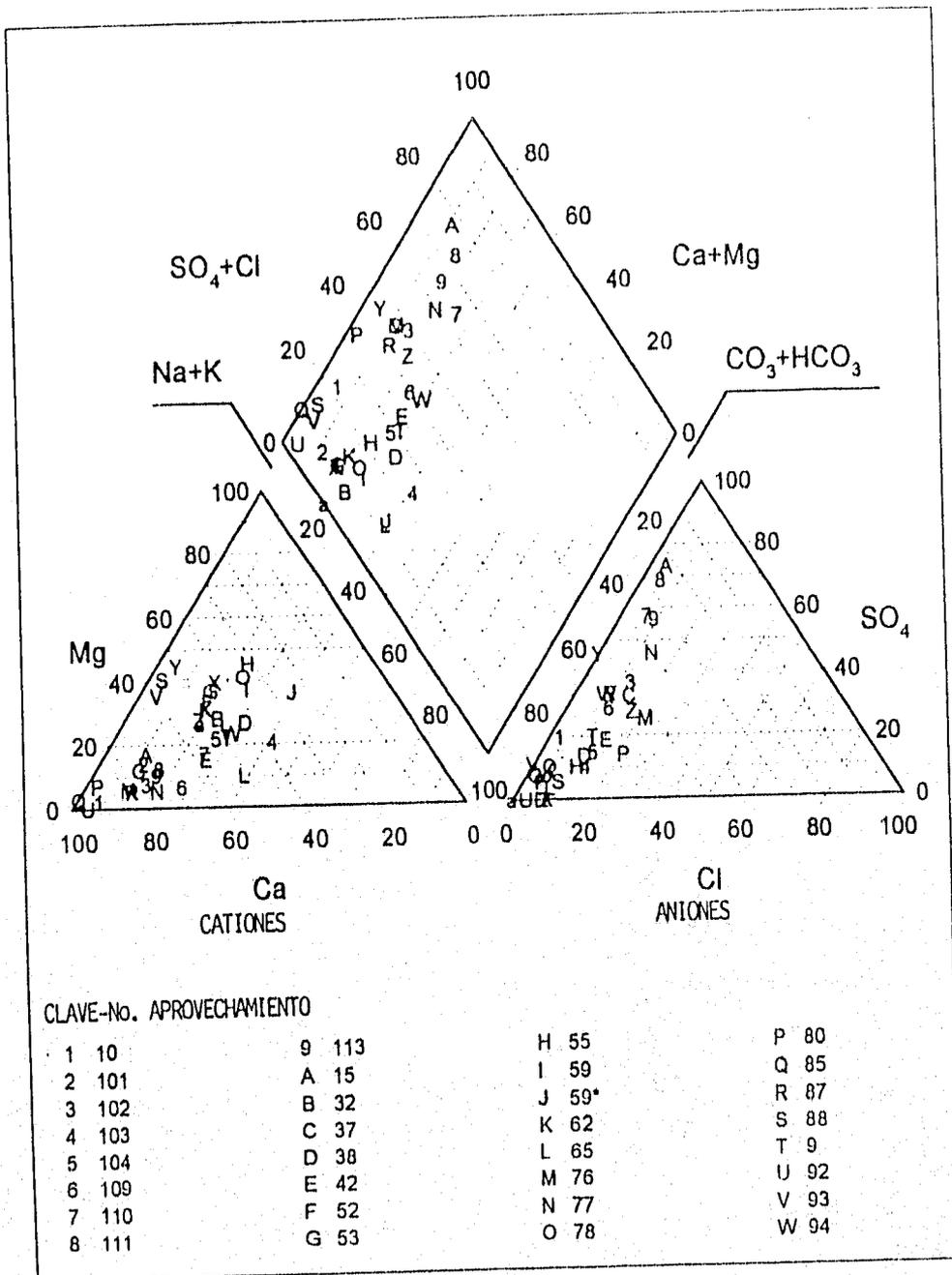


Figura 4.4.- Diagrama de Piper para acuífero en rocas volcánicas

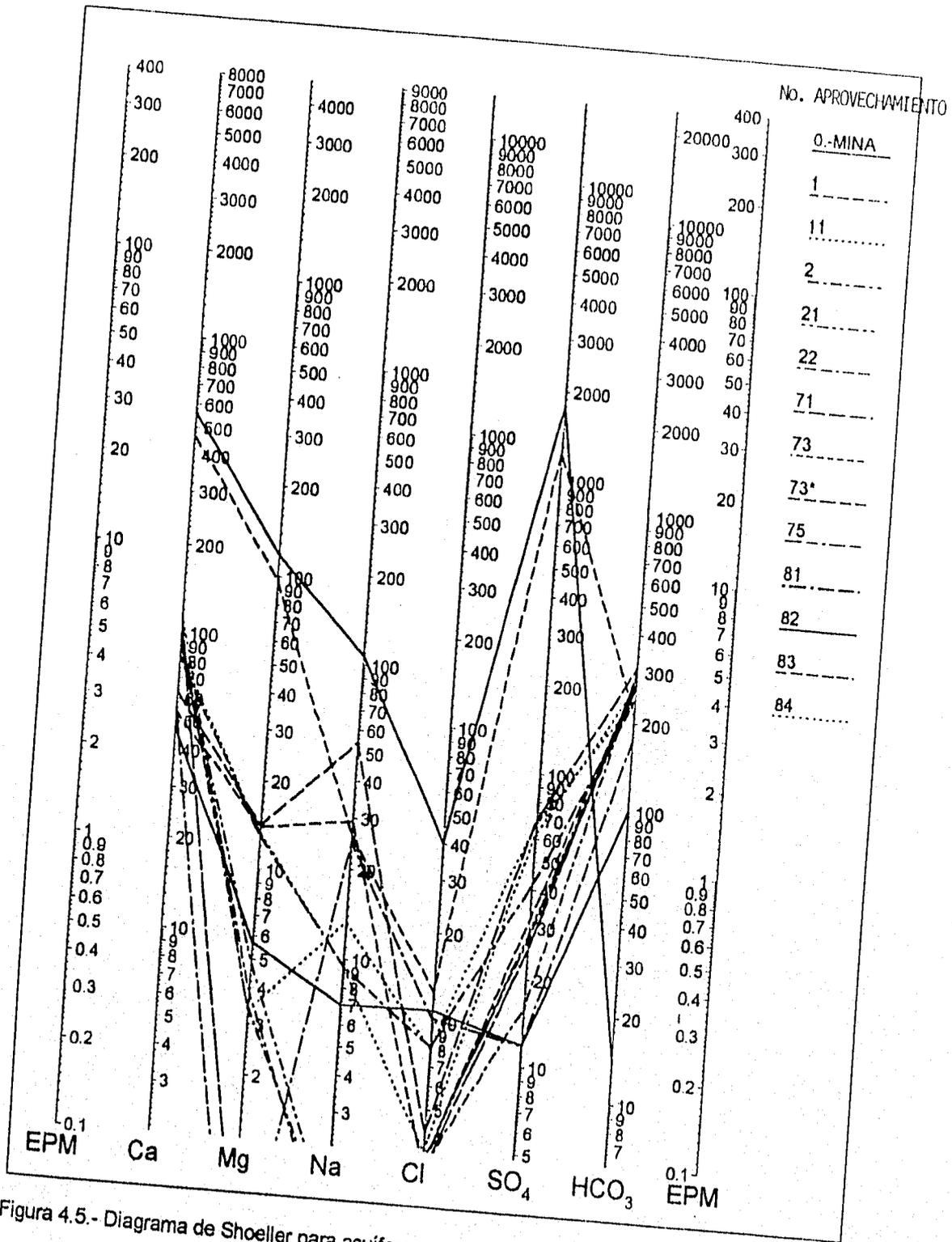


Figura 4.5.- Diagrama de Shoeller para acuífero en calizas fracturadas

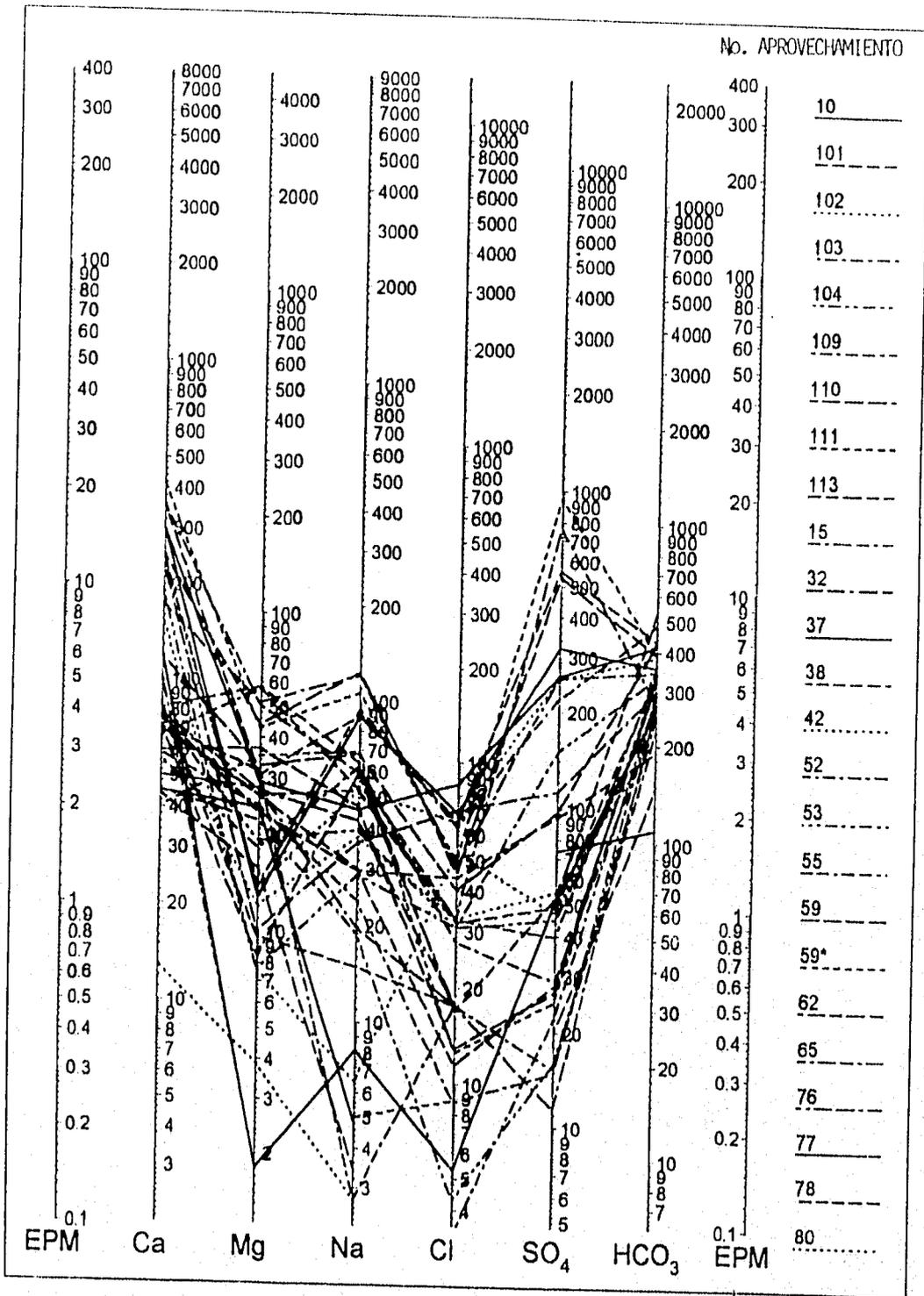


Figura 4.6.- Diagrama de Shoeller para acuífero en rocas volcánicas

los diferentes tipos de agua en la cuenca se pueden observar en los diagramas de Stiff (figura 4.7).

Con la mayor cantidad de datos de los cuales fue posible obtener sus coordenadas se construyeron mapas de igual concentración de Na, K, Mg, Ca, Cl, HCO₃, SO₄, SiO₂ y As en la cuenca hidrológica.

Para el Potasio los valores más bajos se localizan en la zona de recarga (cerca de los límites de la cuenca hidrológica), en tanto que los mayores valores se ubican en los alrededores de los poblados de Zimapán, Tlalpan y El Cuarto (fig. 4.8).

Valores altos de Mg se encuentra en aprovechamientos como el manantial 3x, Pozo Zimapán Viejo, en los alrededores de Zimapán y Pozo San Pedro y Noria la Higuera y Tenguedhó, en tanto que los valores más bajos se encuentran en la zona de recarga (fig. 4.9).

El Ca tiene sus valores más bajos en las zonas de recarga, en tanto que los valores más altos se encuentran en las norias de Zimapán y en el manantial 3x (fig. 4.10).

Se observa un comportamiento similar en los valores bajos en cloruro y sus valores altos se localizan en la noria los Baños y pozo Santa María Cerca de Zimapán (fig. 4.11).

Valores altos de SO₄, se encuentran en el manantial 3x, Zimapán, El Dedho, Mina El Carrizal que corresponden a zonas reductoras (fig. 4.12).

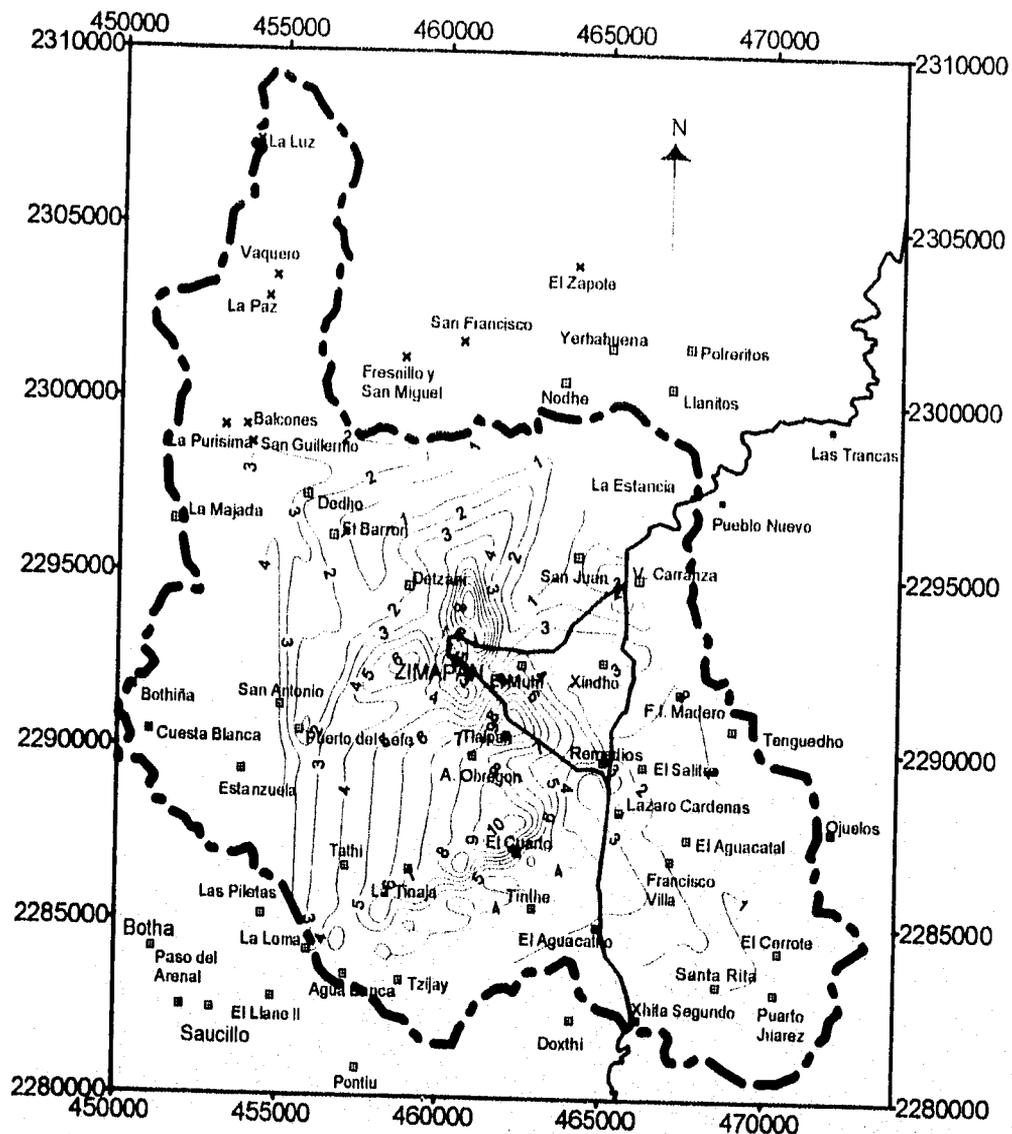
Los menores valores de Na se localizan al sur del área, en tanto que los mayores se localizan en los alrededores de Zimapán y la Higuera (fig. 4.13).

Los valores más bajos de bicarbonato se ubican al sur de la cuenca, en el acuífero volcánico, en tanto que los más altos se localizan al norte de la misma, en el acuífero de calizas (fig. 4.14).

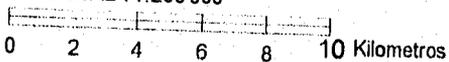
Los valores altos de SiO₂ están asociados a los aprovechamientos en rocas volcánicas, se tienen valores altos en El Cuarto, Alvaro Obregon, Francisco I. Madero, Tlalpan, El Salitre, Higuera, Huizache, en tanto que los valores menores se encuentran en Zimapán (fig. 4.15).

El Arsénico presenta concentraciones altas en el Muhi, Zimapán, El Detzani y La Ortega, para el caso de los aprovechamientos de Zimapán estos valores están relacionados con los jales de minas y los residuos de fundidoras Armienta *et al.* (*op. cit.*), en tanto que en los aprovechamientos en calizas están relacionados con diques y cuerpos intrusivos cercanos a dichos aprovechamientos (fig. 4.16).

En general los valores bajos en iones se encuentran en las áreas de recarga y estos se incrementan con la distancia hacia la zona de descarga aunque en Zimapán se encuentran anomalías provocadas por la presencia de jales y residuos de fundidoras.



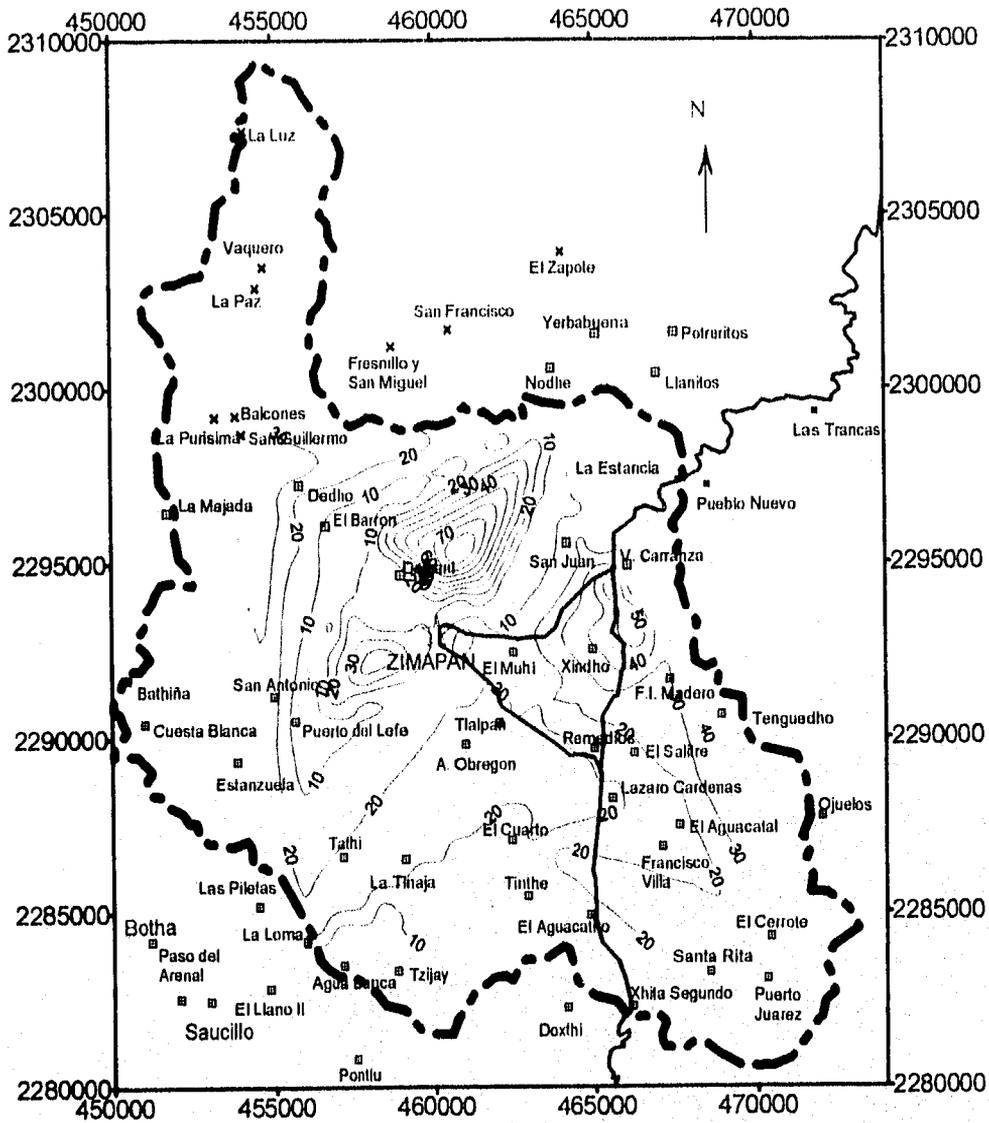
ESCALA 1:200 000



SIMBOLOS

- Cuenca hidrográfica
- Curva de igual valor de Potasio, cada 1 mg/l
- Cabecera municipal
- Poblado
- Mina
- Carretera pavimentada

Figura 4.8.- Distribución espacial de iones de Potasio en la cuenca hidrográfica del Tolimán



SIMBOLOS

- Cuenca hidrográfica
- Curva de igual valor de Mg, cada 10 mg/l
- Cabecera municipal
- Poblado
- Mina
- Carretera pavimentada

Figura 4.9.- Distribución espacial de iones de Magnesio en la cuenca hidrográfica del Tolimán

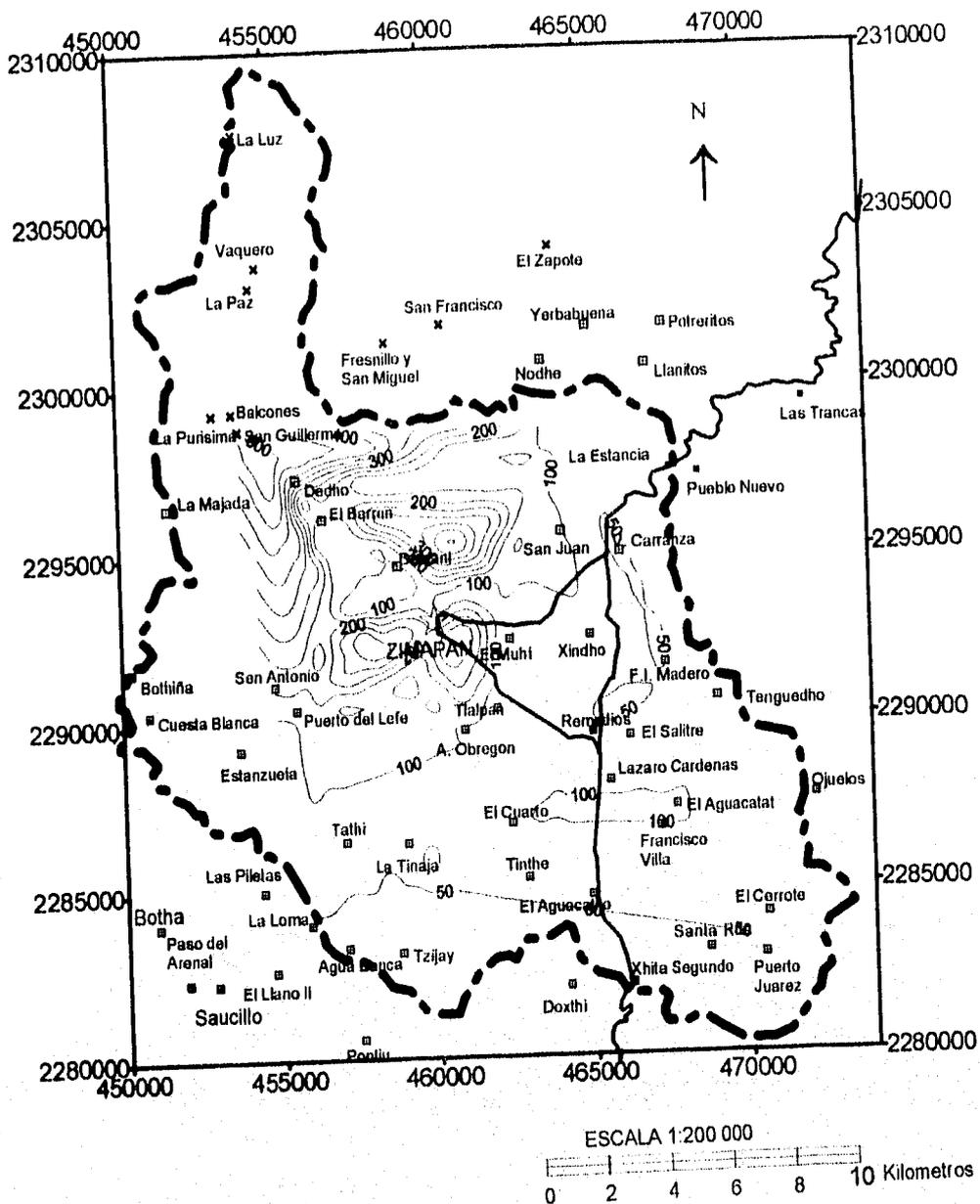
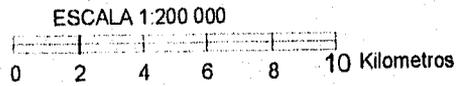
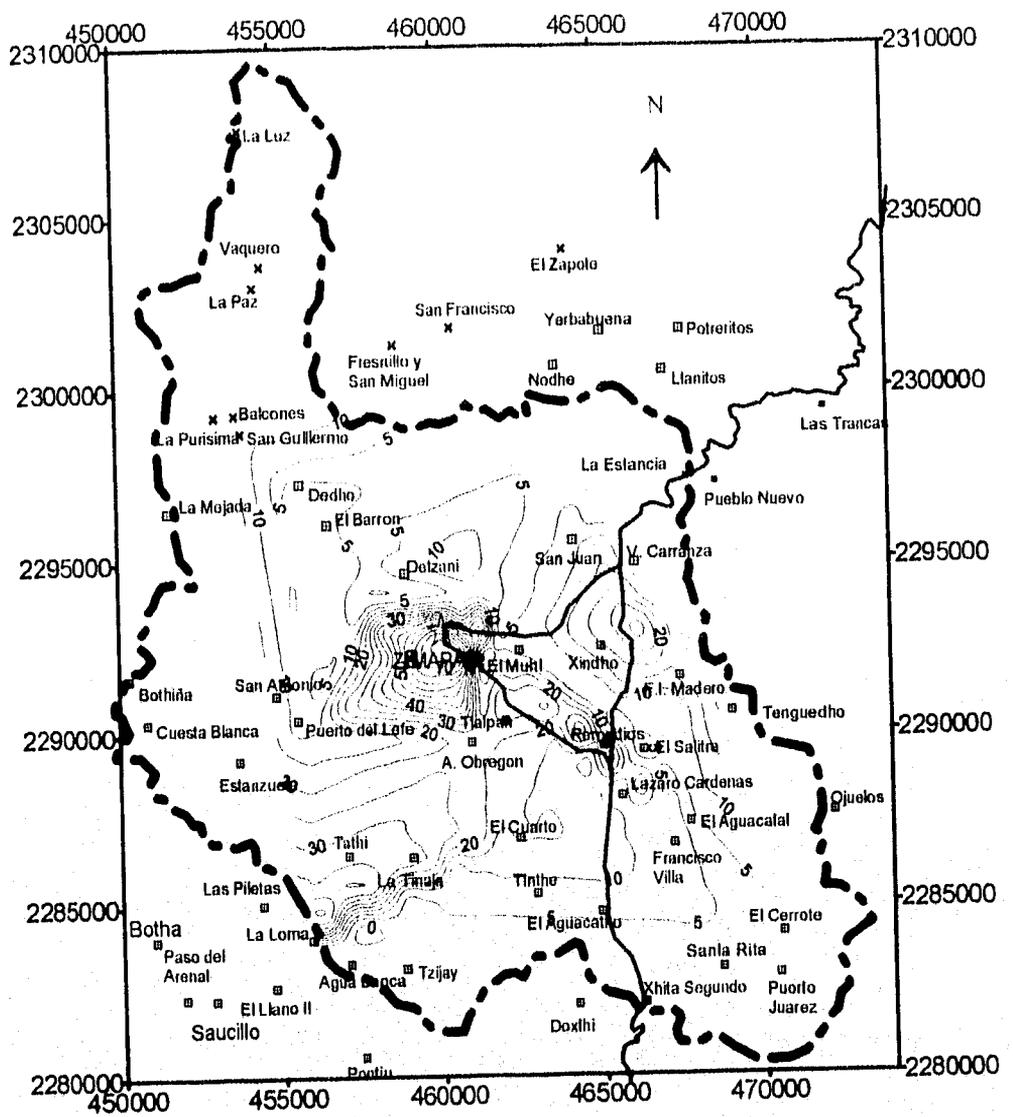


Figura 4.10.- Distribución espacial de iones de Calcio en la cuenca hidrográfica del Tolimán



SIMBOLOS

- Cuenca hidrográfica
- Curva de igual valor de Cl, cada 5 mg/l
- Cabecera municipal
- Poblado
- Mina
- Carretera pavimentada

Figura 4.11.- Distribución espacial del ión cloruro en la cuenca hidrográfica del Tolimán

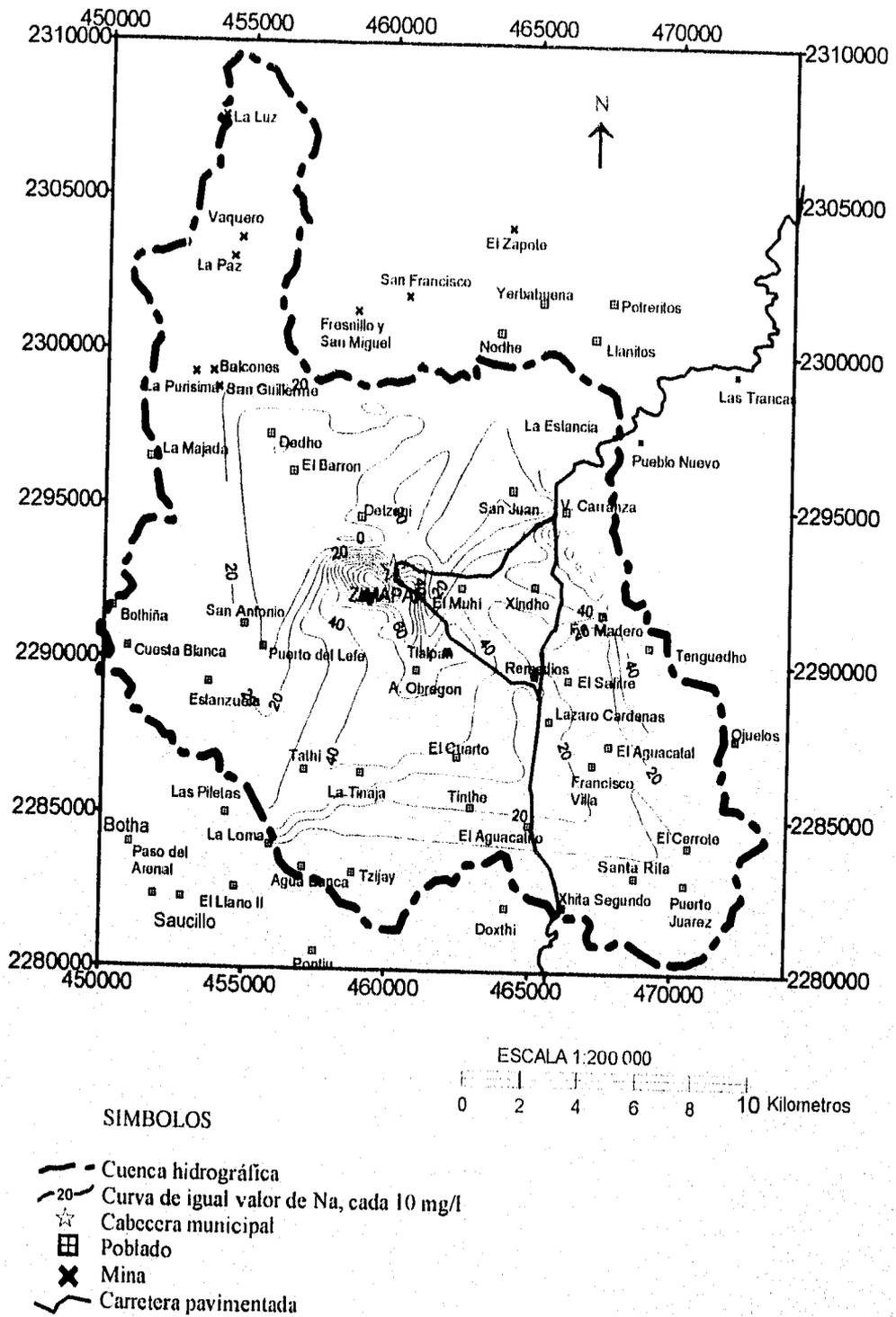


Figura 4.13.- Distribución espacial de iones de Sodio en la cuenca hidrográfica del Tolimán

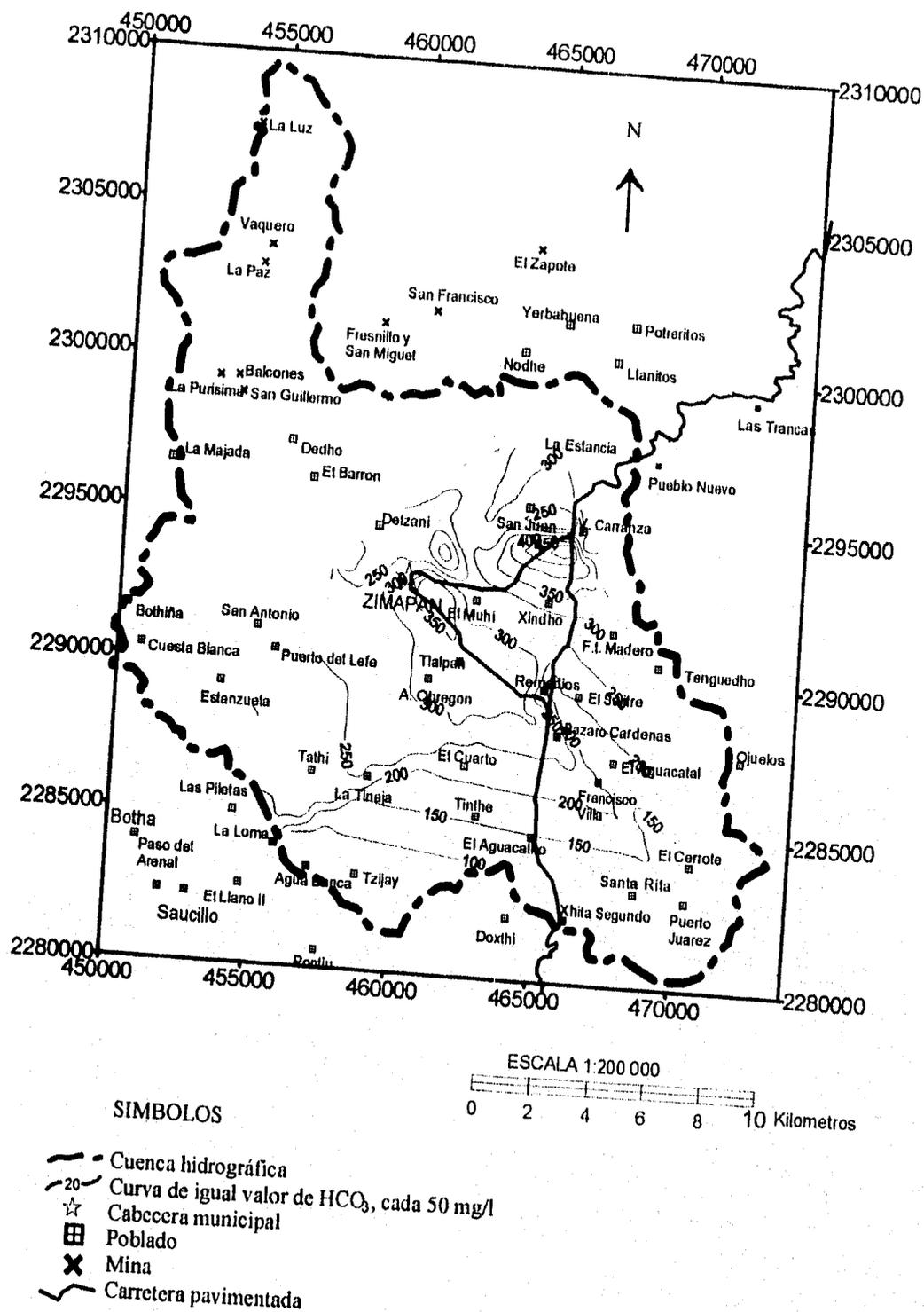
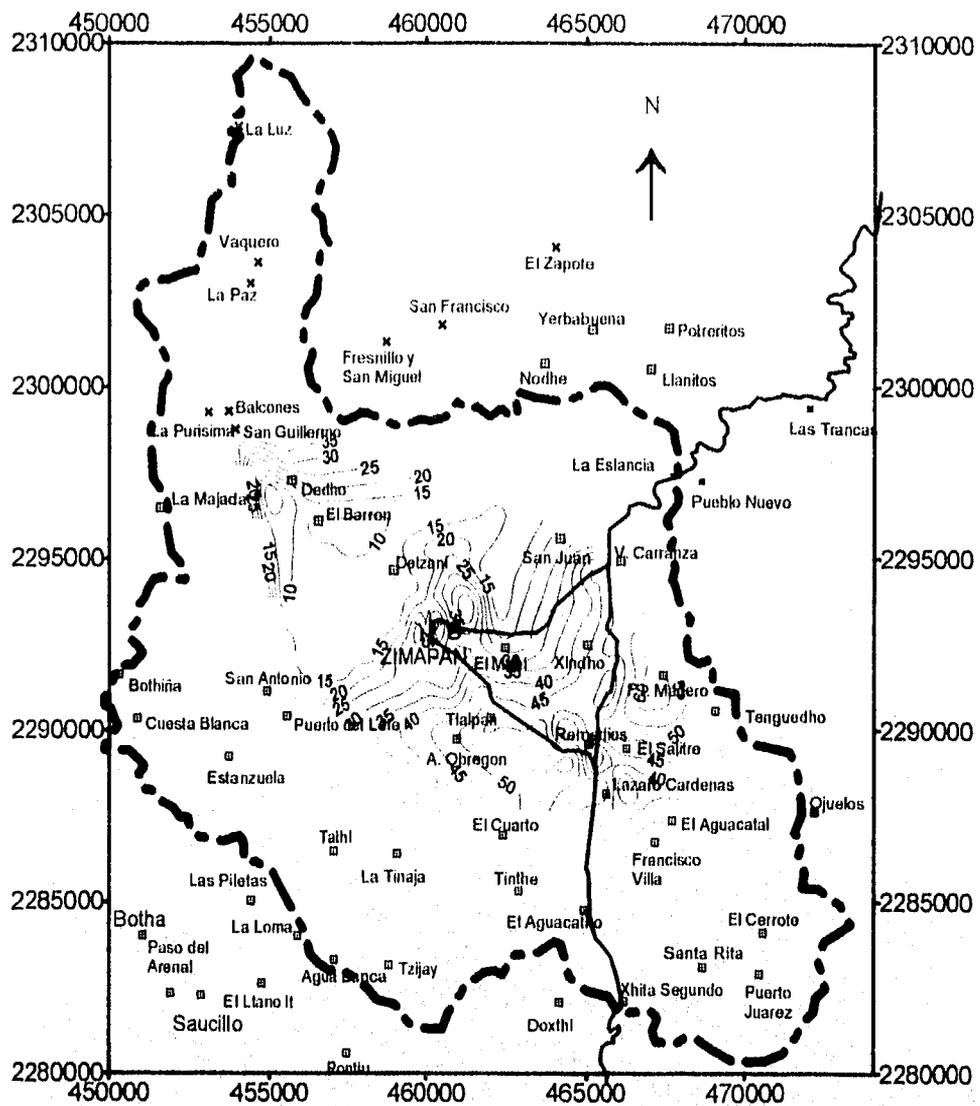


Figura 4.14.- Distribución espacial de iones de bicarbonato en la cuenca hidrográfica del Tolimán



ESCALA 1:200 000
 0 2 4 6 8 10 Kilometros

SIMBOLOS

- Cuenca hidrográfrica
- 20- Curva de igual valor de SiO_2 , cada 10 mg/l
- ☆ Cabecera municipal
- ▣ Poblado
- × Mina
- Carretera pavimentada

Figura 4.15.- Distribución espacial de sílice en la cuenca hidrográfrica del Tolimán

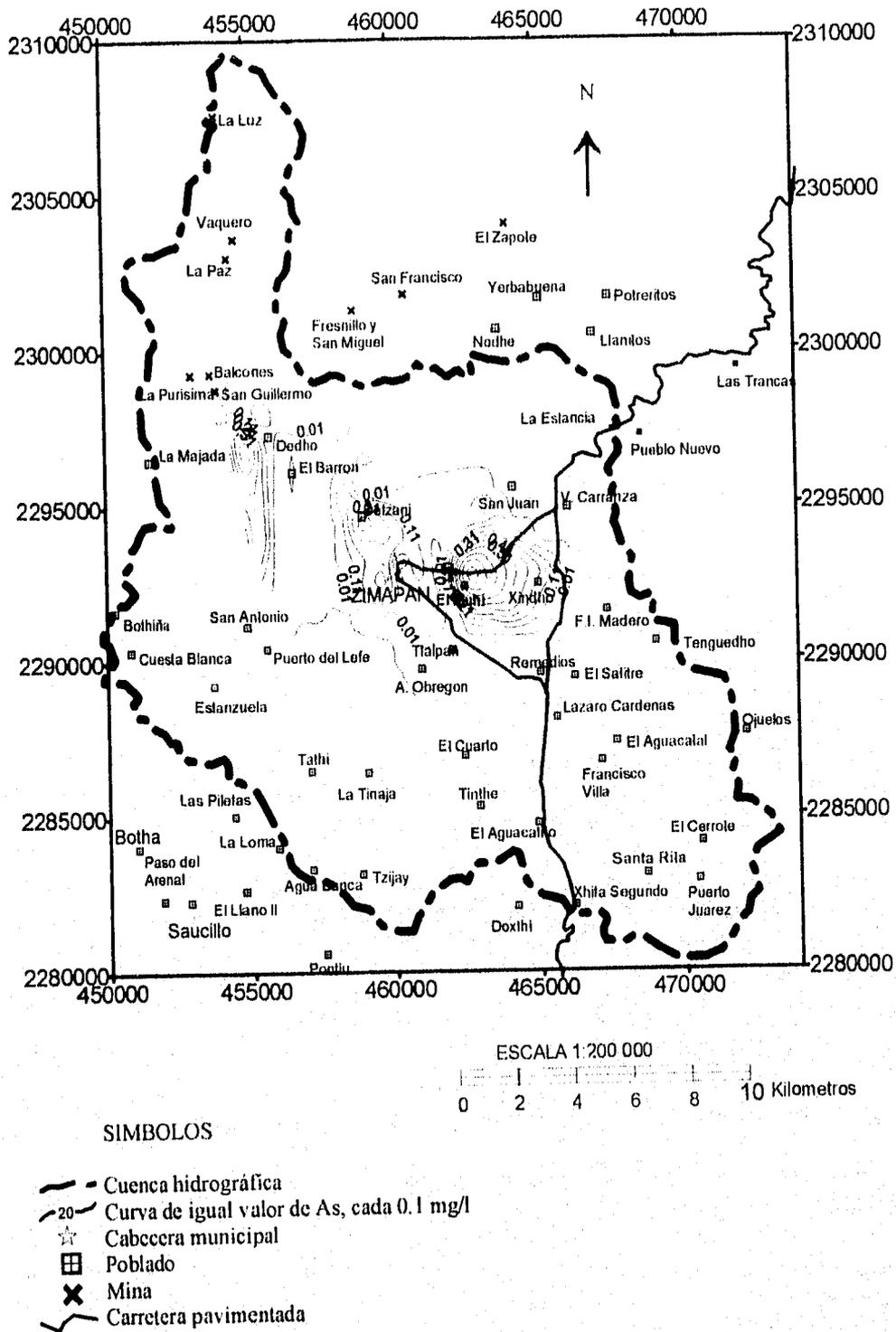


Figura 4.16.- Distribución espacial de Arsénico en la cuenca hidrográfica del Tolimán

Además de las configuraciones antes descritas se construyeron diagramas de composición, utilizando diferentes combinaciones de STD, Cl, SiO₂ y As con los diferentes iones (figs. 4.17-4.20).

De diagramas relacionados con STD, solo los de SO₄ y Ca presentaron una buena correlación positiva (coeficiente de correlación 0.91 y 0.93 respectivamente) (figs. 4.17a-b), los demás presentan una correlación pobre (coeficiente de correlación de 0.1-0.68) (figs. 4.17c y 4.18a-d).

En general en las asociaciones con Cl los aprovechamientos en calizas se agrupan con valores bajos de K, Mg, Na y Ca. Los aprovechamientos en rocas volcánicas tienen valores altos en los iones antes mencionados, en tanto que las norias de Zimapán se presentan muy dispersas (fig. 4.19a-d).

Para el caso de As-SiO₂ algunos aprovechamientos tienen valores altos (Muhi, Zimapán II, B28 y Detzani) en acuíferos en calizas y norias de Zimapán cercanas a jales de minas y residuos de fundidoras (fig. 4.20a).

En los diagramas de composición de SiO₂-Mg y SiO₂-SO₄ se nota muy bien la diferenciación de los aprovechamientos del acuífero en rocas volcánicas y del acuífero en calizas; de tal manera que los aprovechamientos con valores bajos de SO₄, Mg y SiO₂ pertenecen a las calizas (en el caso de que tiendan a los valores altos se debe a que están asociados a la cercanía de diques o cuerpos intrusivos). Los aprovechamientos con altos valores de SiO₂-Mg pertenecen a los acuíferos en rocas volcánicas (figs. 4.20b-c).

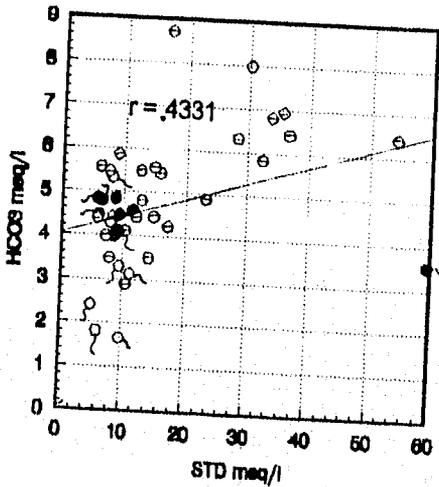
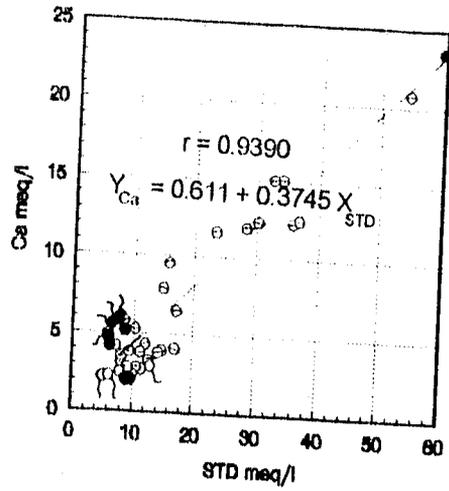
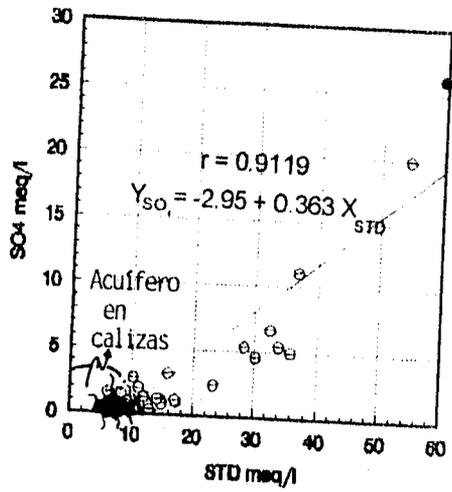
En las asociaciones con Arsénico se tiene una tendencia de los aprovechamientos en calizas altos en As y bajos en SO₄ a diferencia de norias de Zimapán cercanas a jales y a residuos de fundidoras que presentan mayor concentración de SO₄ (fig. 4.20d).

Por otro lado se puede ver que tanto en los diagramas de composición como en los planos de distribución de iones, los aprovechamientos de Zimapán presentan anomalías, esto quizás se deba a la presencia de jales y desechos de fundición que provocan mezclas de lixiviados con el acuífero.

4.7. HIDROGEOQUIMICA DEL ARSÉNICO

4.7.1. FUENTES NATURALES DEL ARSÉNICO EN EL AREA DE ZIMAPÁN

La fuente de Arsénico (As) para el agua, más importante dentro del área de estudio según Armienta *et al.* (*op. cit.*) son los minerales hipogénicos como Arsenopirita, Rejalgar y Oropimente, aunque en menor cantidad la Lolingita y Tenantita; dentro de los minerales supergénicos se encuentran la Adamita, Mimetita, Olivinita y Escoridita (tabla 4.1.), hipotéticamente estas concentraciones de minerales pueden ser asociadas al zoneamiento en cuerpos mineralizados, en donde se tiene una zona oxidada, una zona de enriquecimiento secundario y una zona de mineral primario, asociado al cuerpo mineralizado se tiene una zona de skarn (fig. 4.21).



SIMBOLOS

- Pozo en calizas
- Pozo en roca volcánica
- ⊖ Noria en calizas
- ⊖ Noria en roca volcánica
- Manantial en calizas
- Manantial en rocas volcánicas

Figura 4.17.- Diagramas de composición de SO₄/STD, Ca/STD y HCO₃/STD con coeficientes de correlación (r), datos de la cuenca hidrográfica del Tolimán

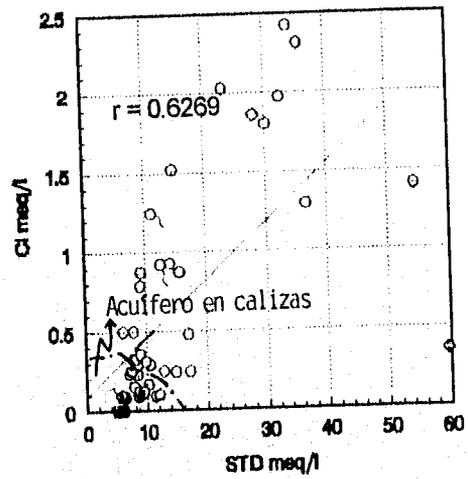
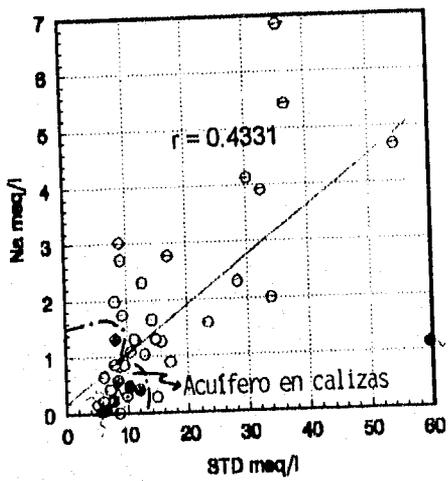
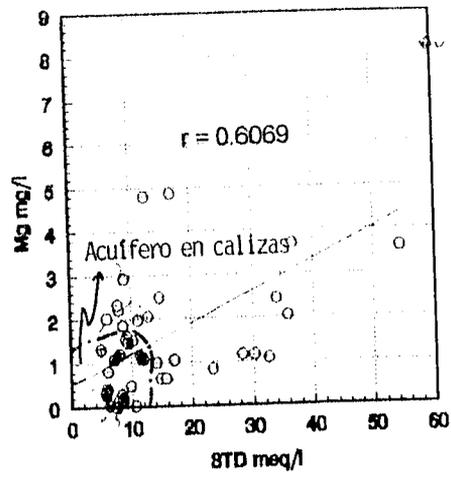
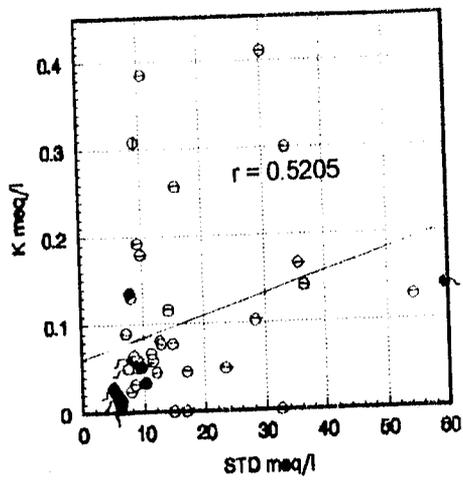


Figura 4.18.- Diagramas de composición de K/STD, Mg/STD, Na/STD y Cl/STD, con coeficientes de correlación (r), datos de la cuenca hidrográfica del Tolimán

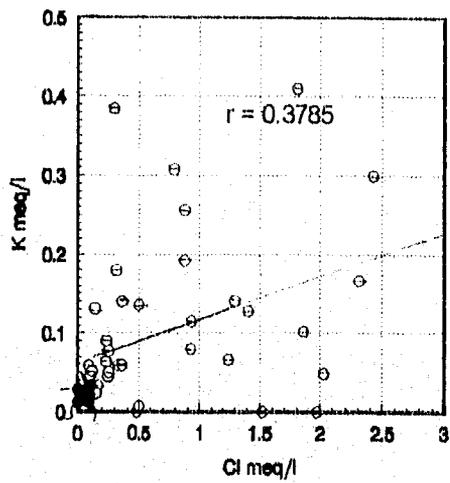
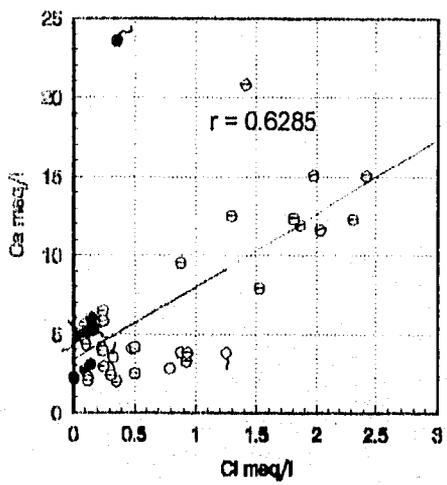
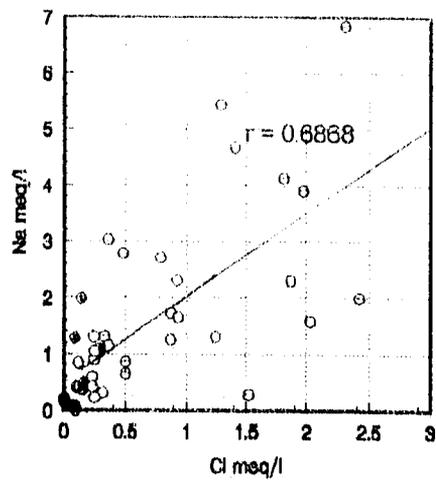
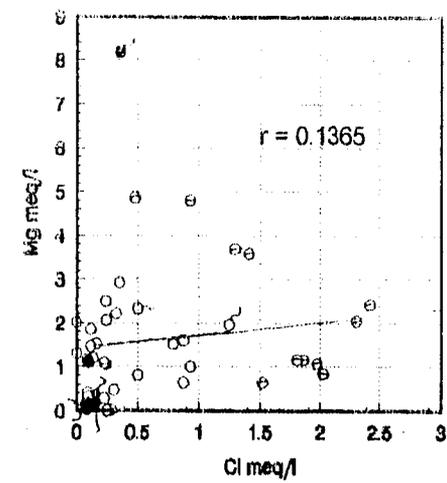


Figura 4.19.- Diagramas de composición de Mg/Cl, Na/Cl, Ca/Cl y K/Cl, con coeficientes de correlación (r), datos de la cuenca hidrográfica del Tolimán

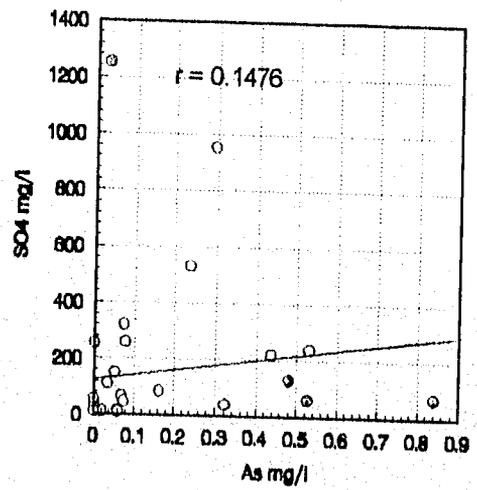
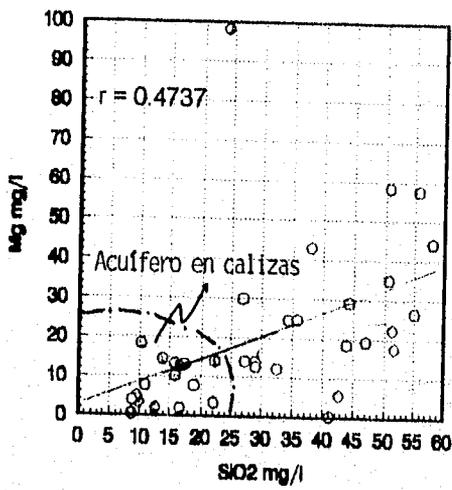
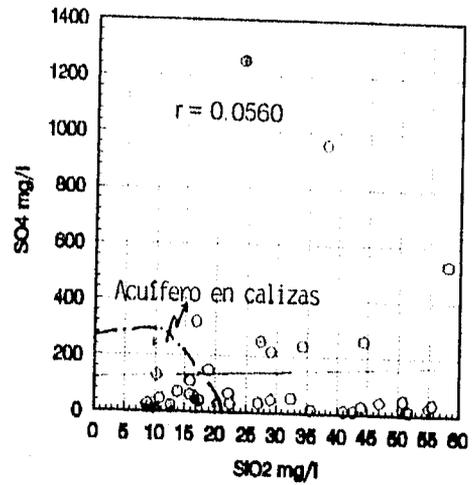
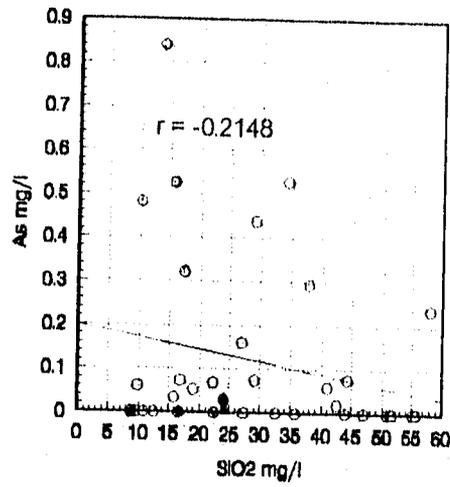


Figura 4.20.- Diagramas de composición de As/SiO₂, SO₄/SiO₂, Mg/SiO₂ y SO₄/As, con coeficientes de correlación (r), datos de la cuenca hidrográfica del Tolimán

Minerales con Arsénico	
Minerales Supergénicos	Adamita
	Mimetita
	Escoridita
	Olivinita
Minerales Hipogénicos	Arsénopirita
	Rejalgar
	Oropimente
	Lolingita
	Tenantita

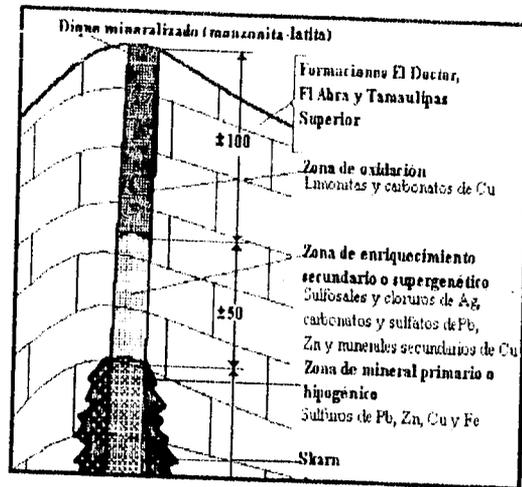


Tabla 4.1.- Minerales con As en Zimapán

Figura 4.21.- Fuentes naturales de As en Zimapán

La concentración de Arsénico según Boyle y Jonasson (1973), Tourtelot (1964), Gulbrandsen (1966) y Onishi (1978), en algunas rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias es como se muestra en la tabla 4.2.

Tipo de roca		Arsénico en mg/kg	Rocas presentes en Zimapán
Rocas Ígneas			
Ultrabásicas	Peridotita	0.3-15.8	
	Dunita	0.3-15.8	
	Serpentinita	0.3-15.8	
Básicas	(Extrusiva) Basalto	0.18-113	Rocas Volcánicas (1ª Unidad V.)
	(intrusiva) Gabro	0.06-28	
Intermedias	(Extrusiva) Latita	0.5-5.8	Diques
	(Extrusiva) Andesita	0.5-5.8	Rocas Volcánicas (1ª Unidad V.)
	(Extrusiva) Traquita	0.5-5.8	Diques
	(Intrusiva) Diorita	0.09-13.4	Diques
	(Intrusiva) Granodiorita	0.09-13.4	Intrusivos
	(Intrusiva) Sienita	0.09-13.4	Intrusivos
Rocas Metamórficas			
Metamorfismo Regional	Cuarcitas	2.2-7.6	
	Pizarras/Filitas	0.5-143	
	Esquistos/Gneiss	0-18.5	
Rocas Sedimentarias			
Marinas	Lutitas/Arcillitas (nershore)	4.0-25	Tamaulipas Superior y Trancas
	Lutitas/Arcillitas (offshore)	3.0-490	Soyatal y Trancas
	Carbonatos	0.1-204	Tamaulipas Superior, Abra y Trancas
	Fosforitas	0.4-188	
	Areniscas	0.6-9	Conglomerado Zimapán
No marinas	Lutitas	3.0-12	
	Arcillitas	3.0-10	Tarango

Tabla 4.2.- Relación de tipos de rocas y contenido de Arsénico reportado en la literatura. Modificado de Welch *et. al.* (1987)

Como se puede ver en la tabla anterior dentro de las rocas ígneas, las rocas básicas (basaltos y gabros) alcanzan los mayores rangos 0.18-113 mg/kg. Debido a que las rocas metamórficas dependen de la composición del protolito, el contenido de Arsénico es variable. Las rocas sedimentarias generalmente tienen valores relativamente altos con respecto a las rocas ígneas y metamórficas.

Tourtelot (*op. cit.*) propone que los valores altos en lutitas y arcillas no marinas se deben a que el Arsénico en lutitas y arcillas no marinas ha sido adsorbido por este tipo de materiales.

4.7.2. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DEL ARSÉNICO

El Arsénico puede existir en estados de oxidación en ambientes naturales con valencias +5, +3, +1, -3 y raramente se encuentra en forma elemental (neutral), (Welch *et al.*, *op. cit.*). De mayor a menor toxicidad del Arsénico se tiene el siguiente orden arsénico (-3), componentes organo-arseno, arsenitos (+3) y óxidos(+3), arsenatos (+5), arsenometales (+1) y Arsénico nativo (0), (Welch *et al.*, *op.cit.*)

Respecto a la movilidad del Arsénico se pueden mencionar algunas características:

La rápida oxidación de minerales que contienen Arsénico se facilita cuando el material geológico es llevado de un ambiente reductor a un ambiente oxidante. El Arsénico soluble se incrementa al disminuir el Eh y ph según las investigaciones de Maeda y Teshirogi, (1957) en Nriagu (1994).

El As (III) es mucho más tóxico, soluble y móvil que el As (V), de acuerdo a varios investigadores, Nriagu(*op. cit.*), Fergguson y Gavis (1972) y Webb (1976) entre otros. Bajo condiciones oxidantes el H_3AsO_3 en suelos se puede convertir a H_3AsO_4 , Nriagu (*op. cit.*).

Los óxidos de Manganese son muy activos en ambientes naturales y son oxidantes muy efectivos con respecto a As (III), (Oscarson *et al.*, 1981). La oxidación de As (III) depende de la cantidad de oxidante en el suelo, si se agrega Fe(III), se incrementa la oxidación con respecto a As (III), sin embargo la reacción redox entre As(III) y Fe(III) es relativamente lenta según las investigaciones de Oscarson *et al.* (*op. cit.*).

El Arsénico es fuertemente adsorbido por suelos arcillosos (principalmente por Caolinita y Montmorillonita) y se incrementa con el pH en un máximo de 5, también la adsorción de As(III) se incrementa con el aumento de Fe_2O_3 , en suelos, Frost y Griffin (1977).

4.7.3. MODELO HIDRODINÁMICO DEL ARSÉNICO

Una vez establecido el modelo conceptual de los acuíferos de Zimapán podemos establecer un modelo similar para el Arsénico presente en flujo subterráneo. Como ya se mencionó anteriormente después de la detección del Arsénico en el agua subterránea con valores

superiores a los de la norma para agua potable, tanto la C.N.A. (*op. cit.*) como el instituto de Geofísica, Armienta *et al.* (*op. cit.*) han realizado muestreos en diferentes períodos, siendo los pozos del Muhi, Zimapán I, Zimapán II, Pozo Viejo y la noria Tierra Colorada de los aprovechamientos más muestreados (Anexo B).

Analizando las concentraciones de Arsénico en los diferentes periodos de muestreo, se puede establecer que la concentración de estos aprovechamientos varía temporalmente y que dichas variaciones pueden estar asociadas a cambios estacionales, como se ve en la gráfica que representa los periodos de precipitación y concentración de Arsénico del pozo El Muhi, cuando la precipitación es alta, la concentración es baja y cuando la precipitación es baja la concentración es alta (figs. 4.22 y 4.23)

Para la construcción de dicha gráfica se proyectaron todos los datos analíticos de 4 años a un solo año y posteriormente se graficaron los muestreos realizados durante los cuatro años, lo anterior se realizó haciendo la suposición de que el comportamiento de los altos y bajos en la concentración del Arsénico durante el año es cíclico y que además la precipitación por las condiciones del área es relativamente estable en la media mensual (Anexo C).

Según Rose *et al.* (1991) cuando se presentan anomalías hidrogeoquímicas que varían temporalmente, se pueden producir dos etapas, los cuales están muy asociados a cambios estacionales:

1. En una primera etapa se pueden producir un proceso de oxidación de cuerpos mineralizados en intrusivos, diques y sills, posterior a los periodos de lluvias.
2. La segunda etapa corresponde a un flujo rápido de agua subterránea poco después del periodo de lluvias que transporta los minerales solubles acumulados en tiempos de secas, en las zonas oxidadas.

En el área de estudio se presentan condiciones similares a las descritas por Rose *et al.* (*op. cit.*) para su hipótesis. Para visualizar mejor esto se construyeron secciones no referenciadas a un sitio en particular (figs. 4.24, 4.25 y 4.26).

1) La oxidación de una fuente mineral durante el periodo de secas puede producir una cantidad de material rápidamente solubilizable. En el área de estudio se dan las condiciones adecuadas para que ocurra dicho proceso en la zona de recarga (Sierra del Monte, Cerro del Morro, La Majada - La Ortiga y El Muhi); para el acuífero en rocas carbonatadas se han reportado en Simmons y Mapes *et al.* (*op. cit.*) y en el presente trabajo, una gran cantidad de diques (monzonita y latita) y cuerpos intrusivos (monzonita y cuarzo-monzonita) (fig. 3.1).

Cabe mencionar que en la zona de recarga, se localiza el Distrito Minero de Zimapán, el cual fue dividido por Simmons y Mapes (*op. cit.*) en cuatro zonas mineras (La Luz - La Cruz, San Pascual - Santa Gorgonia, El Carrizal y El Monte - San Francisco) en donde se han reportado zonas de oxidación en los cuerpos mineralizados (Simmons y Mapes, *op. cit.*, García y Querol, 1991 y Arteaga, *op. cit.*).

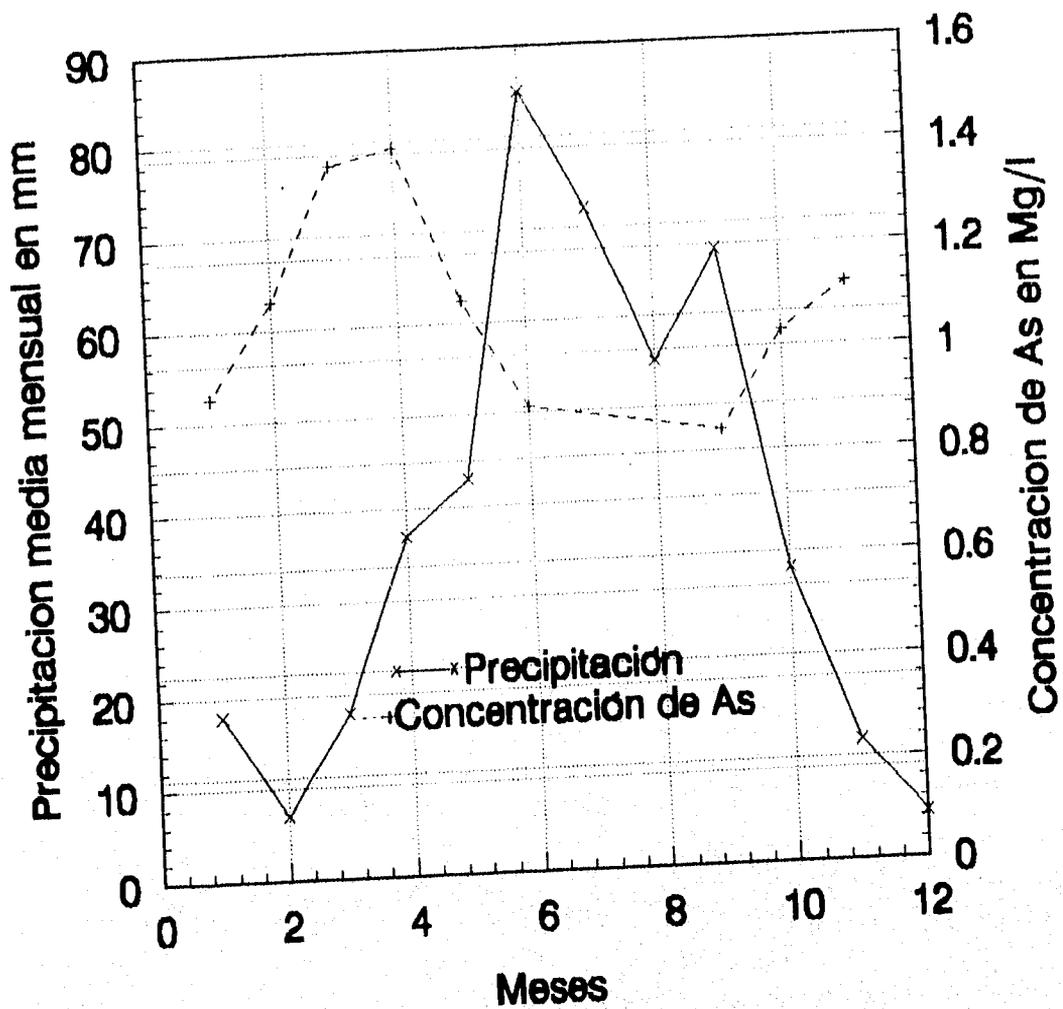


Figura 4.22.- Precipitación media mensual y concentraciones de Arsénico, a lo largo de un año hipotético en el Pozo El Muhi

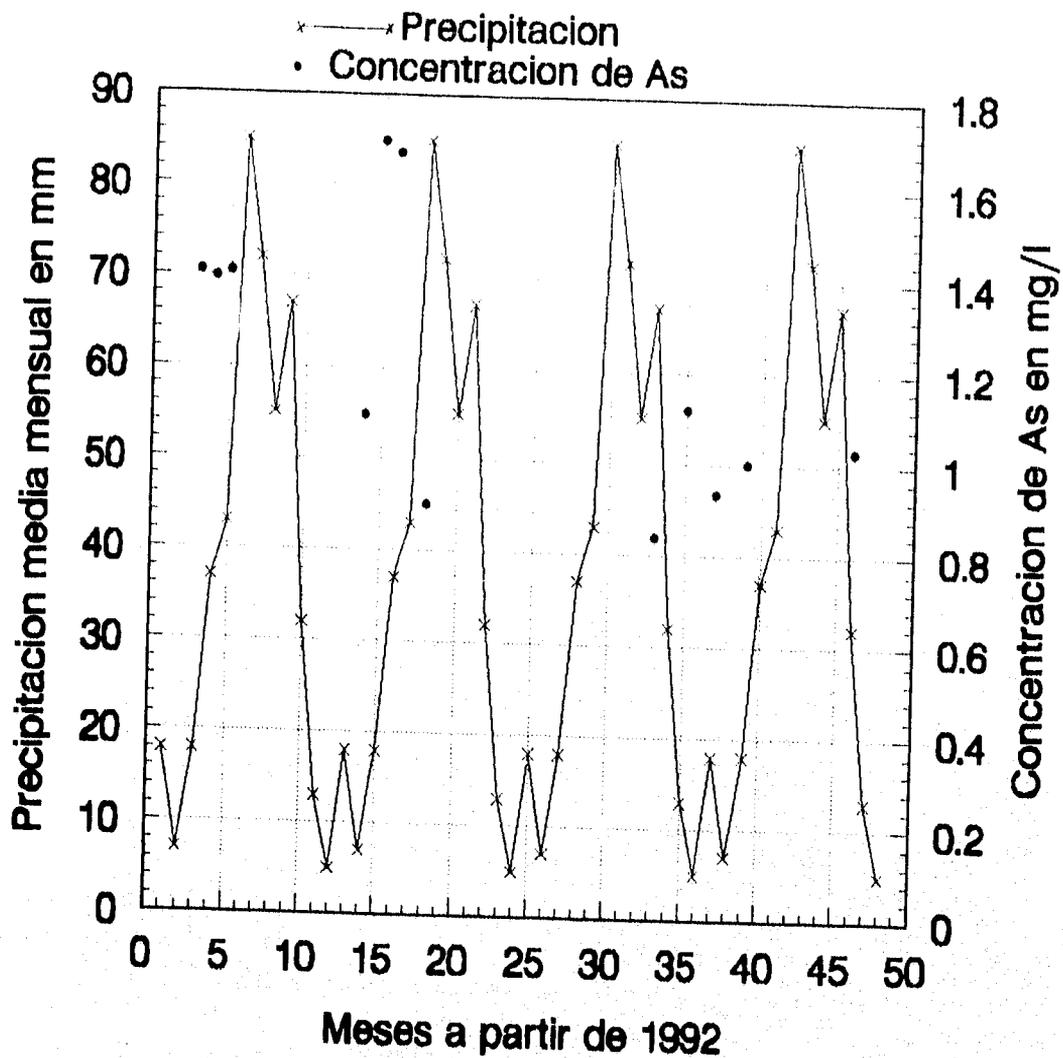


Figura 4.23.- Precipitación media mensual y concentraciones de Arsénico, en el período de 1992-1995 en el Pozo El Muhi

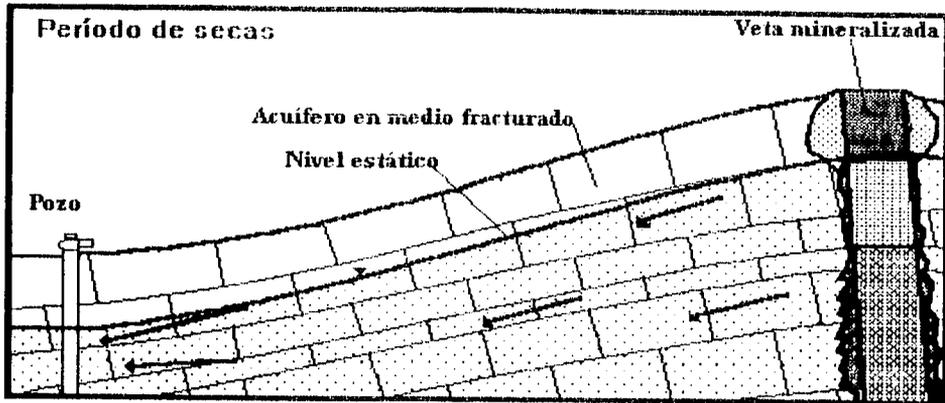


Figura 4.24.- Oxidación de cuerpos mineralizados durante el periodo de secas

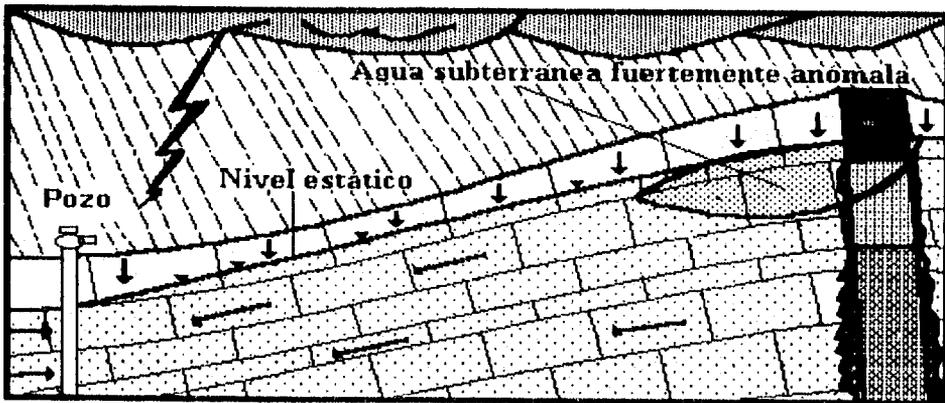


Figura 4.25.- Transporte de altas concentraciones de As, durante y después del periodo de lluvias

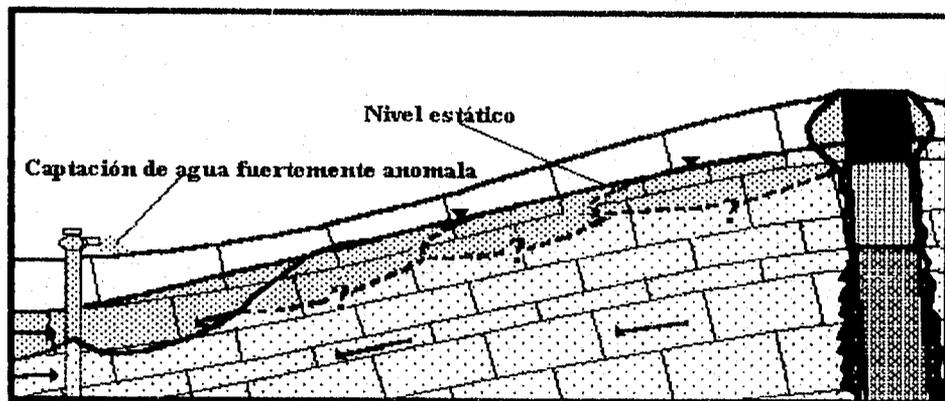
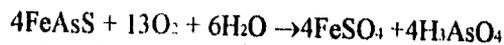


Figura 4.26.- Captación de aguas con altas concentraciones de As en pozos

Cerca de la superficie, el agua es relativamente diluida y oxidante, al incrementar la profundidad, o la distancia a lo largo del acuífero, el oxígeno se va consumiendo por reacción con la materia orgánica y el CO₂ viene a ser el mayor gas disuelto. El H₂S, CH₄ y otros hidrocarburos predominan también al incrementarse la profundidad, produciéndose condiciones reductoras.

El proceso de oxidación se inicia después de las lluvias e inmediatamente después del periodo de secas. Si se tiene la presencia de un cuerpo mineralizado cerca de la superficie, en donde a pesar de la relativa insolubilidad en agua pura de los sulfuros minerales, estos son vulnerables al ser atacados por ambientes húmedos (zona vadosa) ricos en oxígeno. El contenido de oxígeno libre en el agua afecta la rapidez de oxidación. Aunque también la razón de descomposición de sulfuros puede ser acelerada si hay la presencia de Pirita, Marcasita y Arsenopirita, debido a que estos minerales al oxidarse liberan soluciones extremadamente corrosivas de ácido sulfúrico, lo cual incrementa la solubilidad de los minerales y causa un rápido ataque sobre otros minerales primarios. Para el caso de la Arsenopirita el proceso de oxidación es:



Bajo estas condiciones de acidez, el As en esta forma es altamente móvil (Mok *et al.*, 1988).

2) En la zona de oxidación el material es acarreado rápidamente por el agua subterránea durante las lluvias y puede emerger a la superficie en un tiempo dado, dependiendo de la geohidrología del área y de la localización de las fuentes minerales con respecto a los puntos de descarga o de explotación (pozos, norias y manantiales) (figs. 4.25 y 4.26).

La rápida descarga de metales dentro del flujo subterráneo es inhibido por rocas calcáreas que neutralizan los ácidos después de que estos pudieron atacar las fuentes minerales o causar la precipitación de minerales secundarios en la zona de enriquecimiento secundario.

Cabe mencionar que el fracturamiento facilita la liberación de metales solubles debido al incremento de superficies reactivas entre la fuente y las soluciones oxidantes, este tipo de condiciones se da en el área de estudio, en donde el flujo de agua subterránea en las áreas de cuerpos mineralizados, diques monzoníticos y brechas de falla rellenas de material hidrotermal, se encuentra en rocas carbonatadas fracturadas.

Otro factor que se puede tomar en cuenta son las condiciones topográficas de relieve del área de rocas carbonatadas ya que es propicio para un flujo rápido debido al relieve abrupto lo cual produce una velocidad de alta erosión.

Si el proceso de dilución predomina, disminuye el contenido del metal en la corriente del agua, esto se observa poco después de la lluvia. La razón del contenido de metal y STD ó conductividad se mantiene durante la disolución.

Si el proceso de flujo rápido predomina se tiene un periodo de alto contenido de metal en el flujo del agua subterránea. La dilución puede ser evidente antes y después del periodo de flujo rápido, la razón del metal y el STD se incrementa durante el periodo de flujo rápido, para el área de Zimapán predomina este proceso, como puede observarse en la grafica de concentración de Arsénico y precipitación (figs. 4.22 y 4.23).

V.- PARAMETRIZACION HIDROGEOLOGICA

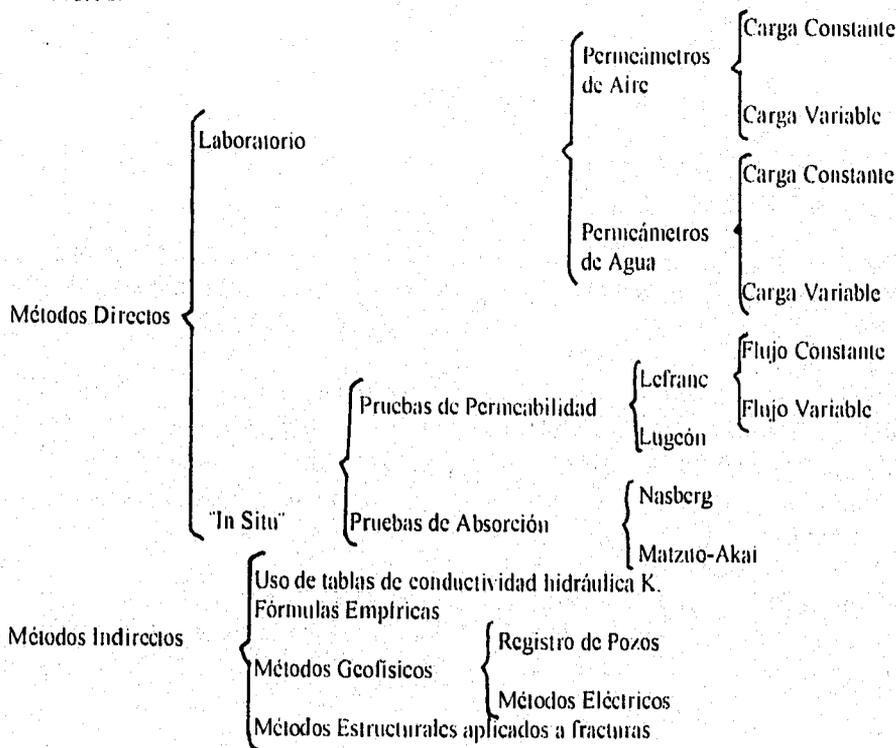
Para la estimación de parámetros hidrogeológicos en pruebas de bombeo se requiere de por lo menos un pozo de observación cercano al pozo de prueba, y conocer algunas características como profundidad del pozo, espesor del acuífero, tipo de ademe, profundidad del ademe.

En la realidad estas condiciones son difíciles de cumplir, ya que generalmente se tiene un pozo aislado o el más cercano a él está a cientos de metros, a diferentes profundidades o generalmente no se conoce las características del pozo.

Dada la heterogeneidad del medio debido a la presencia de diferentes unidades geohidrológicas, complejidad de la geología estructural, distribución de pozos y norias a diferentes profundidades y en diferentes unidades, es necesario buscar métodos alternativos para la estimación de parámetros hidrogeológicos.

A continuación se hará una revisión de las características de los diferentes métodos alternativos a las pruebas de bombeo para la obtención de parámetros hidrogeológicos, así como la revisión las características geohidrológicas de las diferentes unidades del área de Zimapán con el fin de establecer que método podría ser el más apropiado de aplicar en las diferentes unidades del área de interés.

Los parámetros hidrogeológicos se pueden obtener mediante métodos directos o indirectos.



5.1.- MÉTODOS DIRECTOS

5.1.1.- MÉTODOS DIRECTOS EN LABORATORIO

Los métodos directos pueden ser llevados a cabo en el laboratorio o en campo ("in situ"). En el laboratorio se utilizan permeámetros de aire o de agua, y estos pueden ser de carga constante o carga variable, el uso de uno u otro depende del material del que se trate.

-Permeámetros de Aire.- Estas pruebas utilizan como fluido el aire, pueden ser de carga constante o carga variable:

Permeámetros de carga constante.- Para llevar a cabo esta prueba se requiere de una muestra que tenga forma de cubo de 2 cm de arista o tener una forma cilíndrica de 2-4 cm de diámetro.

- Se inyecta aire comprimido de presión P_1 conocida a través de un tubo conectado al porta muestras, mediante un juego de orificios calibrados se puede obtener el caudal de aire que pasa a través de la muestra, midiéndose la presión P_2 una vez que el aire ha atravesado el espécimen. La "conductividad hidráulica" se obtiene mediante la siguiente relación (en Castany G., 1975).

$$Ka = 2 * \mu * L * \frac{P_2}{A * (P_1^2 - P_2^2)}$$

5.1.1a

P es la presión en dinas/cm²
 μ es la viscosidad del aire en poises;
 L longitud de la muestra en cm;
 A la sección de la muestra en cm²

Si $P_1 = P_2$ es decir P es constante la ecuación anterior se reduce a:

$$Ka = Cte * L * \frac{Q}{A}$$

Q es el caudal de aire.

5.1.1b

- Permeámetro de carga variable.- Este tipo de prueba utiliza muestras cilíndricas, para aislarla se coloca un tapón de goma y es ajustado a su vez por una campana.

La parte superior de la muestra está sometida a la presión atmosférica, en tanto que la cara inferior es conectada con una pera de aspiración que es adaptable con un tornillo. Con la pera de aspiración se hace subir el nivel de agua de un tubo conectado a un cubo con agua. Al apretar el tornillo se crea una depresión provocando circulación de aire a través de la muestra.

Sobre cada una de las partes del tubo de cristal se marcan dos niveles de referencia. Se mide con un cronómetro el tiempo necesario para que el menisco pase, de la marca superior a la marca inferior.

La conductividad hidráulica se obtiene mediante la ecuación (en Castany G., *op. cit.*):

$$K = \frac{B * L * \mu}{A * t} \quad 5.1.1c$$

- Una variante del permeámetro de aire es utilizar una válvula al vacío, la cual se conecta a un tubo que une a la muestra aislada y a un depósito de mercurio. Se coloca y se sella la muestra, se abre la válvula de vacío, elevándose el mercurio, posteriormente, se cierra la válvula conectada al vacío. Se destapa el recipiente porta muestra, penetra el aire a través de ella, se produce una disminución en el nivel de mercurio. La velocidad de descenso determina la conductividad al aire. Este mecanismo es similar al de un permeámetro de carga variable (en Diaz M., 1986.).

$$dv = K * A * h * \frac{dt}{L} * 13.6 \quad 5.1.1d$$

dv volumen de aire que pase a través de la muestra en un tiempo dado

como $dv = a * dh$ a área transversal del tubo.

sustituyendo dv en la ecuación inicial se tiene

$$dv = a * dh = 13.6 * K * A * h * \frac{dt}{L} \quad 5.1.1e$$

Integrando entre los límites h_1 a h_2 y t_0 a t_1 se tiene.

$$K_a = (a * L / A * t * 13.6) * \ln(h_1/h_2) \quad 5.1.1f$$

A área de la sección transversal de la muestra. 13.6 densidad del mercurio.

Permeámetros de agua.- Estos tipos de pruebas también pueden ser de carga constante y variable:

- **Permeámetro de carga constante.**- esta prueba se recomienda para materiales no consolidados de grano grueso. Antes de iniciar la prueba se aplica vacío a la muestra, para asegurarse que el grado de saturación, bajo flujo será cercano al 100%.

- Se coloca la muestra en un cilindro de perspex o acrílico de sección de corte A, la muestra descansa sobre un filtro grueso o malla de alambre. La prueba consiste en hacer pasar a través de una longitud dada L, un cierto volumen de agua Q durante un tiempo dado t.
- Conociendo la altura de la carga constante de agua h y el área A de la muestra. La conductividad hidráulica está dada por la ley de Darcy (Castany G., *op. cit.*)

$$K = \frac{Q * L}{A * t * h} \quad 5.1.1g$$

- **Permeámetro de carga variable.**- Se aplica principalmente en materiales no consolidados de grano fino. Como cilindro de prueba se puede utilizar el mismo tubo de obtención de la muestra.

La muestra tiene una longitud L con una sección de corte A , a cada extremo del tubo se coloca un filtro grueso, la parte inferior se conecta a una columna reguladora de área interna a . El agua fluye hacia el depósito de nivel constante, la columna reguladora llena de agua, se mide el tiempo (t_1) que necesita el nivel de agua para caer de h_0 a h_1 . Para cualquier tiempo t , el nivel de agua en la columna reguladora está dada por h y su velocidad es dh/dt . Para un tiempo t , la diferencia en carga total desde el tope al fondo de la muestra es h . Aplicando la Ley de Darcy se tiene (Craig R., 1976):

$$-a \frac{dh}{dt} = A * K * \frac{h}{L} \quad 5.1.1h$$

$$-a \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \frac{AK}{L} \int_{t_0}^{t_1} dt \quad 5.1.1i$$

$$K = \left(\frac{a * L}{A * t_1} \right) * \text{Ln} \left(\frac{h_0}{h_1} \right) = 2.3 * \left(\frac{a * L}{A * t_1} \right) * \log \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad 5.1.1j$$

5.1.2.- MÉTODOS DIRECTOS " IN SITU "

Métodos de permeabilidad.- Dentro de estas pruebas se encuentran las Pruebas de permeabilidad Lefranc y Lugeón, la primera puede ser de flujo constante o flujo variable:

-**Pruebas Lefranc.**- Este método se aplica principalmente en materiales no consolidados; esta prueba puede ser de flujo constante o de flujo variable. En esta prueba se mide la conductividad hidráulica en algún terreno aluvial o de rocas fracturadas, cuando se tiene un nivel freático que satura el medio.

- La prueba consiste en inyectar agua en una perforación de diámetro conocido NQ, situado debajo del nivel freático, con una carga pequeña rigurosamente constante de agua. La medida del gasto y de la carga que lo origina permite calcular el coeficiente de conductividad hidráulica en la vecindad de la perforación con una buena aproximación.
- Se lleva la perforación hasta la profundidad deseada, avanzando en tramos de 3 m;
- Se mide el nivel freático;
- Se introduce poliducto dentro de la perforación, para aislar los electrodos de la sonda eléctrica;

- Se inicia la inyección de agua en la perforación, calibrando la válvula de paso hasta que el nivel se estabilice, con una carga que no sea mayor de 10 m, si no hay nivel freático a partir del centro de la cámara filtrante, o a partir del nivel freático cuando se tiene.
- Se lleva el conteo de tiempo de la prueba, (por lo general dura de 5 a 10 min), simultáneamente se realizan mediciones del nivel dinámico hasta estabilizarlo. Al terminar la prueba se anota el volumen inyectado
- Se realiza un mínimo de 5 observaciones, en la que el caudal de agua inyectada irá disminuyendo y los niveles estables irán bajando. Se toma el volumen inyectado y el tiempo en cada operación.

Para flujo constante se utiliza la ecuación (C.F.E., 1990).

$$K = C \frac{Q}{H} \quad \text{m/s} \quad 5.1.2a$$

Q Gasto en m³/s
 H Carga hidráulica en m
 C Coeficiente que depende de la fórmula de la cámara filtrante.

Si se considera la cavidad como una elipsoide de revolución con eje corto igual a D y una distancia focal igual a L (C.F.E., op. cit.).

$$C = \frac{\log\left(\frac{L}{D} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 + 1}\right)}{4 * r * \left(\frac{L}{D}\right)} \quad 5.1.2b$$

D Diámetro de perforación en m
 L Longitud del tramo de prueba en m.

Para flujo variable se considera el ascenso y descenso de la superficie del agua dentro de la perforación, en donde se obtiene las profundidades A y h₂ con que varía el nivel de agua cada tiempo de observación Δt.

La conductividad hidráulica se obtiene mediante la ecuación (C.F.E., op. cit.).

$$K = 2.3 * C * A \frac{\log \frac{H_1}{H_2}}{T_2 - T_1} \quad 5.1.2c$$

Equipo necesario

- Dos bombas de 37 G.P.M.

- Tubería y mangueras necesarias para llevar agua al barreno de prueba
- Medidor de agua
- Un cronómetro
- Una válvula de paso
- Una sonda eléctrica
- Un recipiente de volumen conocido
- Poliducto de 1" para aislar sonda

Pruebas Lugeon.- Este método es utilizado en rocas compactas, consiste en inyectar agua a presión en el terreno de interés (fig. 5.1).

- Se reviste un tramo de sondeo (generalmente 5 m), se fija el obturador y se inyecta agua a presión en el tramo elegido. Un manómetro y un contador de agua permiten medir presiones y los caudales.
- Con una presión constante se mide el caudal inyectado durante un intervalo de tiempo, posteriormente se incrementa la presión y se repite la operación. La presión utilizada depende del grado de fracturamiento de la roca, sin embargo esta presión no debe sobrepasar los 10 bars, para evitar un fracturamiento adicional.
- En pruebas de campo se deben obtener datos como lecturas inicial y final del medidor de agua, la presión manométrica en cada prueba, el tiempo en que se lleva a cabo la prueba, profundidad del nivel freático, además se calcula el volumen absorbido.

En estas pruebas se utilizan Unidades Lugeon que corresponde al gasto de 1 lt/min en 1 m de longitud de tramo de prueba bajo una presión de 10 kg/cm².

La conductividad hidráulica K se obtiene mediante la ecuación (C.F.E., op. cit.).

$$K = \frac{2.3 * Q * \frac{r^2}{r^1}}{2 * b * H} \quad 5.1.2d$$

r^2 Longitud del tramo
 r^1 Radio de perforación
 b Equivalente a 1m. de acuerdo a las U. Lugeon

Equipo necesario

- Un tanque para almacenar suficiente agua para llevar a cabo la prueba
- Una bomba de inyección centrífuga de alta presión
- Un segundo tanque regulador de presiones
- Válvulas de paso, mangueras de presión y líneas de alimentación

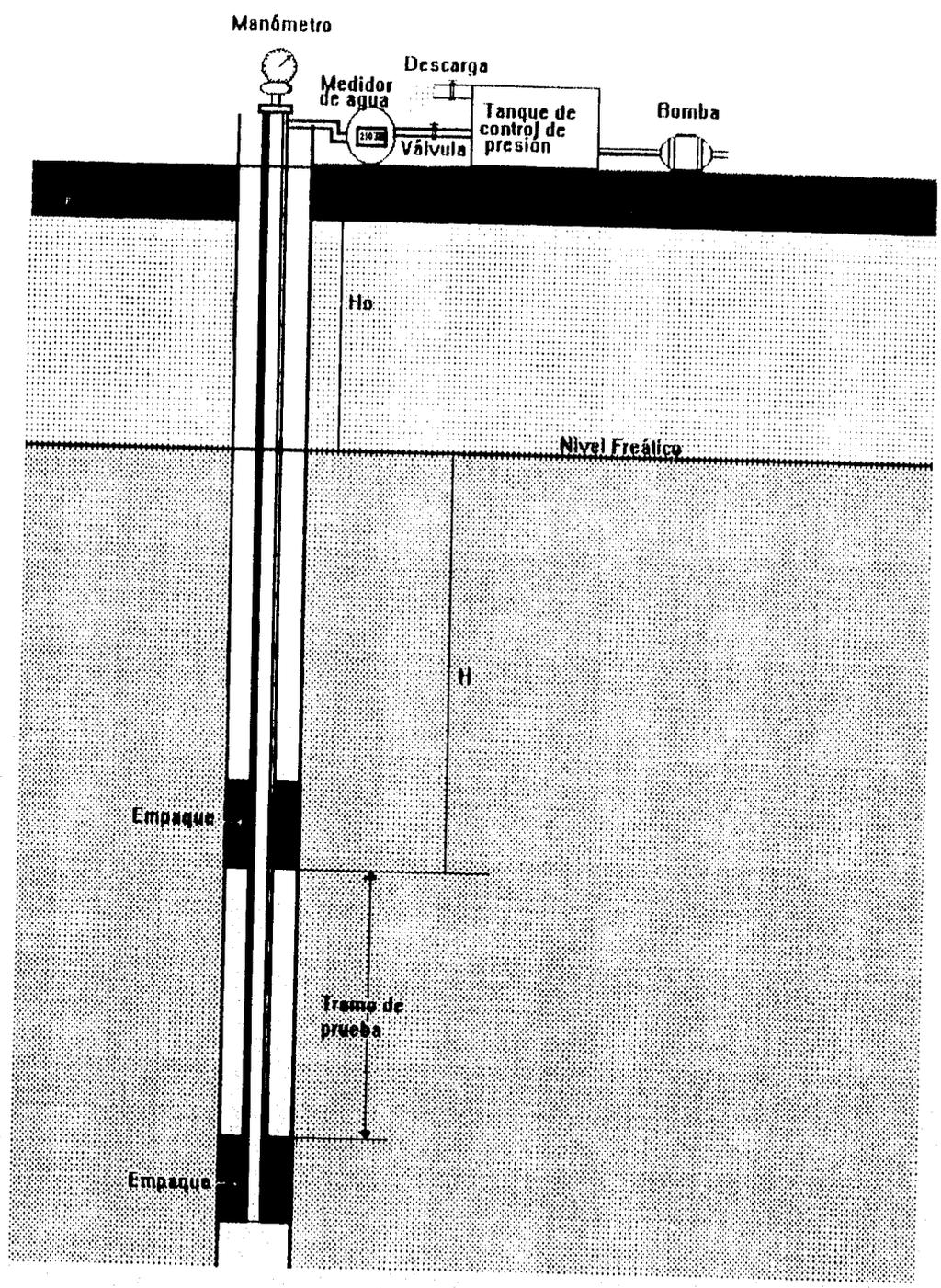


Figura 5.1.- Pruebas Lugeón

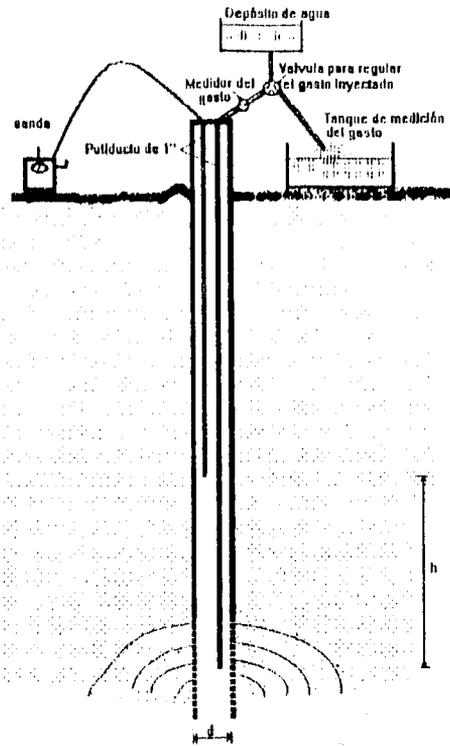


Figura 5.2.- Prueba de Absorción Nasberg

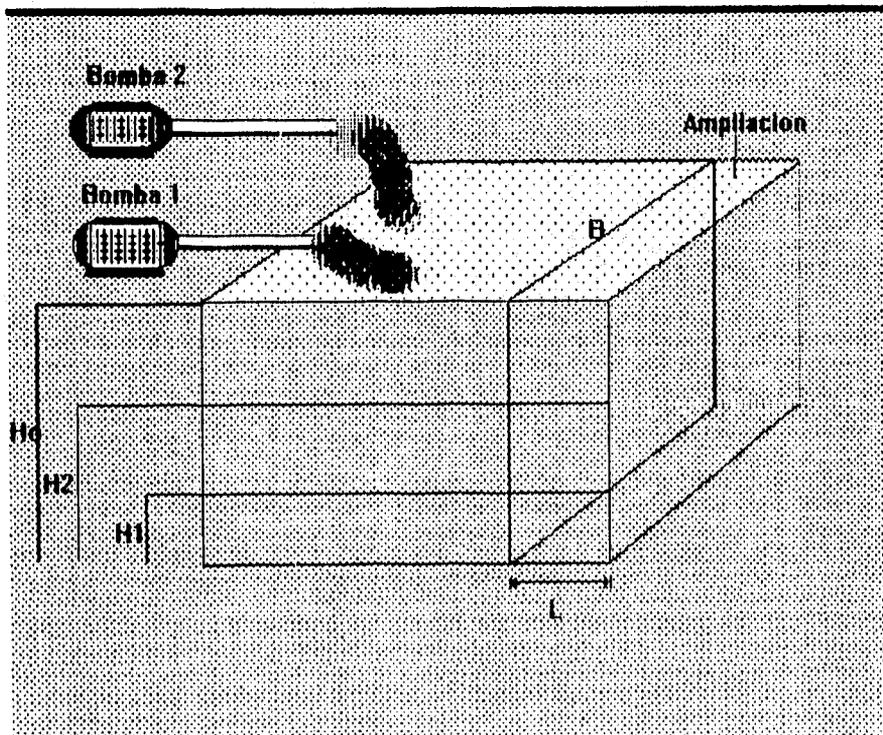


Figura 5.3.- Prueba de Absorción Matuzo-Akai

- Medidor de agua (de preferencia de con registro vertical doble para regresar a 0, graduado en litros).
- Un manómetro (instalado en la entrada de la perforación inmediatamente después del extremo superior de la tubería, graduado en kg/cm² de 14 kg).
- Tubería galvanizada (del mismo diámetro en toda la alimentación).
- Un Permeámetro
- Empaques
- Un cronometro

Métodos de Absorción.- Dentro de estas pruebas se puede mencionar las pruebas de Absorción Nasberg y pruebas de Absorción Matzuo-Akai, la primera se aplica de preferencia en medios no saturados y la segunda en medios saturados.

Método de Absorción Nasberg.- Como ya se menciona esta prueba se realiza por encima del nivel freático y sin carga hidrostática (fig. 5.2).

La prueba consiste en perforar un barreno de diámetro d conocido (NQ) en tramos de prueba de 3 m, que corresponde también al tirante de agua constante h , se obtiene una relación de gasto de absorción Q .

La conductividad hidráulica se calcula con la ecuación (en C.F.E., op. cit)

$$K = \frac{0.423}{h^2} * Q * \log \frac{4 * h}{d} \quad 5.1.2e$$

Donde d debe cumplir con las siguientes condiciones $25 < h/d < 100$.

Equipo necesario

- Una Sonda eléctrica
- Un Tubo galvanizado de 1" o poliducto de 1"
- Un Cronometro
- Un medidor de agua
- Válvula de paso

Método de Absorción Matzuo-Akai.- Esta prueba se lleva acabo en medios saturados y consiste en bombear el agua hasta una altura H_0 , en donde mediante válvulas de paso se estabiliza el nivel del agua durante 10 min, de esta manera se obtiene un volumen V_0 y un gasto en m³/s (fig. 5.3).

Se amplía el pozo una longitud L de 1 m, inyectando agua hasta la misma altura H_0 , de aquí se obtiene el volumen Q_1 .

La conductividad hidráulica se obtiene mediante las ecuaciones (en C.F.E., op. cit.):

$$B = \frac{\Delta Q}{K} + 2 * H \quad 5.1.2f$$

Para el caso de que la capa impermeable este muy profunda (en C.F.E., *op. cit.*):

$$K = \frac{\Delta Q}{B + 2*H} * \frac{1}{2L} \quad 5.1.2g$$

$\Delta Q = Q_1 - Q_0$ en m³/s

B Ancho del pozo en m.

H Altura del nivel estable en m

L Ampliación en m.

Cuando se tiene una capa impermeable cerca del fondo del pozo se emplea la ecuación (en C.F.E., *op. cit.*):

$$K = \frac{\Delta Q}{B - 2H} * \frac{1}{2* L} \quad 5.1.2h$$

Equipo Necesario

- Dos bombas de 37 G.P.M.
- Tubería Galvanizada de 2"
- Dos medidores de agua de 1"
- Un cronometro
- Dos válvulas de paso

5.2.- MÉTODOS INDIRECTOS

5.2.1- Uso de tablas de conductividad hidráulica.- Existen tablas de conductividad hidráulica para diferentes materiales, sin embargo estas sólo dan una idea de K, debido a que en muchas de estas se tiene un intervalo de valores muy alto, como se muestra en la siguiente tabla.

tabla 5.2.1 Conductividad hidráulica común de algunas rocas*

	Laboratorio	Campo
Arenisca	3×10^{-3} a 8×10^{-8}	1×10^{-3} a 3×10^{-8}
Arenisca (Grauvaca)	3.2×10^{-8}	
Lutita	1×10^{-9} a 5×10^{-13}	1×10^{-8} a 1×10^{-11}
Caliza-dolomia	1×10^{-5} a 1×10^{-13}	1×10^{-3} a 1×10^{-7}
Basalto	1×10^{-12}	1×10^{-2} a 1×10^{-7}
Granito	1×10^{-7} a 1×10^{-11}	1×10^{-4} a 1×10^{-9}
Esquisto	1×10^{-8}	2×10^{-7}
Esquisto fisurado	1×10^{-4} a 3×10^{-4}	

* K (cm/s) para rocas con agua a 20°C como fluido, los datos fueron tomados de Davis y De Wiest (1966) y Diaz Mora C. (1986).

5.2.2- Fórmulas empíricas.- Este método se puede aplicar principalmente a materiales granulares no consolidados, debido a que se basa en el análisis granulométrico y utiliza fórmulas empíricas.

$$K_{em} = 100 \cdot d_{10}^2 \quad \text{B Grenet (1963), en Castany G. (op. cit.)} \quad 5.2.2a$$

d_{10} es diámetro eficaz de los granos, en cm.

$$K = C d_{10}^2 \quad \text{Hazen (1911) en Domenico (1991)} \quad 5.2.2b$$

donde C varía de 100 a 150 cm/seg.
 $d_{10} \rightarrow$ 10% de finos y 90% de grueso.
 K es la conductividad hidráulica

$$K = (6.54 \times 10^{-4} - 4) d_{10}^2 \quad \text{Harleman et. al. (1963) en Domenico (op.cit.)} \quad 5.2.2c$$

$$K = 760 d^2 e^{-11\sigma} \quad \text{Krumbein y Monk (1943) en Domenico (op.cit.)} \quad 5.2.2d$$

d es la media geométrica del diámetro.
 σ es la desviación logarítmica estandar de la distribución de tamaños

5.2.3.- Métodos geofísicos.- Estos métodos comprenden tanto a Registro de Pozos como a los Métodos eléctricos y se puede aplicar tanto a materiales no consolidados como a medios fracturados.

-Registro de Pozos.- Entre los métodos más utilizados en este tipo de registros podemos mencionar el método de Kozeny-Carman y el de Timur. El primero relaciona la porosidad (ϕ), la conductividad hidráulica (K) y la superficie interna relacionada con el volumen de la matriz (S). Se aplica principalmente a materiales no consolidados. La conductividad hidráulica se obtiene mediante la relación (Timur, *op.cit.*):

$$k_1 = C \cdot \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad K = C \cdot \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \cdot \frac{1}{S_0^2} = \frac{\phi^3}{S^2} \quad 5.2.3a$$

- K Conductividad hidráulica
- ϕ Porosidad
- C Constante de Kozeny
- S_0 Superficie de la matriz específica (superficie interna relacionada al volumen de la matriz).
- S Superficie del bloque específico (superficie interna relacionada al volumen total).

con $S_0 = \frac{S}{(1-\phi)}$ se tiene la relación:

$$K = C \cdot \phi^3 \cdot K_{mat}^b \quad 5.2.3b$$

Cabe mencionar que C no es universal y se obtiene separadamente para cada material o rango de materiales; por otro lado la superficie interna no es una cantidad fácilmente obtenible.

Dado que la conductividad es el inverso de la resistividad ($1/R_{mat}$), entonces la relación entre S^a y R_{mat} es $S^a \rightarrow \frac{1}{R_{mat}}$ por lo que la relación de Kozeny-Carman se

reduce a (Timur, *op.cit.*)

$$K = C * \phi^3 * R_{mat}^{-b} \quad 5.2.3c$$

donde C y b se obtienen para cada material, el rango de b es $1 \leq b \leq 2$

La dificultad de este método consiste de en la dificultad de obtener C en distancias cortas, cuando se tienen cambios rápidos en una secuencia vertical de capas durante la perforación; además de que el cálculo de R_{mat} requiere de valores exactos del Factor de Formación (F), Factor de Formación aparente (F_a) y Resistividad del agua de poro (R_w), los cuales no son disponible en muchos de los casos, sin embargo este método es muy practico en algunos casos

Otro método que da buenos resultados es cuantificar la conductividad hidráulica a partir de las análisis de núcleos como lo propone Timur (*op. cit.*) para rocas granulares.

$$K = \frac{0.13 \phi^{1.4}}{S w_i^2} \quad 5.2.3d$$

$S w_i$ Saturación del agua irreductible

ϕ Porosidad

Ecuación de Archie

$$S w_i = \left(\frac{F * R_w}{R_t} \right)^{1/n} \quad 5.2.3e$$

R_t Resistividad verdadera de la roca

Un tercer método relaciona las ecuaciones de Kozeny-Seever -Timur; este parte de la ecuación de Seever y Timur (*op. cit.*):

$$k = \frac{\phi^3}{T * S^2 * (1 - \phi)^2} \quad 5.2.3f$$

T Textura o tortuosidad

S Superficie del área específica o Superficie de poro / volumen de la roca

V_s fracción de volumen de agua de poro (con una distancia h) al agua de poro, esta dada por la relación:

$$V_s = S * (1 - \phi) * h \quad 5.2.3g$$

Donde la interfase de volumen fraccional se supone que debe ser mucho menor que la unidad, es decir $V_s = \phi$, por lo que la ecuación de Seever y Timur puede ser reescrita como:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_H} = \frac{S * (1 - \phi) * h * T * S}{\phi} \quad \text{o} \quad \frac{\phi}{(1 - \phi) * S} = h * T * S * \frac{T_1 * T_H}{T_H - T_1} \quad 5.2.3h$$

Elevando esta expresión al cuadrado y sustituyendo en la ecuación de Kozeny se tiene:

$$K = \frac{h \cdot V s^2}{T} \cdot \phi \cdot \frac{(T_1 \cdot T_2)^2}{(T_1 - T_2)} \quad \text{en donde } K \text{ esta en función de } \phi \text{ y } T_1^2 \quad 5.2.3j$$

Finalmente se presenta el método de aproximaciones de Kosinski (1987, en Romero, D., 1990) el cual esta basado en las relaciones de Trasmisibilidad (T) y la Resistencia (R_{tr}) transversal, debido a que tienen como factor común el espesor b , esto es (Kosinski. *op. cit.*).

$$T = K b \quad \text{y} \quad R_{tr} = \sigma b \quad 5.2.3j$$

Igualando términos y despejando T se tiene:

$$T = K \sigma R_{tr} \quad 5.2.3k$$

Donde T Transmisibilidad [m^2/s]
 K conductividad hidráulica [m/s]
 $\sigma = 1/\theta$ conductividad eléctrica [$1/\Omega \cdot m$]
 R_{tr} Resistencia transversal [$m/\Omega m$]

Dado que la ecuación que gobierna al flujo de agua subterránea y el flujo de corriente eléctrica en un medio poroso, son similares y suponiendo que el agua y la corriente eléctrica fluyen por el mismo camino (en un medio homogéneo, isótropo y totalmente saturado), se puede esperar que la conductividad hidráulica alta, debería de producir una simple relación lineal entre los dos parámetros. Sin embargo, esto no sucede, debido a esto, que la expresión anterior queda restringida a casos especiales.

Kosinski (*op. cit.*) desarrollo una relación empírica entre la resistencia transversal obtenida por mediciones de resistividad y los valores de transmisividad obtenidos en pruebas de bombeo.

La resistencia transversal se normaliza por el efecto de calidad del agua, donde el factor de normalización es $1/\theta_w$ (θ_w es la resistividad del agua)

En las relaciones obtenidas por Kosinski (*op. cit.*) se aprovecha el hecho que tanto las expresiones para T y R_{tr} incluyen b (ec. 5.2.3j), de donde se obtiene las relaciones:

$$\frac{T}{K} = \frac{R_{tr}}{\theta} \quad \Rightarrow \quad R_{tr} = \frac{T\theta}{K} \quad 5.2.3l$$

Si se considera el factor de corrección $1/\theta_w$ entonces queda:

$$R_{tr} = \frac{T}{K\theta_w} = C \cdot T \quad \text{con } C = \theta / K \theta_w \quad 5.2.3m$$

Al elaborar gráficas de T vs. R_{tr} en acuíferos los más homogéneos posibles y con b constante, se pueden establecer ecuaciones que relacionan ambos parámetros, Kosinski obtiene por ejemplo para una zona en particular:

$$R_{tr} = 0.66 \cdot T^{1.0376} \quad 5.2.3n$$

Por lo tanto, la relación entre la resistencia transversal como una función de la resistividad del acuífero y la transmisividad como una función de la conductividad hidráulica, se pueden encontrar del factor que afecta a la resistividad y a la conductividad eléctrica, que son idénticos, estos son:

- Tamaño del grano
- Arreglo de los granos (porosidad)
- Textura
- Contenido de arcillas

Según el sistema de que se trate pueden encontrarse relaciones del tipo:

$$K = f(\theta_w) \text{ ó } \log(K) = f(\log \theta) \quad 5.2.3o$$

ó lo que es lo mismo. $R_{tr} = f(T) \text{ y } \log R_{tr} = f(\log T) \quad 5.2.3p$

5.2.4.- Métodos estructurales aplicados al análisis de fracturas.- En medios fracturados las fracturas interconectadas se consideran como conductos principales para el flujo de fluidos en donde los bloques de roca pueden considerarse como impermeables. Si se considera el medio fracturado como un medio continuo se puede tomar como un medio equivalente al medio poroso. Para el caso en que no se tengan condiciones de continuidad, el flujo puede ser descrito como un flujo en una fractura individual, una serie o sistema de fracturas.

Cuando se tienen grandes aperturas el flujo turbulento predomina sobre el laminar y cuando esto sucede la ley de Darcy no es aplicable, motivo por el cual se debe tratar con métodos diferentes a los medios fracturados.

En estos casos una ecuación equivalente de la conductividad hidráulica puede ser calculada para una fractura o serie de fracturas planares con ecuaciones desarrolladas por Romm (1966) y Wittke (1984) en Chernyshev (1971), Snow (1968) en Domenico (*op.cit*).

$$K = \frac{\rho_w g N b^3}{12\mu} \quad \text{Modelo de Snow (1968)} \quad 5.2.4a$$

donde ρ_w es la densidad del agua
 g es aceleración de gravedad
 N es el número de fracturas/unidad de longitud
 b es la apertura de las fracturas
 μ es la viscosidad cinemática del agua
 Para el caso de la permeabilidad se tiene.

$$k = \frac{N b^3}{12} \quad \text{donde } N b \text{ es la porosidad} \quad 5.2.4b$$

El flujo a través de una fractura es proporcional al cubo de la apertura, para un flujo laminar entre dos placas paralelas con superficies suaves, Romm (*op. cit*) calculó la velocidad del flujo volumétrico como:

$$Q = \frac{\rho_w g b^2}{12\mu} (b * a) \frac{\partial h}{\partial l} \quad 5.2.4c$$

donde Q es la razón de flujo volumétrico
 a es la longitud de las fracturas
 $\frac{\partial h}{\partial l}$ es el gradiente de la dirección de flujo

De la ecuación anterior se deduce que $K = \frac{\rho_w g b^2}{12\mu}$ 5.2.4d

Algunos investigadores han modificado la Ley Cúbica al observar experimentalmente desviaciones en el comportamiento de la Ley Cúbica y sugieren que el flujo a través de una fractura depende de dos factores, apertura y tortuosidad, además de que la tortuosidad incrementa la longitud del flujo cuando el área de contacto se incrementa, por lo que en grandes superficies la rugosidad afecta la razón de flujo; en las ecuaciones anteriores solo se ha tomado en cuenta la apertura y se han supuesto paredes lisas.

Se sabe que en medios fracturados la conductividad hidráulica es muy sensible a los cambios de dirección y variación de las aberturas en las fracturas y debido a que las fracturas dependen de los esfuerzos, se puede decir que K también es función de los esfuerzos.

El Método de tensor de conductividades de Romm (*op.cit.*) y Chernyshev (*op. cit*) fue desarrollado para sistemas de fracturas continuas. Romm considera fracturas abiertas en tanto que Chernyshev toma el caso de fracturas rellenas. Como se ha observado los métodos anteriores, parten del supuesto de que K, es constante en el medio y su comportamiento corresponde al de un escalar.

Este método considera a K como un tensor, tratamiento que le han dado numerosos autores (Bear, 1972, Freeze y Cherry, 1979, Domenico y Schwartz, 1990, entre otros).

Con datos como la orientación, ancho, profundidad y densidad de fracturas tomadas en campo, se construye un tensor de conductividades, tomándose como constantes para cada serie los parámetros medidos.

Antes de exponer el método de tensor de conductividades es importante aclarar que en los trabajos de campo, se pueden obtener datos como dirección, ancho, longitud, densidad y profundidad de las fracturas, así como el echado de las mismas.

Debido a esto, los de echado y dirección (azimutal) de las fracturas se encuentran en coordenadas esféricas y es necesario realizar una transformación al sistema carteciano, X, Y, Z.

$$X = A \operatorname{sen}\alpha \operatorname{cos}\beta \quad 5.2.4e$$

$$Y = A \operatorname{sen}\alpha \operatorname{sen}\beta \quad 5.2.4f$$

$$Z = A \operatorname{cos}\beta \quad 5.2.4g$$

En donde α es el azimut y β corresponde al echado de la fractura

Se consideran a el vector A como unitario, como se muestra en la figura 5.4.

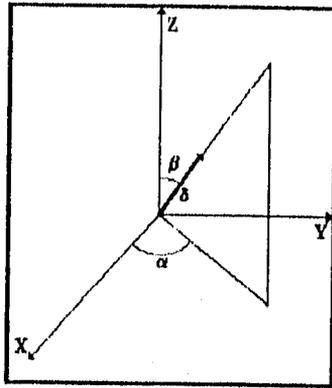


Figura 5.4.- Coordenadas esféricas

Cabe mencionar que Romm (*op.cit.*) utilizó un sistema de referencia en donde aparece el eje -Y hacia el este y X hacia el norte

La conductividad hidráulica se caracteriza por un tensor de conductividades simétrico de segundo rango. Para el caso de n fracturas abiertas se tiene,

$$k = \frac{1}{12} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} (1 - \alpha_{1i}^2) & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} \alpha_{1i} \alpha_{2i} & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} \alpha_{1i} \alpha_{3i} \\ -\sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} \alpha_{2i} \alpha_{1i} & \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} (1 - \alpha_{2i}^2) & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} \alpha_{2i} \alpha_{3i} \\ -\sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} \alpha_{3i} \alpha_{1i} & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} \alpha_{3i} \alpha_{2i} & \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i} (1 - \alpha_{3i}^2) \end{vmatrix} \quad 5.2.4h$$

Modelo de Romm (1966)

$$K = K_{fr} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} (1 - \alpha_{1i}^2) & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} \alpha_{1i} \alpha_{2i} & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} \alpha_{1i} \alpha_{3i} \\ -\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} \alpha_{2i} \alpha_{1i} & \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} (1 - \alpha_{2i}^2) & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} \alpha_{2i} \alpha_{3i} \\ -\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} \alpha_{3i} \alpha_{1i} & -\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} \alpha_{3i} \alpha_{2i} & \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} (1 - \alpha_{3i}^2) \end{vmatrix} \quad 5.2.4i$$

Chernyshev (1971)

- k permeabilidad en m^2
- K_{fr} Conductividad hidráulica de fracturas rellenas (m/s).
- n Es el número de fracturas en la masa de rocas.
- i Es el número iésimo de la serie de fracturas

- b Es el promedio del ancho de las series de fracturas. (m)
- a_i Es el espaciamento en las series de fracturas
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ Son direcciones cosenos del vector perpendicular en la iésima serie de fracturas en el sistema de coordenadas x, y, z .

Cuando algunas direcciones de fracturas coinciden con el gradiente de flujo, la conductividad de una masa rocosa fracturada puede ser calculada con la ecuación (Chernyshev, *op. cit.*),

$$K = \frac{g}{12v} \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i + b_i} \{1 - [\text{sen } \beta_i (\cos \alpha_i \cos \varphi + \text{sen } \alpha_i \cos \varphi) + \cos \beta_i \cos \gamma]\}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{b_i K_{fr}}{a_i + b_i} \{1 - (\text{sen } \beta_i (\cos \alpha_i \cos \varphi + \text{sen } \alpha_i \cos \varphi) + \cos \beta_i \cos \gamma)\}^2 \quad 5.2.4j$$

Esta ecuación se puede aplicar a fracturas abiertas y rellenas, en donde:

- α_i Es inclinación azimutal de la iésima serie de fractura.
- β_i Es el ángulo de inclinación de la serie de fractura.
- ρ, φ, γ Son los ángulos entre las direcciones para la cual el coeficiente de permeabilidad es asignado en los ejes coordenadas x, y y z .
- K_{fr} Conductividad hidráulica de fracturas rellenas (m/s).
- K Coeficiente de conductividad hidráulica de la masa de roca. m/s.
- g Constante de aceleración gravitacional m/s^2

Si suponemos que una masa rocosa consiste de cubos con bordes a , separados por medio de fracturas con ancho b y que las fracturas no están rellenas se tiene la siguiente ecuación (Chernyshev, *op. cit.*),

$$K = \frac{gb^3}{\sigma \mu} \quad 5.2.4k$$

Para el caso de que las fracturas estén rellenas el coeficiente de permeabilidad se calcula con la siguiente relación (Chernyshev, *op. cit.*),

$$K = \frac{2k_{fr} b}{a + b} \quad 5.2.4l$$

En general en estas ecuaciones se supone que la conductividad hidráulica en una fractura rellena es la misma en toda la serie de fracturas. Cuando esto no ocurre y cada fractura es caracterizada por un coeficiente de conductividad hidráulico en particular (K_{fr}), se utiliza la siguiente ecuación, para dirección vertical del flujo en zonas de recarga (Chernyshev, *op. cit.*)

$$K = \frac{g}{12v} \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i + b_i} \text{sen}^2 \beta_i + \sum_{i=1}^n \frac{(k_{fr})_i b_i}{a_i + b_i} \text{sen}^2 \beta_i \quad 5.2.4m$$

5.2.5.- RELACIONES ENTRE METODOS DE OBTENCION DE PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS Y UNIDADES GEOHIDROLOGICAS EN EL AREA DE ZIMAPAN.

De acuerdo a las características litológicas y estructurales de las diferentes unidades geohidrológicas en el área de Zimapan, los métodos alternativos de obtención de parámetros hidrogeológicos aplicables en el área se resumen en la tabla 5.1.

TABLA 5.1: RELACION ENTRE METODOS DE ESTIMACION DE PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS Y UNIDADES GEOHIDROLOGICAS EN EL AREA DE ZIMAPAN

U. GEOHIDRO-LOGICAS (FORMACION)	PERMEAMETROS		PRUEBAS DE PERMEABILIDAD		PRUEBAS DE ABSORCION		METODO DE ESTIMACION					
	AIRE*	AGUA*	LEFRANC ^o	LUGEON ^o	NASBERG ^o	MATZUO-AKAI	TABLAS DE CONDUCTIVIDAD	FORMULAS EMPIRICAS	METODOS ESTRUCTURALES	METODOS GEOFISICOS		
										REGISTRO DE POZOS ^o	ELECTRICOS [⊕]	
TRANCAS			X									
SANTUARIO	X	X	X	X	X	X	X					
DOCTOR/ABRA			X	X	X	X	X		X			
TAMAULIPAS SUPERIOR			X	X	X	X	X		X			
SOYATAL			X				X		X			
EL MORRO / ZIMAPAN	X	X	X	X	X	X	X					
ROCAS VOLCANICAS			X	X	X	X	X	X				
C. INTRUSIVOS			X	X					X			
TARANGO	X	X	X		X		X					
D. RECIENTES	X	X	X		X	X	X	X	X		X	
					X	X	X	X			X	X

* Requiere de muestras de roca

^o Se requiere de un pozo. (la prueba lefranc, se realiza generalmente durante la perforación, o en su defecto se aísla un tramo de tres metros)

⊕ Requiere de muestra de agua

X Método factible de aplicar

En la tabla anterior se muestran las unidades hidrogeológicas del área de estudio y los posibles métodos alternativos de obtención de conductividad hidráulica.

Pruebas directas en laboratorio con permeámetros pueden ser aplicadas a medios principalmente granulares como son las formaciones Santuario, El Morro, Conglomerado Zimapán, Tarango y Depósitos Recientes.

Debido a que las pruebas de permeabilidad Lefranc pueden ser aplicados a materiales no consolidados, estas pruebas podrían llevarse a cabo en formaciones tales como la Soyatal, Tarango y Depósitos Recientes, en donde se cuente con pozos en perforación o sin equipar.

En rocas compactas se recomienda más el uso de pruebas de Permeabilidad Lugeón, en donde se inyecta agua a presión e tramos aislados de 3 m. Este tipo de pruebas puede ser aplicados a unidades como Santuario, Doctor, Abra, Tamaulipas Superior, El Morro, Rocas Volcánicas y Rocas Intrusivas.

En realidad únicamente las pruebas de Permeabilidad Lugeón se han realizado en rocas de las formaciones El Doctor y Soyatal, en la boquilla de la Presa Hidroeléctrica de Zimapán y dado que estas se realizan en el momento de la perforación o aislando 3 m, estas pruebas no se realizan frecuentemente, ya que en el caso de aislar un tramo de 3 m resulta económicamente costoso llevarlo a cabo.

Pruebas de Absorción Nasberg y Matzuo-Akai pueden ser aplicados en las diferentes unidades, dado que la primera es para medios no saturados y la segunda para medios saturados.

En cuanto al uso de tablas de conductividad hidráulica, se tiene en la literatura rangos muy amplios de K y generalmente se desconoce las características o condiciones físicas de los materiales para los cuales se obtuvo dichos rangos; sin embargo se pueden tomar valores de referencia para cada una de las unidades hidrogeológicas del área.

Las fórmulas empíricas se utilizan solo para medios granulares, como los conglomerado El Morro y Zimapán, así como materiales no consolidados tales como la Formación Tarango y Depósitos Recientes, en donde es posible realizar análisis granulométricos.

La principal limitante es la falta de muestras no alteradas representativas de cada una de las unidades, pero este problema es salvable.

Los métodos estructurales como aquí se le han llamado se pueden aplicar en medios fracturados en donde es posible obtener parámetros medibles como el ancho, espaciamiento, rumbo y echado de las fracturas, de tal forma que se puede aplicar en formaciones como La Tamaulipas Superior, El Abra, El Doctor, Rocas Volcánicas e Intrusivas.

Los métodos geofísicos tienen la principal limitante que solo son aplicables a medios estratificados, relativamente homogéneos e isotrópicos. Su aplicación en medios fracturados

es por lo tanto muy restringida Rodríguez, R., (comunicación personal). La metodología de Kosinski requiere de sondeos eléctricos verticales (además que uno de los SEV se localice en la cercanía de un pozo, para su calibración) y pruebas de bombeo, lo cual limita aún más su uso en el área de estudio.

El principal problema para la aplicación de la mayoría de los métodos en las diferentes unidades de la región es la escasez de pozos y además sin equipar.

VI.- MEDICIÓN DE FRACTURAS

Se seleccionó este método debido al tipo de roca (calizas fracturadas) y a la escasa disponibilidad de pozos. Se realizaron una serie de mediciones para obtener la dirección de fracturamiento, ancho, longitud, echado y espaciamiento de las fracturas (fig. 3.2).

Estas mediciones se llevaron a cabo en las formaciones Tamaulipas Superior y El Abra, en localidades principalmente al norte de Zimapán (fig. 3.2).

Los sitios de medición de parámetros de fracturamiento fueron seleccionados siguiendo criterios como accesibilidad, inclinación de la estratificación, espesor de las capas, área de afloramiento del macizo rocoso, ubicación de la sección con respecto a los pliegues.

En total se realizaron 8 secciones, utilizando el método de "Scanline" con secciones de 10 a 30 m de longitud, aunque solo se eligieron 4 secciones para aplicar los métodos de obtención de conductividad hidráulica (K), esto debido a las características del terreno (vegetación, suelo, área de afloramiento), en 4 secciones no fue posible obtener todos los parámetros necesarios para aplicar los diferentes métodos elegidos.

Los datos obtenidos en campo fueron utilizados para la obtención de valores de conductividad hidráulica, los métodos usados fueron: a) Método de Snow (1968), b) Método del tensor de conductividad hidráulica de Romm (1966), c) Método para flujo entre dos placas derivado de la ley cúbica de Romm (1966) y d) Método para flujo vertical de Romm (1966).

A partir de los datos hidrogeoquímicos se determinó utilizar un valor de temperatura para el agua a 20.3C, en estas condiciones para el agua, se tienen las siguientes propiedades físicas, utilizando el Sistema Internacional de Unidades MKS:

$$\mu = 1 \text{ centipoise} = 0.01 \text{ poise} = 0.01 \text{ N}\cdot\text{seg}/\text{m}^2$$

$$\rho_w = 998.2 \text{ Kg}/\text{scg}$$

donde μ es la viscosidad cinemática del agua

ρ_w es la densidad del agua

El desarrollo de cada uno de los métodos se describe solo para la primera sección y el mismo procedimiento fue aplicado para las demás secciones.

6.1. SECCIÓN 1

Realizada en un flanco de un sinclinal de la Formación Tamaulipas Superior, la sección se realizó con un orientación de 155°, con una longitud de 24.1 m, perpendicular a rumbo de la capa, cuya estratificación es principalmente delgada, con echados muy altos (50-90), la mayor parte de las fracturas presentan relleno de calcita. El fracturamiento corresponde a discontinuidades asociadas principalmente a la estratificación, se presentan 2 sistemas de discontinuidades, las estadísticas de algunos parámetros de las fracturas y de los componentes del tensor de conductividades, se dan en la tabla 6.1.

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar	Sumatoria
Espaciamiento	0.01 m	3.6 m	0.482 m	0.3441	24.1 m
Apertura	0.001 m	0.05 m	0.0112 m	0.0001	0.564 m
Echado	26	90	66.66	281.3	3333
a11	9.0315 E -10	3.3714 E -4	2.0859 E -5	3.5746 E -9	1.0429 E -3
a12	-6.8404 E -6	8.021 E -5	3.2893 E -6	2.1756 E -10	1.6446 E -4
a13	-6.9459 E -6	1.7571 E -5	5.3425 E -7	1.1121 E -11	2.6712 E -5
a21	-6.8404 E -6	8.021 E -5	3.2893 E -6	2.1756 E -10	1.6446 E -4
a22	1.0445 E -10	4.1206 E -5	3.6399 E -6	7.4633 E -11	1.8199 E -4
a23	-7.0474 E -5	-1.206 E -24	-5.4664 E -6	1.743 E -10	-2.7332 E -4
a31	-6.9459 E -6	1.7571 E -5	5.3425 E -7	1.1121 E -11	2.6712 E -5
a32	-7.0474 E -5	-1.206 E -24	-5.4664 E -6	1.743 E -10	-2.7332 E -4
a33	7.8151 E -10	3.417 E -4	1.9163 E -5	3.6578 E -9	9.5814 E -4

Tabla 6.1.- Datos estadísticos de parámetros de fracturas y de componentes del tensor de conductividades de la sección 1.

Los valores de a_{ii} para formar los componentes del tensor de conductividades en la sección 1, se presentan en el anexo E.

a) Método de Snow

$$K = N \cdot b^3 \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{12\mu} = N \cdot b^3 \cdot \frac{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.80665 \text{ m/s}^2}{12 \cdot 0.01 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

Donde $N = 50 \text{ fracturas/24.1m} = 2.074688 \text{ m}^{-1}$

$b^3 = (0.01128)^3$, donde b es el promedio de apertura de la fractura
sustituyendo los valores de N y b en la ecuación anterior se tiene

$$K = 2.074688 \text{ m}^{-1} \cdot (0.01128 \text{ m})^3 \cdot \frac{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.80665 \text{ m/s}^2}{12 \cdot 0.01 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 0.24242 \text{ m/s}$$

b) Método del tensor de conductividades de Romm

Sustituyendo los valores de a_{ii} en el tensor de conductividades de Romm (*op. cit.*) de la ecuación 5.2.4h del capítulo anterior y resolviendo el determinante se tiene el siguiente resultado para la permeabilidad:

$$k = (1/12) \cdot 1.04296 \text{ E}^{-3} \cdot (1.8199 \text{ E}^{-4} \cdot 9.581 \text{ E}^{-4} - (2.7332 \text{ E}^{-4})^2) - 1.6446 \text{ E}^{-4} \cdot (1.6446 \text{ E}^{-4} \cdot 9.581 \text{ E}^{-4} - 2.7332 \text{ E}^{-4} \cdot 2.6712 \text{ E}^{-5}) + 2.6712 \text{ E}^{-5} \cdot (1.6446 \text{ E}^{-4} \cdot 2.7332 \text{ E}^{-4} + 1.8199 \text{ E}^{-4} \cdot 2.6712 \text{ E}^{-5})$$

$$k = (1/12) \cdot (8.0314 \text{ E}^{-11}) \text{ m}^2$$

$$\text{como la conductividad } K = k \cdot \rho_w \cdot g / \mu = 8.0314 \text{ E}^{-11} \cdot \frac{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.80665 \text{ m/s}^2}{12 \cdot 0.01 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2}$$

$$K = 6.53856 \text{ E}^{-6} \text{ m/s}$$

c) Método de Romm: flujo entre placas paralelas

$$K = \frac{b^2 \cdot \rho_w \cdot g}{12\mu} = \frac{(0.01128\text{m})^2 \cdot 998.2\text{kg/m}^3 \cdot 9.80665\text{m/s}^2}{12 \cdot 0.01\text{N}\cdot\text{s/m}^2} = 135.8749\text{ m/s}$$

d) Método de Romm: para flujo vertical en fracturas abiertas

$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{12\mu} \sum_{i=1}^n \frac{b_i^3}{a_i + b_i} \cdot \sin^2 \beta_i$$

donde i corresponde al echado de las fracturas, bi es la apertura de las fracturas y ai es el espaciamiento de las fracturas, en este caso n = 50.
Sustituyendo los valores de cada uno de los parámetros se tiene un valor de:
K = 468.229 m/s

6.2. SECCIÓN 2

Las mediciones fueron realizadas en un flanco del anticlinal de la Ventolera, desarrollado en la Formación Tamaulipas Superior, las discontinuidades corresponden principalmente a la estratificación, las fracturas tienen longitudes mayores a 2 m, presentan fracturas rellenas de calcita, se reconocieron al menos dos sistemas de fracturas, las estadísticas de algunos parámetros de las fracturas y de los componentes del tensor de conductividades se da en la tabla 6.2.

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar	Sumatoria
Espaciamiento	0.04	4.54	0.76875	0.9509	24.6
Apertura	0.001	0.01	0.0029	8.0849 E -6	0.093
Echado	14	90	72.875	380.734	2332
a11	3.0132 E -11	3.9087 E -7	3.4341 E -8	6.8379 E -15	1.0989 E -6
a12	-5.794 E -7	3.8875 E -7	-2.7029 E -8	2.0226 E -14	-8.6495 E -7
a13	-4.0246 E -7	2.798 E -7	4.3491 E -9	9.7381 E -15	1.3917 E -7
a21	-5.7949 E -7	3.8875 E -7	-2.7029 E -8	2.0226 E -14	-8.6495 E -7
a22	4.4764 E -11	2.7778 E -6	3.1258 E -7	3.9215 E -13	1.0002 E -5
a23	-1.0784 E -7	2.4025 E -8	-3.7254 E -9	3.7828 E -16	-1.1921 E -7
a31	-4.0246 E -7	2.798 E -7	4.3491 E -9	9.7381 E -15	1.3917 E -7
a32	-1.0784 E -7	2.4025 E -8	-3.7254 E -9	3.7828 E -16	-1.1921 E -7
a33	1.0313 E -10	2.7642 E -6	3.2558 E -7	4.1126 E -13	1.0418 E -5

Tabla 6.2.- Datos estadísticos de parámetros de fracturas y de componentes del tensor de conductividades de la sección 2.

Los valores de aii para formar los componentes del tensor de conductividades en la sección 2, se presentan en el anexo E.

6.3. SECCIÓN 3

Las mediciones se llevaron a cabo cerca del poblado de la Ventolera, en el flanco de un anticlinal desarrollado en la Formación Tamaulipas Superior, las mediciones se obtuvieron sobre una estratificación gruesa a masiva, la sección tiene una orientación de 40, el fracturamiento alcanza longitudes mayores a 17 m, la persistencia de las fracturas es muy

alta, las estadísticas de algunos parámetros de las fracturas y de los componentes del tensor de conductividades se presenta en la tabla 6.3.

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar	Sumatoria
Espaciamiento	0.01	0.8	0.2684	0.0418	10.2
Apertura	0	0.05	7.6578 E -3	1.5454 E -4	0.291
Echado	48	90	74.0263	134.552	2813
a11	0	2.6348 E -4	1.7244 E -5	2.9067 E -9	6.5527 E -4
a12	1.5953 E -4	0	-1.1638 E -5	1.2164 E -9	-4.4227 E -4
a13	-7.0041 E -5	7.0035 E -5	1.3077 E -6	3.6448 E -10	4.9692 E -5
a21	1.5953 E -4	0	-1.1638 E -5	1.2164 E -9	-4.4227 E -4
a22	0	3.4046 E -4	2.1807 E -5	4.6626 E -9	8.2868 E -4
a23	-1.3171 E -4	0	-7.1653 E -6	5.9845 E -10	-2.7228 E -6
a31	-7.0041 E -5	7.0035 E -5	1.3077 E -6	3.6448 E -10	4.9692 E -5
a32	-1.3171 E -4	0	-7.1653 E -6	5.9845 E -10	-2.7228 E -6
a33	0	4.8492 E -4	2.7840 E -5	7.257 E -9	1.0579 E -3

Tabla 6.3.- Datos estadísticos de parámetros de fracturas y de componentes del tensor de conductividades de la sección 3.

Los valores de a_{ii} para formar los componentes del tensor de conductividades en la sección 3, se presentan en el anexo E.

6.4. SECCIÓN 4

La toma de datos estructurales fue llevada a cabo sobre un macizo rocoso de la Formación El Abra, cerca del poblado de Puerto del Ángel, en el eje del anticlinal del mismo nombre, el eje del anticlinal tiene una orientación de 145, en tanto que la sección tiene una orientación de 175, en la sección llegan a presentarse huecos de disolución con diámetros de 14 a 20 cm de diámetro, las fracturas tienen una muy alta persistencia con longitudes desde 0.2 a más de 10 m, se reconocieron al menos dos sistemas de fracturas, no obstante de encontrarse gran cantidad de fracturas rellenas de calcita, solo se consideraron las fracturas abiertas, los parámetros estadísticos de las fracturas y de los componentes del tensor de conductividades se dan en la tabla 6.4.

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar	Sumatoria
Espaciamiento	0.08	10.15	2.4571	10.1981	17.2
Apertura	0.001	0.2	0.0408	0.0043	0.286
Echado	90	90	90	0	560
a11	3.4497 E -10	5.7311 E -3	8.2413 E -4	4.0131 E -6	5.7689 E -3
a12	-7.16075 E -7	2.3155 E -3	3.3065 E -4	6.5662 E -7	2.3145 E -3
a13	0	0	0	0	0
a21	-7.1607 E -7	2.3155 E -3	3.3065 E -4	6.5662 E -7	2.3145 E -3
a22	0	9.3553 E -4	1.3368 E -4	1.0715 E -7	9.3582 E -4
a23	0	0	0	0	0
a31	0	0	0	0	0
a32	0	0	0	0	0
a33	5.555 E -10	6.666 E -3	9.5782 E -4	5.4319 E -6	6.7047 E -3

Tabla 6.4.- Datos estadísticos de parámetros de fracturas y de componentes del tensor de conductividades de la sección 4.

Los valores de a_{ii} para formar los componentes del tensor de conductividades en la sección 4, se presentan en el anexo E.

6.5. SECCIÓN 4*

Los datos de esta sección corresponden a una parte de la sección anterior, sin embargo se tomaron en cuenta los datos de las fracturas rellenas de calcita, con el fin de evaluar la conductividad hidráulica del macizo rocoso antes del relleno de calcita, los datos estadísticos obtenidos en estas condiciones se presenta en la tabla 6.5.

	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar	Sumatoria
Espaciamiento	0.01	0.97	0.1977	0.0375	17.2
Apertura	0.001	0.2	0.0105	9.2188 E -4	0.918
Echado	90	90	90	0	
a11	0	3.4386 E -2	6.4836 E -4	1.5887 E -5	5.64 E -2
a12	-7.307 E -3	1.3893 E -2	4.1293 E -5	2.923 E -6	3.5925 E -3
a13	0	0	0	0	0
a21	-7.307 E -3	1.3893 E -2	4.1293 E -5	2.923 E -6	3.5925 E -3
a22	0	5.6132 E -3	1.2509 E -4	5.6086 E -7	1.0883 E -2
a23	0	0	0	0	0
a31	0	0	0	0	0
a32	0	0	0	0	0
a33	1.333 E -9	4 E -2	7.7346 E -4	2.2135 E -5	6.7291 E -2

Tabla 6.5.- Datos estadísticos de parametros de fracturas y de componentes del tensor de conductividades de la sección 4*.

Los valores de a_{ii} para formar los componentes del tensor de conductividades en la sección 4*, se presentan en el anexo E.

6.6. ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE K OBTENIDOS

El resumen de los resultados obtenidos en las cinco secciones, utilizando los diferentes métodos se presenta en la tabla 6.6.

	a) Snow(1968) m/s	b) Romm ^r (1966) m/s	c) Romm ^r (1966) m/s	d) Romm ^r (1966) m/s
Sección 1	0.2424	6.5385 E -6	10.3587	69.77
Sección 2	2.5995 E -3	8.6695 E -12	0.89447	0.8247
Sección 3	0.1389	2.642 E -5	18.1422	72.5518
Sección 4	2.2595	2.263 E -5	135.874	468.229
sección 4*	0.4887	3 2925	9.0643	3011.0613

Tabla 6.6.- Valores de conductividad hidráulica de las diferentes secciones, utilizando 4 métodos diferentes.

Como se puede ver los valores mas altos son obtenidos cuando se utilizo el método de Romm^r (*op. cit.*) y la ecuación para flujo vertical, que toma en cuenta las propiedades del fluido y la apertura de la fractura.

Los valores mas bajos se obtienen al utilizar el tensor de conductividades hidráulica de Romm' (*op. cit.*) que toma en cuenta las propiedades del fluido, las direcciones de las fracturas, la inclinación de las mismas, el ancho o apertura de las fracturas y su espaciamento de éstas.

Los valores intermedios, aunque mas cercanos a los valores altos de Romm' (*op. cit.*) son los de Snow (*op. cit.*), que toma en cuenta las propiedades del fluido, la apertura y la densidad de fracturamiento.

Para el caso de los valores de la sección 4 y 4* que corresponden a la misma localidad, utilizando el método de tensor de conductividades de Romm' (*op. cit.*) se puede ver que la variación entre un valor y otro es de 5 ordenes de magnitud, obteniendo valores de K muy altos cuando se consideran todas la fracturas, sin considerar el tipo de relleno.

El tipo de condiciones del terreno (rumbo y echado), orientación del "scanline" con respecto al sistema de fracturamiento, la posición de las capas y densidad de fracturamiento influyen en gran medida sobre el resultado obtenido de K.

En la región no se tiene conocimiento de pruebas de bombeo, para comparar estos valores, sin embargo, en la boquilla de la Presa Hidroeléctrica de Zimapán, C.F.E., (en Urbina, *op. cit.*) se realizaron pruebas de permeabilidad Lugeón en las formaciones Soyatal y El Doctor, obteniendo las siguientes mediciones.

0.66 U.L. 6.6 E -8 m/s
 0.88 U.L. 8.8 E -8 m/s
 2.0 U.L. 2 E -7 m/s
 2.1 U.L. 2.1 E -7 m/s

Considerando estos valores parece ser que los valores obtenidos utilizando el tensor de conductividades de Romm' (*op.cit.*) son los más conservadores y los más cercanos a las pruebas de permeabilidad obtenidas por C.F.E. para el área de Zimapán y queda dentro del rango de valores propuestos por otros autores como se ve en la tabla 6.7.

	Laboratorio (m/s)	Campo (m/s)
Caliza - dolomía ¹	1×10^{-5} a 1×10^{-13}	1×10^{-3} a 1×10^{-7}
Caliza Arcillosa ²		6.6×10^{-8}
Caliza (packstone) ²		2×10^{-7}
Caliza (packstone) ³		2×10^{-6}
Caliza (mudstone) ³		6.5×10^{-6} a 8.6×10^{-12}

1 Datos tomados de Davis y De Wiest (1966) y Díaz Mora

2 Datos obtenidos por C.F.E. en Calizas de la Formaciones Soyatal y El Doctor en la boquilla de la Presa Hidroeléctrica Zimapán, Rodríguez U. V. (1988)

3 Datos obtenidos por el método de tensor de conductividades de Romm' (1966) en calizas de las Formaciones El Abra y Tamaulipas Superior al Norte de Zimapán en el presente trabajo.

Tabla 6.7.- Rango de valores de K obtenidos en el presente trabajo y otros rangos reportados en la literatura para calizas fracturadas.

Es importante mencionar que en medios fracturados no se tiene un valor absoluto de conductividades hidráulicas, sino que se puede tener un rango muy amplio de conductividades y que la conductividad hidráulica tiene variabilidad espacial debido al grado y tipo de fracturamiento presente.

VII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio son de carácter interdisciplinario, en donde se dio un mayor peso a la componente geológica y geohidrológica, por lo tanto las principales conclusiones y recomendaciones tendrán la misma orientación.

Uno de los principales objetivos de esta investigación es contar con mayor soporte geológico en modelos funcionales que expliquen tanto el origen como los mecanismos de migración del Arsénico en el agua subterránea ya que esta constituye la única fuente de abastecimiento para la población.

Las principales conclusiones de este estudio se sumarizan en los siguientes apartados.

7.1.- CONCLUSIONES

- a) La distribución espacial de rocas carbonatadas para el área, partió de la propuesta de Carrasco, B. (1970)*, se encontraron zonas de transición entre las formaciones Tamaulipas Superior y El Abra.
- b) Dada la vocación minera del área, la mayoría de los trabajos de detalle se han realizado en las zonas mineras. Particularmente no se habían cartografiado a detalle la distribución de estructuras (fallas, diques y fracturas) en el resto del área. Debido a la posible asociación entre minerales de Arsénico y estas estructuras, se vio la necesidad de realizar un trabajo más detallado (figura 3.1).
- c) En trabajos previos se han reportado las fallas el Malacate y el Muhi (Simmons y Mapes, 1956; Armienta y Rodríguez, 1993 y 1995), particularmente en la primera se ha reportado una falla asociada entre el Conglomerado Zimapán y la Formación Tamaulipas Superior. No se encontraron en esa zona relaciones de campo que pudieran confirmar la presencia de esta última.

La posible presencia de estas estructura adquiere relevancia por su papel controlador en el flujo subterráneo. La llamada Falla el Muhi permitía postular hipótesis sobre las altas concentraciones de As en el pozo del mismo nombre. Al no encontrar evidencias suficientes de su existencia se tiene que pensar en otros mecanismos de migración del Arsénico.
- d) La diferencia en concentraciones de As entre los pozos El Muhi y El Detzani puede ser explicado en terminos de la mayor concentración de diques y brechas con relleno de material hidrotermal al norte del pozo El Muhi.
- e) Aunque del análisis de fracturamiento llevado a cabo en las 8 secciones, no es totalmente representativo de toda la región, se encontraron orientaciones preferenciales E-W, las cuales coinciden con las direcciones principales de diques y brechas.

* Ver pagina 12

- f) Aunque en el área, a nivel regional se han reportado direcciones preferenciales (basándose en las estructuras principales) NE-SW, los resultados aquí obtenidos aparentemente contradicen esta dirección pero el carácter buzante de estas estructuras pueden explicar las direcciones de fracturamiento, brechas y zona de diques aquí reportadas en las inmediaciones de Zimapán.
- g) Poco se sabe sobre las condiciones de confinamiento o semiconfinamiento de las unidades más permeables a profundidad. El sistema acuífero presenta ambas condiciones.
- h) Los pozos profundos del área captan agua del medio fracturado de las calizas, excepto el pozo San Pedro de reciente incorporación a la red de abastecimiento de Zimapán, el cual capta agua de medio granular en volcánicas.
- i) La principal zona de recarga de las calizas corresponde a la zona montañosa localizada en la porción norte del área, como además se constata por la baja red de drenaje superficial de esa zona (fig. 1.5). En tanto que el área de preferencial recarga al acuífero en medio fracturado de las rocas volcánicas corresponde a las estribaciones montañosas de la porción sur de la cuenca.
- j) No fue posible efectuar una representación de redes de flujo en los medios fracturados en calizas debido a tres factores:
- El marco tectónico regional generó una irregular distribución de unidades con diferentes niveles y direcciones de fracturamiento; las cuales llegan a controlar la hidrodinámica subterránea sin que estos flujos correspondan a direcciones preferenciales de flujo.
 - Existe una notable ausencia de obras hidráulicas reportadas en esta zona, particularmente solo se podría contar con la información del Pozo Detzani.
 - La existencia de diques y cuerpos intrusivos actúan como barreras de flujo, lo cual complica aun más la configuración del nivel estático.
- k) La configuración de nivel estático del acuífero en rocas volcánicas se elaboró tomando en cuenta los niveles de norias y manantiales. Las isoclinas del nivel estático, reflejan la topografía de la cuenca, lo cual además permite que se trate de un acuífero libre y relativamente somero (fig. 4.2).
- l) Los manantiales localizados entre El Aguacatal y Ojuelos presentan una marcada influencia estructural, como puede verse en las figuras 3.1 y 4.2. Lo mismo ocurre con los manantiales de Puerto Juárez, los cuales están en las inmediaciones de otras fallas.
- m) En los márgenes de la porción sur de la cuenca, las rocas volcánicas presentan un mayor fracturamiento superficial, lo cual, explica la presencia del acuífero descrito y las diferencias en comportamiento hidráulico de la porción central en la cual el acuífero está compuesto por un medio granular.

- n) Los gradientes de concentración de la mayoría de los iones son coincidentes con las direcciones preferenciales de flujo propuestas en la figura 4.2. Este resultado era de esperarse, en parte por la posición de las principales zonas de descarga y por la ubicación de las principales sitios de extracción. Las anomalías detectadas en estos gradientes son asociadas principalmente a las contribuciones adicionales de las infiltraciones originadas en jales y sitios de acumulación de residuos de fundición.
- o) En los diagramas de composición de STD-SO_4 y STD-Ca , elaborados se encuentran una relativa buena correlación lineal positiva con coeficientes de correlación de 0.9 y una muy pobre correlación en las demás, ya que se calculo coeficientes de correlación con variaciones de 0.1 - 0.6. Esto Puede explicar tomando en cuenta que las obras muestreadas en rocas volcánicas con bajo contenido de STD-Ca , STD-SO_4 , se encuentran agrupadas hacia el origen de la gráfica y las intermedias aumentan sus valores en la dirección del flujo. Este puede tener componentes de flujo de las calizas e infiltraciones provenientes de los Jales.
- p) De los resultados obtenidos en los diagramas de composición también se puede inferir la separación entre flujos de rocas volcánicas y calizas, ya que en los diagramas de $\text{SiO}_2\text{-Mg}$ y $\text{SiO}_2\text{-SO}_4$ los primeros están más cercanos al origen que los segundos.
- q) La dispersión encontrada en los demás diagramas de composición refuerzan el proceso de mezcla que existe en la zona de estudio, la cual incluye flujos contaminantes por las diferentes fuentes detectadas.
- r) Era de esperarse una buena correlación en el diagrama de As-SO_4 , lo cual corroboraría el origen del As por el flujo de agua subterránea en la zona de sulfosales, como puede apreciarse en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26. Los puntos correspondientes a los pozos se encuentran ubicados en la parte inferior del diagrama, lo cual sugiere que el As en estas obras pueda tener otros orígenes naturales.
- s) De los muestreos en el Pozo El Muhi realizados por el Instituto de Geofísica y la C.N.A. en diferentes periodos, se puede observar que las concentraciones de As varían temporalmente y pudiesen estar relacionados con los periodos de precipitación.
- t) La suposición relativa de estabilidad climática del área soportada por la ubicación de la zona y la ciclicidad de la precipitación observada, permitió proponer el esquema de migración de As, basado en el esquema de Rose *et. al.* (*op. cit.*), como puede observarse en las figuras 4.22 y 4.23. Los máximos en precipitación corresponden a mínimos de concentración de As, lo cual corrobora la hipótesis de la mayor disolución de As posterior al incremento de agua de precipitación. Esta hipótesis explica la variación de contenido de As en pozos, presuponiendo un flujo relativamente rápido del agua infiltrada de precipitación hacia el acuífero por el sistema de fracturas.
- u) La ausencia de As por lo menos en los límites de detección analítica en rocas volcánicas refuerzan la hipótesis postulada por el Instituto de Geofísica Armienta *et al.* (*op. cit*) del

origen natural del As en calizas fracturadas, en las cuales se encuentran los diques y brechas, en ocasiones rellenas de material hidrotermal.

v) Del análisis efectuado sobre los métodos existentes para la determinación de la conductividad hidráulica (K), se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El grado de fracturamiento en caliza complica la postulación de una metodología que conduzca a valores representativos, ya que las condiciones de fracturamiento y la conductividad hidráulica entre fracturas originan variación en K de hasta de 5 ordenes de magnitud de diferencia.
- De los métodos analizados, el método de tensores de Romm (*op. cit.*) parece ser el más indicado ya que considera el carácter tensorial de K, las características físicas de las fracturas y las propiedades del fluido, esto es validado parcialmente por los resultados obtenidos en las pruebas de Permeabilidad Lugeón realizadas en la boquilla de la Presa Hidroeléctrica de Zimapán por C.F.E. Los valores obtenidos por C.F.E. quedan dentro del rango obtenido por el método de tensores de Romm.
- La selección de este método también tomó en consideración el costo de su implementación. Métodos como las pruebas de permeabilidad Lugeón y Lefranc consideran la perforación de puntos de observación que dada las condiciones del área requiere de una serie de perforaciones que permitan un análisis estadístico de resultado.
- El costo de este tipo de pruebas es elevado. En tanto que el método propuesto por Romm aunque involucra una cuidadosa selección del sitio, tienen un costo relativamente bajo comparado con los demás, puede justificar su aplicación para obtener valores representativos, en rocas fracturadas.
- El ambiente geológico prevaleciente limita fuertemente la aplicación de cualquier método indirecto para la determinación de K, particularmente los métodos geofísicos que proponen relaciones empíricas entre K y θ_w . Esta limitante se ve soportada por las fallidas localizaciones de sitios de perforación en donde se usaron sondeos eléctricos verticales, cuya resolución fue muy baja.
- Aunque en algunos métodos se consideraron fracturas rellenas de calcita, se partió del supuesto que el sistema de fracturas era el mismo, pero cuando se tiene un valor de densidad de fracturamiento, habría que ser cuidadoso, en analizar que este valor corresponda a un medio en donde solo se tomen las fracturas abiertas y si se consideran fracturas rellenas de algún material semipermeable debe aplicarse el Método de Chernyshev (*op. cit.*).
- Los valores obtenidos en las secciones 4 y 4*, revelan que el incluir los dos tipos de fracturas puede originar diferencias en K de hasta 5 ordenes de magnitud.
- Los valores obtenidos no son representativos de toda la formación, pero localmente se pueden tomar en cuenta cuando se tengan condiciones similares a esta, particularmente en lo referente a la densidad de fracturamiento.

7.2.- RECOMENDACIONES

a) Se recomienda una cartografía detallada de la distribución de diques y/o brechas buscando la diferencia entre estos dos elementos. Esto permitirá también, entender su papel como barreras laterales de flujo.

- b) Dado que los diques pueden jugar un papel muy importante en la alteración de la calidad del agua subterránea en Zimapán, sería conveniente realizar un estudio mineralógico de estos, para conocer el tipo y distribución de minerales de As presentes.
- c) Se propone realizar un estudio geológico - geofísico a detalle de la zona situada en la figura 4.2, para realización de perforaciones exploratorias tendientes a transformarse en pozos productivos. Hacia esa zona convergen la mayoría de líneas de flujo, lo cual explica el nivel de producción del pozo Temuthé; este pozo no presenta problemas de As y se supone que otros que podrían localizarse en esa área tampoco, ya que la roca prevaecientes son de tipo volcánicas así como las de la zona de recarga.
- d) Otra zona de interés desde el punto de vista de fuente alternativa pudiera ser el área de los Carrizos, ubicada en las inmediaciones del cerro El Muhi, hacia la comunidad de San Juan. En este valle existen manantiales de buen caudal, como Las Huertas, Los Carrizos y San Juan; si bien se ha detectado As en ellos, su contenido está debajo de la norma para agua potable. La presencia de brechas y diques en esa área, cumple con dos funciones, por un lado incrementa la conductividad hidráulica debido al fracturamiento y por otro al actuar como barreras de flujo, permiten la captación de caudales importantes.
- e) La diferenciación piezométrica y geoquímica observada entre la obras superficiales y profundas, particularmente en calizas, nos permite sugerir un estudio basado en el uso de técnicas isotópicas como trazadores para apoyar las hipótesis vertidas sobre mecanismos de recarga y tratar de diferenciar los flujos locales, intermedios y/o regionales.
- f) Sería recomendable rescatar el pozo El Muhi, recientemente clausurado, para adecuarlo como punto de observación vertical sistemático. La serie de observaciones a generarse en este punto, permitiría corroborar el esquema aquí presentado sobre el papel que puede jugar la precipitación en la migración de As.
- g) La realización de un balance hidrológico en esta región árida es primordial para poder tener una primera idea sobre la potencialidad del sistema (el agua subterránea es la única fuente disponible). Un elemento importante a este respecto es la estimación de flujos a lo largo del cauce del Tolimán, ya que éste es el principal dren de la cuenca.
- h) Habría que realizar un estudio de impacto ambiental para conocer el papel que juegan las aguas residuales urbanas vertidas al cauce del Tolimán; habría que remarcar que el agua abastecida aun sigue presentando concentraciones relativamente altas de As (0.28 mg/l, Mayo de 1996).
- i) La heterogeneidad de la distribución espacial y temporal de las concentraciones de As en el área de estudio hacen pensar en la posibilidad que existan otras fuentes naturales de As, como el arrastre del metal diseminado en calizas.

j) Antes de entrar en el análisis de alternativas de tratamiento para reducir el contenido de As del agua servida, habría que agotar las posibilidades de encontrar fuentes alternas en el área propuesta o en otras que reúnan condiciones adecuadas. La mezcla de aguas es una practica ampliamente utilizada y mucho menos costosa que el establecimiento de plantas de tratamiento.

k) Si se considera a las rocas volcánicas como fuentes potenciales de abastecimiento, sería recomendable aplicar los métodos estructurales para la determinación de K.

BIBLIOGRAFIA

- APARICIO C., M. E.; 1986, Estratigrafía y geología estructural de la Formación El Doctor, en la parte norte de Querétaro. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- ARRIAGA, N., M.G. Y DANIEL, R., M.;1996. Bases geológicas del origen y movilidad del Arsenico en el Valle de Zimapán, Hidalgo. Tesis Ing. Geol., Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- ARMIENTA, M. A. Y RODRÍGUEZ C., R.;1993. Estudio de reconocimiento de la contaminación por Arsénico en la zona de Zimapán Hidalgo. Rep. Tec., Instituto de Geofísica UNAM.
- ARMIENTA, M. A. Y RODRÍGUEZ C., R.; 1995. Evaluación de Riesgo Ambiental debido a la presencia de Arsénico en Zimapán, Hidalgo, Memoria final, 42 pp; Instituto de Geofísica UNAM, Fund. Mapfre, España.
- ARTEAGA P., L. T.; 1982. Estudio geológico minero de la parte oriental de Zimapán, Estado de Hidalgo. Tesis Facultad de Ingeniería, S.L.P., Inédito.
- BARRERA G., D. Y GUZMAN V., M. A.; 1984. Petrografía e implicaciones genéticas de las areniscas de la Formación Las Trancas, Jurásico Superior-Cretácico Inferior, Estados de Querétaro-Hidalgo. Tesis Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- BEAR, J.; 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, N. Y.
- BERNABE M., M.G.;1991, Estudio paleoambiental y de microfácies de la Formación Las Trancas en el anticlinal de Bonanza, Estado de Hidalgo. Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, Inédito.
- BOYLE, R. W. Y I. R. JONASSON; 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. Journal of Geochemical. v.2, pp 251-296.
- BRYAN, K.; 1948. Los suelos complejos y fosiles de la Altiplanicie de Mexico en relacion con los cambios climaticos, Bol. Soc. Mex. t. 13, pp. 1-20.
- CABRERA L., F.; 1975. Estudio geológico de la Mina Las Animas, Distrito Minero de Zimapán, Estado de Hidalgo. Tesis Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- CANTAGREL, J.M., AND ROBIN C., 1979. K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks-Relation between the andesitic and the alkaline provinces. Journal of Volc. and Geot. Research, V.5, pp 99-114.
- CARRASCO-V., BALDOMERO, 1970, La Formación El Abra (Formación El Doctor) en la Plataforma de Valles-San Luis Potosí: Rev. Inst. Mex. Petróleo, v. 2, p. 97-99.
- CARRILLO B., J., 1971. La Plataforma Valles-San Luis Potosí. Bol. Asoc. Mex. de Geólogos Petroleros, V. 23, Nos. 1-6, pp 1-112
- CARRILLO M., M. y SUTER M.; 1982. Tectónica de los alrededores de Zimapán Hidalgo y Querétaro. Libro-guía de la excursión geológica a la Región de Zimapán. Soc. Geol. Mex., pp. 1-20.
- CARRILLO M., M.; 1989. Estratigrafía y tectónica de la parte centro-oriental del Estado de Querétaro. Rev. Ins. Geol., V. 8, No. 2, pp. 188-193.
- CARRILLO M., M.; 1981. Contribución al estudio geológico del Macizo Calcáreo el Doctor, Estado de Querétaro. Univ. Nal. Auton. Mex., Rev. Inst. Geol., V. 5, No. 1, pp. 25-29.
- CASTANY, G., 1975, Prospección y explotación de aguas subterráneas. Ed. Omega. S.A.
- CEBRIAN M.,A., ALBORES M., AGUILAR A. Y BLAKELY A.; 1983. Chronic, Arsenic Poisoning in the North of México. Human Toxicology, Vol. 2, pp 121-133.

- CEDILLO R., F.; 1975. Estudio geohidrológico de los Valles de Tecozautla-Huichapan, Estado de Hidalgo. Tesis Facultad de Ingeniería, UNAM.
- C.F.E., 1990, III Curso de ingeniería geológica, (Informe interno, inédito)
- CNA-IMTA; 1991-1993. Monitoreo de pozos y norias, Inédito.
- CNA, 1992. Estudio de prospección geohidrológica y exploración geofísica en la zona de Tecozautla-Vizarron, Estados de Hidalgo y Querétaro. IGAMSA, Informe Técnico.
- CHERNYSHEV, S.N., DERMAN W. R., 1991, Rocks fractures. Utteworth-Heinermann Editors.
- CRAIG, R. F., 1976, *Mécanica de suelos*. Logos, Consorcio Editorial S.A.
- DIAZ MORA, C., 1986, *Apuntes de Geotecnia*. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- DOMENICO, A.P. & FRANKLIN W. S.; 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc.
- FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM; 1984, Informe geológico del Prospecto Progreso IGPR 239. Area de Zimapan - Pachuca., Petroleos Mexicanos, Zona Norte., Inédito.
- FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM; 1989. Informe geológico final, IGZN 704, Prospecto Zimapan. Petroleos Mexicanos, Zona Norte., Inédito.
- FERGGURSON, J. Y GAVIS, J.; 1972. A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Res.* V. 6, 1259, 1274.
- FREEZA, A. Y CHERRY, J.; 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc.
- FRIES JR., CARL, 1965, Resumen de la Hoja Pachuca, Estado de Hidalgo. Serie 1:100,000. Inst. Geol. UNAM.
- FRIES JR., CARL Y RINCÓN-ORTA, CESAR, 1965, El basamento metamórfico en el noreste del Estado de Hidalgo. *In: Nuevas aportaciones geocronológicas y técnicas empleadas en el Laboratorio de Geocronometría*. Bol. Ins. Geol. UNAM.
- FROST, R. R., AND GRIFFIN, R. A.; 1977. Effect of pH on adsorption of Arsenic and Selenium from landfill leachate by clay minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, pp. 53-57.
- GARCIA, G. Y QUEROL, F.; 1991. Description of some deposits in the Zimapán District, Hidalgo. *The Geology of North America*, Vol. p-3. Economic Geology, México. The Geological Society of America.
- GULBRANDSEN. R. A. 1966. Chemical composition of phosphorites of the Phosphoria Formation. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. v. 30, pp. 769-778
- HEIM, ARNOLD, 1926, Notes on the Jurassic of Tamanzuchale (Sierra Madre Oriental). *Ecol. Geol. Helv.*, v. 20., p. 84-87.
- IMLAY, R. W., CEPEDA, EDMUNDO, ALVAREZ, MANUEL, JR., Y DÍAZ, TEODORO, 1948, Stratigraphic relations of certain Jurassic formations in eastern Mexico: *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, v. 32, p. 1750-1761.
- INEGI, 1994, Zimapán de Reyes, Estado de Hidalgo, Cuaderno Estadístico Municipal. H. Ayuntamiento de Zimapán de Reyes.
- J.I.C.A. and M.M.A.J. (Japan International Cooperation Agency and Metal Mining Agency of Japan), 1981. Report on Geological Survey of the Pachuca Area Central, Mexico. Phase I. Consejo de Recursos Minerales, México. (Archivo Técnico).
- KIYOKAWA, MOTOMU, ED., 1981, Report on geological survey of the Pachuca-Zimapán area, central Mexico phases II y III, México, D.F. Cons. Rec. Min., J.I.C.A. and M.M.A.J. (Japan International Cooperation Agency and Metal Mining Agency of Japan) 195 p. (Archivo Técnico).

- KOSINSKI, W. Y KELLY, W.E., 1981, Geoelectric sounding for predicting aquifer properties. Groundwater, Vol. 19, # 2.
- NRIAGU, J.; 1994. Arsenic in the environment. Part I: Cycling and Characterization., A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- MARIO O., G.; 1983. Geología regional de la porción noroccidental del Estado de Hidalgo. Tesis Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- MARTINEZ H., S.; 1979. Contribución al estudio geológico del sector Vizarron-Tolimán Estado de Querétaro. Tesis Facultad de Ingeniería, UNAM.
- MATUS V., J.; 1978. Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Tecozautla en el Estado de Hidalgo. tesis Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- MENDOZA R., C.; 1990. Estructura del sector Xajha (cabalgadura el Doctor) Estados de Hidalgo y Querétaro. Tesis Facultad de Ingeniería, UNAM, Inédito.
- MOK, W., RILEY, J. Y WAI, C.; 1988. Mobilization of Arsenic in contaminated rivers water. Water Res., 22, 769-774
- MUIR, J.M.; 1934. Geology of the Tampico Region, Mexico. Am. Assoc. Petrol. Geol., p. 377-398.
- NAJERA C., J. A.; 1984. Estudio geológico de semidetalle del área de Tolimán-San Joaquín, en los Estados de Querétaro y Hidalgo. Tesis Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- ONISHI, Y. 1978. Arsenic in Wedephol. k. h. ed. Handbook of Geochemistry. Berlin, Germany. v 11/3, pp. 33-A-1-33-O-1.
- OSCARSON, D. W., HUANG, P.M. AND LIAW, W. K., 1981. Role of Manganese in the oxidation of arsenate by fresh water lake sediments. Clays Clay Miner., 29, pp. 219-225
- PADILLA y SANCHEZ, R.J.; 1982. Geologic Evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepcion del Oro, Saltillo, and Monterrey. México. University Texas at Austin, PhD Dissertation., Inédito, 217 p.
- SARH; 1977. Estudio geohidrológico Zimapán - Ixmiquilpan, Estado de Hidalgo. Informe interno.
- RAISZ, E., 1959. Landforms of Mexico, Mapa con texto, Escala 1:3 000 000, Sec. Ed., Cambridge Mass.
- RODRÍGUEZ U., V.; 1988. Geología y geotecnia del vaso y boquilla de la Presa Hidroeléctrica Zimapán sobre el Río Moctezuma, Estados de Hidalgo y Querétaro. Tesis Facultad de Ingeniería, UNAM, Inédito.
- ROMERO D., A.; 1990. Caracterización Geoeléctrica del Sistema Acuífero del Valle de San Luis Potosí, S.L.P., Tesis Facultad de Ingeniería, UNAM, Inédito.
- ROMM, Y. S. 1966. Percolation Properties of fractured rocks. Moscow, Nedra Publishers. 222 pp.
- ROSE, A., HAWKES, H., Y WEBB, J.; 1991. Geochemistry in mineral exploration, Academic Press, Second Edition
- SARH, 1977. Estudio geohidrológico, zona Ixmiquilpan-Zimapán, Estado de Hidalgo. Geohidrológica Mexicana, S.A., Reporte Técnico.
- SEGERSTROM K.; 1961. Geología del suroeste del estado de Hidalgo y del noroeste del Estado de México. Bol. Asoc. Mex. Geol. Pet., V. 13, nú 3,4.
- 1962. Geology of south-central Hidalgo and northeast México: U.S. Geological Survey Bulletin. 1104-C, p. 87-162.
- SEEVER, D. O., 1967, A nuclear magnetic, method for determinations the permeability, of sandstone, Paper L. SP WLA Transactions.

- SIMMONS, F.S. y MAPES V.; 1956. Geología y yacimientos minerales del Distrito Minero de Zimapán, Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales
- SUTER M.; 1984. Cordilleran deformation along the eastern edge of the Valles San Luis Potosi carbonate plataform, Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in East-central Mexico. Geol. Soc. of Am. Bull., V. 95, No. 12, pp. 1387-1397.
- SUTER M.; 1987 Structural transverse across the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in East-central Mexico. Geol. Soc. of AM. Bull., V. 98, No. 3, pp. 249-264.
- TIMUR, A., 1968, An investigation of permeability, porosity and residual water saturation relationships for sandstones reservoir. The log analyst, July-August.
- TIMUR, A., 1972, Nuclear magnetism studies of carbonates rocks. Paper N., SP WLA.
- TOTH, J. 1966. Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie enviroment. Alberta, Canada, Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol. v. 11, No. 2, pp 1-49.
- TOURTELOT, H. A. 1964. Minors elements composition and organic carbon content of marine and nonmarine shales of late Cretaceous age in the western interior of the United States. *Geochemica et Cosmochimica Acta.* v.28; pp. 1579-1604.
- TREJO DE LA CRUZ, M.; 1975; Guías útiles en la prospección de minerales en el Distrito Minero de Zimapán, Estado de Hidalgo. Tesis Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, IPN, Inédito.
- WEBB, J. L. (ED.), 1976. *Enzime and Metabolic Inhibitors.* Academic Press, New York.
- WELCH, A., LICO, M. Y HUGHES, J., 1988; Arsenic in groundwater of the Western United State. *Grounwater*, No. 3, V. 26.
- WILSON, B. W., Hernandez, P. y Meave, T.E.; 1955. Un banco calizo del Cretácico, en la parte oriental del Estado de Querétaro. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, V. 18, No. 1, pp. 1-10.

ANEXO A Censo de Aprovechamientos

31	San Pedro	V. Carranza	Pozo	RV	45982 3	2295023	1881.7	0.3	18.53	1.96	34	186. 12	106.9 2	514.1		33.82	12.23		0		70					
32	F.I.Madero 1	F.I. Madero	Pozo	Q/R V	46982 3	2291900	1900	0																		
33	F.I.Madero 2	F.I. Madero	Noria	RV	46707 0	2291950	1885	0	15																	
34	Agua Gde.1.2	S de F.I. Madero	Noria	RV	46735 0	2291200	1945.6	1.1	5.43	1.41	15.62	27.5 0	46									0	66.05			
35	Agua Gde.3	S de F.I. Madero	Noria	RV	46740 0	2291250	1945.7	0.63	6.3																	
36	Agua Gde.4	S de F.I. Madero	Noria	RV	46730 0	2291550	1912.8	0	7.18														0.077 1	44.3		22.1
37	Baños	Zimapan	Noria	Cg/R V	46100 0	2292650	1765.9	0	4.1	11.69	46	29.1 0	301.3 8	416.1 6	61.2	201	86						0	53.14	798	7.55
38	Tlalpan 1	Tlalpan	Noria	RV	46205 0	2290800	1755	1	3.9	11.05	52.9	26.7 3	69.74	338.4 2	0	49.36	32									
39	Tlalpan 2	Tlalpan	Noria	RV	46206 0	2290805	1755	0.85	4.35																	
40	Tlalpan 3	Tlalpan	Noria	RV	46212 3	2290790	1765	0.3	4.42																	
41	Remedios	Remedios	Pozo	RV	46363 0	2290000	1783.9	0.2	26.28																	20.8
42	L. Cardenas 1	L. Cardenas	Noria	RV	46470 0	2289550	1795.6	0.5	24.85	4.5	38	12.1 5	76.07	213.7 5	15.2	54.87	33						0	32.42		
43	L. Cardenas 2	L. Cardenas	Noria	RV	46477 3	2289625	1810.2	0.4	18.2																	
44	Joya 1	L. Cardenas	Noria	RV	46417 0	2288200	1836.66	0.55	23.89																	
45	Joya 2	L. Cardenas	Noria	Cg/R V	46513 0	2288050	1833.88	0.25	20.87																	
46	Joya 3	L. Cardenas	Noria	Cg	45560	2288300	1834.18	0.52	16.34																	
47	Joya 4	L. Cardenas	Noria	RV	46533 0	2288175	1832.94	0.4	27.46																	
48	Aguacatal 1	El Aguacatal	Manantial	Cg/R V	46777 5	2287300	2015.38	0	7.62	1.11	1040	16.3 6	107.1 4			32.26	4.29					0	28			
49	Aguacatal 2	El Aguacatal	Noria	Cg/R V	46775 0	2287375	2015	0	0																	
50	Aguacatal 3*	El Aguacatal	Manantial	RV-Cg	46755 0	2287850	1929	0	0																	23.5
51	Salitre 1	El Salitre	Noria	RV	46520 0	2290150	1833.45	0.45	16.5	2	19.5	17.6 1	41.31	200.8 7	10.13	12.31	4.2	0.4	0				0	51.64	7.47	23.5
52	Salitre 2	El Salitre	Noria	RV	46536 0	2290850	1832.03	0.3	18.17	3	24	24.8	58.80	293.5 7	0	14.84	8.8	0.4	0				0	35.61	7.35	26.3
53	Salitre V. 3	El Salitre	Pozo	RV	46519 0	2290775	1836.5	0.5	4	2	19	22.3 2	45.30	245.9 3	0	15.94	4.3	0.44	0				0	51.26	7.41	21.9
54	El Zapote	El Salitre	Manantial	RV	46600 0	2291100	1910	0	0																	
55	Higuerilla 1	Higuerilla	Noria	RV	46635 0	2291000	1865	0.37	15.85	3.12	53.2	57.6	65.53	355.4	10.81	39.84	32.8									
56	Higuerilla 2	Higuerilla	Noria	RV	46636 0	2291023	1864	0	5.55																	
57	Higuerilla 3	Higuerilla	Noria	RV	46690 0	2291050	1877	0.76	0																	
58	Higuerilla 4	Higuerilla	Manantial	RV	46694 5	2291188	1861	0.76	13.65	2.31	69.05	35.1 2	40.47	357.4 1	0	24.8	12.6					0	60.65	7.8		
59	Calicanto	Tenguedho	Pozo	RV	46705 0	2290100	1910	0	0																	
60	La Sabina	W del Salitre	Manantial	RV	46861 0	2290825	1985.6	0	4.39	2.0	51.62	46.6 2	83.02			35.36	21.2	0.5				0.614	50.75			7.46
61	Tenghedo	Tenghedo	Noria	RV	46442 0	2289375	1797.7	0.15	12.26	2.3	30.09	26.6 2	70.89	324.5 2	0	27.98	11.5						0	55.08	645	7.41
62	Huizache 1	Huizache	Noria	Q/R V	46442 3	2289375	1797.7	0.15	12.26																	

SECCIÓN 1

FILE: A:\SEC-1.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a12	a13	a21	a22	a23	a31
1	5.036E-010	9.8027E-011	5.036E-010	3.905E-010	-1.87E-009	9.8027E-011
2	-3.42E-009	-2.127E-025	-3.42E-009	6.031E-010	-1.206E-024	-2.127E-025
3	-5.847E-021	-1.031E-021	-5.847E-021	2.969E-006	-1.684E-005	-1.031E-021
4	2.6706E-006	1.082E-006	2.6706E-006	6.451E-006	-1.547E-005	1.082E-006
5	4.7142E-008	4.188E-009	4.7142E-008	1.042E-008	-2.375E-008	4.188E-009
6	-5.693E-010	-2.019E-011	-5.693E-010	1.0445E-010	-1.145E-010	-2.019E-011
7	6.785E-011	2.752E-011	6.785E-011	1.335E-010	-3.146E-010	2.752E-011
8	-1.013E-010	-5.416E-011	-1.013E-010	2.862E-010	-5.153E-010	-5.416E-011
9	-3.073E-008	-6.336E-008	-3.073E-008	1.246E-006	-6.028E-007	-6.336E-008
10	-1.998E-009	-4.118E-009	-1.998E-009	8.0993E-008	-3.918E-008	-4.118E-009
11	-4.994E-010	-1.03E-009	-4.994E-010	2.025E-008	-9.796E-009	-1.03E-009
12	1.182E-007	3.226E-008	1.182E-007	7.239E-008	-7.245E-008	3.226E-008
13	9.781E-007	6.172E-023	9.781E-007	2.439E-007	-2.475E-022	6.172E-023
14	1.656E-007	1.055E-023	1.656E-007	4.7485E-008	-3.679E-023	1.055E-023
15	2.548E-007	1.623E-023	2.548E-007	7.305E-008	-5.659E-023	1.623E-023
16	1.104E-007	7.032E-024	1.104E-007	3.166E-008	-2.452E-023	7.032E-024
17	1.948E-007	1.241E-023	1.948E-007	5.586E-008	-4.328E-023	1.241E-023
18	7.5646E-010	2.007E-010	7.5646E-010	4.216E-010	-5.514E-010	2.007E-010
19	1.745E-007	4.171E-008	1.745E-007	8.3971E-008	-1.557E-007	4.171E-008
20	2.2822E-007	5.455E-008	2.2822E-007	1.098E-007	-2.036E-007	5.455E-008
21	2.551E-005	5.614E-006	2.551E-005	1.145E-005	-2.095E-005	5.614E-006
22	8.021E-005	1.757E-005	8.021E-005	3.5437E-005	-7.047E-005	1.757E-005
23	6.536E-005	1.322E-005	6.536E-005	2.806E-005	-4.609E-005	1.322E-005
24	-2.632E-023	-1.063E-023	-2.632E-023	7.0165E-008	-1.737E-007	-1.063E-023
25	-4.386E-023	-1.772E-023	-4.386E-023	1.169E-007	-2.894E-007	-1.772E-023
26	-2.668E-022	-1.024E-022	-2.668E-022	6.421E-007	-1.673E-006	-1.024E-022
27	-1.138E-023	-4.37E-024	-1.138E-023	2.74E-008	-7.137E-008	-4.37E-024
28	-2.277E-023	-8.741E-024	-2.277E-023	5.48E-008	-1.427E-007	-8.741E-024
29	-2.277E-023	-8.741E-024	-2.277E-023	5.48E-008	-1.427E-007	-8.741E-024
30	-3.415E-023	-1.311E-023	-3.415E-023	8.219E-008	-2.141E-007	-1.311E-023
31	-1.138E-023	-4.37E-024	-1.138E-023	2.74E-008	-7.137E-008	-4.37E-024
32	-6.831E-024	-2.622E-024	-6.831E-024	1.644E-008	-4.282E-008	-2.622E-024
33	-3.415E-023	-1.311E-023	-3.415E-023	8.219E-008	-2.141E-007	-1.311E-023
34	-3.415E-023	-1.311E-023	-3.415E-023	8.219E-008	-2.141E-007	-1.311E-023
35	-3.415E-023	-1.311E-023	-3.415E-023	8.219E-008	-2.141E-007	-1.311E-023
36	-5.692E-024	-2.185E-024	-5.692E-024	1.37E-008	-3.569E-008	-2.185E-024
37	-1.708E-023	-6.555E-024	-1.708E-023	4.11E-008	-1.071E-007	-6.555E-024
38	-1.397E-008	-7.459E-009	-1.397E-008	4.673E-008	-8.525E-008	-7.459E-009
39	-4.867E-009	-2.598E-009	-4.867E-009	1.628E-008	-2.969E-008	-2.598E-009
40	-2.166E-008	-1.156E-008	-2.166E-008	7.242E-008	-1.321E-007	-1.156E-008
41	-1.504E-007	-8.028E-008	-1.504E-007	5.029E-007	-9.176E-007	-8.028E-008
42	-1.218E-006	-6.503E-007	-1.218E-006	4.074E-006	-7.433E-006	-6.503E-007
43	-1.075E-006	-5.738E-007	-1.075E-006	3.595E-006	-6.558E-006	-5.738E-007
44	7.895E-007	6.628E-007	7.895E-007	1.596E-005	-1.898E-005	6.628E-007
45	1.86E-007	1.861E-007	1.86E-007	5.34E-006	-5.33E-006	1.861E-007
46	8.788E-008	1.167E-007	8.788E-008	4.44E-006	-3.341E-006	1.167E-007
47	-1.178E-006	-1.376E-006	-1.178E-006	9.321E-006	-7.802E-006	-1.376E-006
48	-5.7E-007	-5.788E-007	-5.7E-007	3.434E-006	-3.283E-006	-5.788E-007
49	-6.84E-006	-6.946E-006	-6.84E-006	4.121E-005	-3.939E-005	-6.946E-006
50	-1.514E-006	-1.575E-006	-1.514E-006	6.148E-006	-5.493E-006	-1.575E-006

ANEXO C

SECCIÓN 1

FILE: A:\ SEC-1.DAT
 FORMAT: Curve

Row	Ancho	Distancia	Espaciamiento	Echado	Azimet	a11
1	0.001	0.1	0.1	79	93	9.974E-009
2	0.001	0.15	0.05	90	80	1.94E-008
3	0.04	0.8	0.65	80	90	9.846E-005
4	0.025	1.15	0.35	68	94	4.446E-005
5	0.005	1.6	0.45	85	100	2.695E-007
6	0.001	1.9	0.3	88	80	3.233E-009
7	0.001	3	1.1	68	95	9.032E-010
8	0.001	3.8	0.8	62	84	1.239E-009
9	0.01	4.45	0.65	26	84	1.535E-006
10	0.001	4.46	0.01	26	84	9.979E-008
11	0.001	4.5	0.04	26	84	2.495E-008
12	0.005	4.87	0.37	76	114	2.852E-007
13	0.005	4.9	0.03	90	104	3.923E-006
14	0.005	5.1	0.2	90	106	5.775E-007
15	0.005	5.23	0.13	90	106	8.885E-007
16	0.005	5.53	0.3	90	106	3.8501E-007
17	0.005	5.7	0.17	90	106	6.794E-007
18	0.001	6.1	0.4	76	110	2.225E-009
19	0.005	6.27	0.17	77	105	6.885E-007
20	0.005	6.4	0.13	77	105	9.004E-007
21	0.04	7	0.6	78	105	9.983E-005
22	0.05	7.35	0.35	78	104	0.000337144
23	0.04	7.6	0.25	79	106	0.000237258
24	0.005	7.85	0.25	68	90	5E-007
25	0.005	8	0.15	68	90	8.333E-007
26	0.01	8.2	0.2	69	90	5E-006
27	0.004	8.5	0.3	69	90	2.133E-007
28	0.004	8.65	0.15	69	90	4.267E-007
29	0.004	8.8	0.15	69	90	4.267E-007
30	0.004	8.9	0.1	69	90	6.4E-007
31	0.004	9.2	0.3	69	90	2.133E-007
32	0.004	9.7	0.5	69	90	1.28E-007
33	0.004	9.8	0.1	69	90	6.4E-007
34	0.004	9.9	0.1	69	90	6.4E-007
35	0.004	10	0.1	69	90	6.4E-007
36	0.004	10.6	0.6	69	90	1.067E-007
37	0.004	10.8	0.2	69	90	3.2E-007
38	0.004	11.11	0.31	62	85	2.052E-007
39	0.004	12	0.89	62	85	7.148E-008
40	0.004	12.2	0.2	62	85	3.181E-007
41	0.02	15.8	3.6	62	85	2.209E-006
42	0.03	17.3	1.5	62	85	1.789E-005
43	0.03	19	1.7	62	85	1.579E-005
44	0.03	19.7	0.7	50	92	3.854E-005
45	0.02	20.45	0.75	45	92	1.066E-005
46	0.02	21.6	1.15	37	92	6.953E-006
47	0.02	22.1	0.5	41	80	1.579E-005
48	0.02	23.3	1.2	45	80	6.566E-006
49	0.02	23.4	0.1	45	80	7.879E-005
50	0.02	24.1	0.7	45	74	1.099E-005

ANEXO C

SECCIÓN 1

FILE: A:\ SEC-1.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a32	a33	Kv
1	-1.87E-009	9.636E-009	9.541E-009
2	-1.206E-024	2E-008	1.961E-008
3	-1.684E-005	9.549E-005	8.996E-005
4	-1.547E-005	3.838E-005	3.582E-005
5	-2.375E-008	2.757E-007	2.726E-007
6	-1.145E-010	3.329E-009	3.318E-009
7	-3.146E-010	7.815E-010	7.808E-010
8	-5.153E-010	9.745E-010	9.733E-010
9	-6.028E-007	2.956E-007	2.912E-007
10	-3.918E-008	1.922E-008	1.747E-008
11	-9.796E-009	4.804E-009	4.687E-009
12	-7.245E-008	3.181E-007	3.138E-007
13	-2.475E-022	4.167E-006	3.571E-006
14	-3.679E-023	6.25E-007	6.098E-007
15	-5.659E-023	9.615E-007	9.259E-007
16	-2.452E-023	4.167E-007	4.098E-007
17	-4.328E-023	7.353E-007	7.143E-007
18	-5.514E-010	2.354E-009	2.348E-009
19	-1.557E-007	6.981E-007	6.781E-007
20	-2.036E-007	9.129E-007	8.791E-007
21	-2.095E-005	0.000102056	9.568E-005
22	-7.047E-005	0.000341705	0.000298991
23	-4.609E-005	0.00024668	0.000212655
24	-1.737E-007	4.298E-007	4.214E-007
25	-2.894E-007	7.164E-007	6.933E-007
26	-1.673E-006	4.358E-006	4.15E-006
27	-7.137E-008	1.859E-007	1.835E-007
28	-1.427E-007	3.719E-007	3.622E-007
29	-1.427E-007	3.719E-007	3.622E-007
30	-2.141E-007	5.578E-007	5.364E-007
31	-7.137E-008	1.859E-007	1.835E-007
32	-4.282E-008	1.116E-007	1.107E-007
33	-2.141E-007	5.578E-007	5.364E-007
34	-2.141E-007	5.578E-007	5.364E-007
35	-2.141E-007	5.578E-007	5.364E-007
36	-3.569E-008	9.297E-008	9.2352E-008
37	-1.071E-007	2.789E-007	2.734E-007
38	-8.525E-008	1.609E-007	1.589E-007
39	-2.969E-008	5.606E-008	5.581E-008
40	-1.321E-007	2.495E-007	2.446E-007
41	-9.176E-007	1.732E-006	1.723E-006
42	-7.433E-006	1.403E-005	1.376E-005
43	-6.558E-006	1.238E-005	1.217E-005
44	-1.898E-005	2.263E-005	2.17E-005
45	-5.33E-006	5.333E-006	5.195E-006
46	-3.341E-006	2.52E-006	2.476E-006
47	-7.802E-006	6.887E-006	6.622E-006
48	-3.283E-006	3.333E-006	3.279E-006
49	-3.939E-005	4E-005	3.333E-005
50	-5.493E-006	5.714E-006	5.556E-006

FILE: A:\TMP\SEC-2.DAT
 FORMAT: Curve

Row	Distancia	Longitud	Apertura	Azmut	Echado	Espaciamiento
1	0.44	0.43	0.001	160	68	0.44
2	0.95	0.44	0.008	10	98	0.51
3	1	0.53	0.001	160	68	0.05
4	1.12	0.1	0.005	24	88	0.12
5	1.16	0.42	0.003	0	62	0.04
6	1.2	0.18	0.001	80	26	0.04
7	1.9	0.2	0.001	80	88	0.7
8	6.44	0.66	0.002	12	14	4.54
9	8.97	0.17	0.001	16	84	2.53
10	9.3	0.1	0.001	15	70	0.33
11	10.3	0.1	0.001	15	70	1
12	10.7	0.1	0.001	15	70	0.4
13	11.11	0.23	0.001	172	34	0.41
14	12	2	0.001	5	82	0.89
15	12.16	0.08	0.004	5	82	0.16
16	14	1	0.005	0	86	1.84
17	14.36	2	0.01	0	86	0.36
18	15	4	0.01	0	86	0.64
19	18.4	0.5	0.001	25	66	3.4
20	19.2	1	0.005	30	90	0.8
21	19.7	0.5	0.001	11	85	0.5
22	20.4	0.4	0.001	135	45	0.7
23	20.7	3	0.001	5	62	0.3
24	21.3	4	0.01	165	75	0.6
25	21.6	1.5	0.001	160	52	0.3
26	21.7	4	0.005	34	90	0.1
27	22.05	1	0.002	34	90	0.35
28	22.15	4	0.001	10	83	0.1
29	22.8	4	0.002	10	83	0.65
30	23.3	4	0.002	10	83	0.5
31	24.1	4	0.002	10	83	0.8
32	24.6	4	0.002	10	83	0.5

FILE: A:\TMP\SEC-2.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a11	a12	a13	a21	a22	a23
1	5.475E-010	6.279E-010	-7.418E-010	6.279E-010	2.044E-009	-2.7E-010
2	4.913E-008	-1.684E-007	-1.363E-007	-1.684E-007	9.742E-007	2.403E-008
3	4.818E-009	5.526E-009	-6.528E-009	5.526E-009	1.799E-008	-2.376E-009
4	1.734E-007	-3.866E-007	3.319E-008	-3.866E-007	8.695E-007	-1.478E-008
5	1.488E-007	0	2.798E-007	0	6.75E-007	0
6	2.486E-008	-8.216E-010	1.71E-009	-8.216E-010	2.034E-008	-9.7E-009
7	1.386E-009	-2.44E-010	8.6522E-012	-2.44E-010	4.476E-011	-4.907E-011
8	1.663E-009	-2.097E-011	4.046E-010	-2.097E-011	1.758E-009	-8.6E-011
9	3.402E-011	-1.036E-010	3.95E-011	-1.036E-010	3.656E-010	-1.133E-011
10	5.337E-010	-6.69E-010	9.407E-010	-6.69E-010	2.851E-009	-2.521E-010
11	1.761E-010	-2.208E-010	3.104E-010	-2.208E-010	9.408E-010	-8.318E-011
12	4.403E-010	-5.519E-010	7.761E-010	-5.519E-010	2.352E-009	-2.08E-010
13	1.691E-009	1.051E-010	-1.12E-009	1.051E-010	2.424E-009	-1.574E-010
14	3.013E-011	-9.567E-011	1.543E-010	-9.567E-011	1.115E-009	-1.35E-011
15	1.073E-008	-3.406E-008	5.492E-008	-3.406E-008	3.9702E-007	-4.805E-009
16	3.306E-010	0	4.727E-009	0	6.793E-008	0
17	1.352E-008	0	1.933E-007	0	2.778E-006	0
18	7.603E-009	0	1.087E-007	0	1.5625E-006	0
19	9.2498E-011	-9.402E-011	9.905E-011	-9.402E-011	2.503E-010	-4.619E-011
20	3.906E-008	-6.766E-008	8.285E-024	-6.766E-008	1.172E-007	-4.784E-024
21	8.746E-011	-3.718E-010	1.705E-010	-3.718E-010	1.928E-009	-3.313E-011
22	1.071E-009	3.571E-010	-5.051E-010	3.571E-010	1.071E-009	-5.051E-010
23	7.544E-010	-2.256E-010	1.376E-009	-2.256E-010	3.314E-009	-1.204E-010
24	2.158E-007	3.888E-007	-4.025E-007	3.888E-007	1.5625E-006	-1.078E-007
25	1.506E-009	6.652E-010	-1.52E-009	6.652E-010	3.0912E-009	-5.531E-010
26	3.909E-007	-5.795E-007	6.345E-023	-5.795E-007	8.591E-007	-4.28E-023
27	7.147E-009	-1.06E-008	1.16E-024	-1.06E-008	1.571E-008	-7.826E-025
28	4.4558E-010	-1.685E-009	1.191E-009	-1.685E-009	9.703E-009	-2.1E-010
29	5.484E-010	-2.073E-009	1.466E-009	-2.073E-009	1.194E-008	-2.585E-010
30	7.129E-010	-2.696E-009	1.906E-009	-2.696E-009	1.552E-008	-3.361E-010
31	4.4558E-010	-1.685E-009	1.191E-009	-1.685E-009	9.703E-009	-2.1E-010
32	7.129E-010	-2.696E-009	1.906E-009	-2.696E-009	1.552E-008	-3.361E-010

FILE: A:\TMP\SEC-2.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a31	a32	a33	Kv
1	-7.418E-010	-2.7E-010	1.9538E-009	1.949E-009
2	-1.363E-007	2.403E-008	9.845E-007	9.693E-007
3	-6.528E-009	-2.376E-009	1.719E-008	1.686E-008
4	3.319E-008	-1.478E-008	1.0404E-006	9.988E-007
5	2.798E-007	0	5.262E-007	4.895E-007
6	1.71E-009	-9.7E-009	4.804E-009	4.687E-009
7	8.6522E-012	-4.907E-011	1.427E-009	1.4248E-009
8	4.046E-010	-8.6E-011	1.0313E-010	1.031E-010
9	3.95E-011	-1.133E-011	3.909E-010	3.908E-010
10	9.407E-010	-2.521E-010	2.676E-009	2.668E-009
11	3.104E-010	-8.318E-011	8.83E-010	8.8214E-010
12	7.761E-010	-2.08E-010	2.208E-009	2.202E-009
13	-1.12E-009	-1.574E-010	7.627E-010	7.608E-010
14	1.543E-010	-1.35E-011	1.102E-009	1.1006E-009
15	5.492E-008	-4.805E-009	3.923E-007	3.827E-007
16	4.727E-009	0	6.76E-008	6.7421E-008
17	1.933E-007	0	2.764E-006	2.69E-006
18	1.087E-007	0	1.5549E-006	1.531E-006
19	9.905E-011	-4.619E-011	2.4546E-010	2.454E-010
20	8.285E-024	-4.784E-024	1.5625E-007	1.5528E-007
21	1.705E-010	-3.313E-011	1.985E-009	1.981E-009
22	-5.051E-010	-5.051E-010	7.143E-010	7.133E-010
23	1.376E-009	-1.204E-010	2.599E-009	2.59E-009
24	-4.025E-007	-1.078E-007	1.555E-006	1.53E-006
25	-1.52E-009	-5.531E-010	2.07E-009	2.063E-009
26	6.345E-023	-4.28E-023	1.25E-006	1.19E-006
27	1.16E-024	-7.826E-025	2.286E-008	2.273E-008
28	1.191E-009	-2.1E-010	9.851E-009	9.754E-009
29	1.466E-009	-2.585E-010	1.212E-008	1.209E-008
30	1.906E-009	-3.361E-010	1.576E-008	1.57E-008
31	1.191E-009	-2.1E-010	9.851E-009	9.827E-009
32	1.906E-009	-3.361E-010	1.576E-008	1.57E-008

SECCIÓN 3

FILE: A:\TMP\SEC-3.DAT
 FORMAT: Curve

Row	Distancia	Ancho	Azimut	Echado	Espaciamien	a11
1						
2	0	0.05	145	80	0.25	0.000174612
3	0.25	0.02	45	65	0.27	1.746E-005
4	0.52	0.04	48	61	0.29	0.000145103
5	0.81	0.03	62	48	0.09	0.000263484
6	0.9	0.02	105	79	0.7	1.069E-005
7	1.6	0	160	50	0.45	0
8	2.05	0.03	168	85	0.33	4.131E-006
9	2.38	0.015	105	55	0.42	7.675E-006
10	2.8	0.005	80	70	0.5	2.433E-007
11	3.3	0.02	155	85	0.1	1.479E-005
12	3.4	0	70	88	0.4	0
13	3.8	0.01	135	87	0.2	2.507E-006
14	4	0.01	64	90	0.19	4.252E-006
15	4.19	0	60	85	0.01	0
16	4.2	0.02	152	73	0.36	6.379E-006
17	4.56	0.001	65	80	0.74	1.117E-009
18	5.3	0.01	65	86	0.3	2.741E-006
19	5.6	0	45	80	0.1	0
20	5.7	0	150	62	0.22	0
21	5.92	0	40	85	0.11	0
22	6.03	0	65	88	0.07	0
23	6.1	0.005	140	75	0.05	1.131E-006
24	6.15	0.005	165	80	0.16	7.431E-008
25	6.31	0	40	85	0.09	0
26	6.4	0	43	88	0.09	0
27	6.49	0	152	65	0.21	0
28	6.7	0	145	60	0.8	0
29	7.5	0	165	65	0.25	0
30	7.75	0	140	75	0.25	0
31	8	0	175	62	0.56	0
32	8.56	0	60	70	0.04	0
33	8.6	0	167	72	0.2	0
34	8.8	0	171	68	0.29	0
35	9.09	0	172	70	0.04	0
36	9.13	0	118	70	0.65	0
37	9.78	0	65	85	0.15	0
38	9.93	0	0	56	0.07	0
39	10	0	125	85	0.2	0

FILE: A:\TMP\SEC-3.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a12	a13	a21	a22	a23	a31
1						
2	0.000159535	-7.004E-005	0.000159535	0.000340465	4.904E-005	-7.004E-005
3	1.217E-005	8.025E-006	1.217E-005	1.746E-005	8.025E-006	8.025E-006
4	9.323E-005	6.262E-005	9.323E-005	0.000127457	6.954E-005	6.262E-005
5	0.000129163	7.0035E-005	0.000129163	0.000170837	0.000131717	7.0035E-005
6	1.027E-005	-5.54E-007	1.027E-005	1.154E-006	2.068E-006	-5.54E-007
7	0	0	0	0	0	0
8	3.51E-006	-6.949E-006	3.51E-006	7.831E-005	1.477E-006	-6.949E-006
9	5.031E-006	-9.772E-007	5.031E-006	3.005E-006	3.6469E-006	-9.772E-007
10	2.141E-007	1.395E-008	2.141E-007	3.5901E-008	7.913E-008	1.395E-008
11	1.418E-005	-6.295E-006	1.418E-005	6.582E-005	2.935E-006	-6.295E-006
12	0	0	0	0	0	0
13	2.493E-006	-1.848E-007	2.493E-006	2.507E-006	1.848E-007	-1.848E-007
14	4.252E-006	1.413E-022	4.252E-006	1.011E-006	2.8965E-022	1.413E-022
15	0	0	0	0	0	0
16	4.479E-006	-5.486E-006	4.479E-006	1.7743E-005	2.917E-006	-5.486E-006
17	1.077E-009	9.766E-011	1.077E-009	2.7483E-010	2.094E-010	9.766E-011
18	2.725E-006	9.803E-008	2.725E-006	6.087E-007	2.102E-007	9.803E-008
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	9.637E-007	-4.788E-007	9.637E-007	1.536E-006	4.017E-007	-4.788E-007
24	5.076E-008	-1.29E-007	5.076E-008	7.305E-007	3.458E-008	-1.29E-007
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0

FILE: A:\TMP\SEC-3.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a32	a33	K vertical
1			
2	4.904E-005	0.000484923	0.000404103
3	8.025E-006	2.434E-005	2.266E-005
4	6.954E-005	0.000168819	0.000148356
5	0.000131717	0.000165679	0.000124259
6	2.068E-006	1.101E-005	1.071E-005
7	0	0	0
8	1.477E-006	8.12E-005	7.443E-005
9	3.6469E-006	5.392E-006	5.206E-006
10	7.913E-008	2.208E-007	2.1857E-007
11	2.935E-006	7.939E-005	6.616E-005
12	0	0	0
13	1.848E-007	4.9863E-006	4.749E-006
14	2.8965E-022	5.263E-006	5E-006
15	0	0	0
16	2.917E-006	2.032E-005	1.9253E-005
17	2.094E-010	1.3106E-009	1.309E-009
18	2.102E-007	3.317E-006	3.21E-006
19	0	0	0
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	4.017E-007	2.333E-006	2.12E-006
24	3.458E-008	7.577E-007	7.347E-007
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0
32	0	0	0
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0	0	0
38	0	0	0
39	0	0	0

FILE: A:\HOJA4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	Longitud	Azimet	Distancia	Ancho	Espaciamiento	all
1	4	35	0.45	0.002	0.45	5.849E-009
2	1	20	0.81	0.002	0.36	2.6E-009
3	2	40	1.01	0.003	0.2	5.578E-008
4	3	0	1.13	0.001	0.12	0
5	0.5	4	1.25	0.001	0.12	4.055E-011
6	0.5	140	1.41	0.003	0.16	6.972E-008
7	0.3	95	1.52	0.001	0.11	9.022E-009
8	0.5	90	1.6	0.001	0.08	1.25E-008
9	2	115	1.64	0.001	0.04	2.053E-008
10	0.3	165	1.8	0.005	0.16	5.233E-008
11	4	177	1.88	0.01	0.08	3.424E-008
12	5	4	1.95	0.005	0.07	8.689E-009
13	1	117	2.1	0.001	0.15	5.293E-009
14	1	35	2.14	0.003	0.04	2.221E-007
15	5	85	2.32	0.02	0.18	4.411E-005
16	1	150	2.46	0.004	0.14	1.143E-007
17	5	78	2.55	0.01	0.09	1.063E-005
18	1	165	2.62	0.005	0.07	1.1962E-007
19	2	90	2.8	0.001	0.18	5.556E-009
20	6	85	3.05	0.015	0.25	1.34E-005
21	3	25	3.23	0.001	0.18	9.923E-010
22	7	45	3.3	0.015	0.07	2.411E-005
23	5	70	3.44	0.001	0.14	6.3073E-009
24	6	84	3.5	0.007	0.06	5.654E-006
25	5	70	4.13	0.001	0.63	1.402E-009
26	7	68	4.28	0.002	0.15	4.585E-008
27	7	67	4.49	0.015	0.21	1.362E-005
28	1	95	4.52	0.001	0.03	3.308E-008
29	1	15	4.6	0.01	0.08	8.373E-007
30	0.5	85	4.66	0.001	0.06	1.654E-008
31	7	95	4.72	0.001	0.06	1.654E-008
32	7	80	4.78	0.002	0.06	1.293E-007
33	7	85	4.9	0.003	0.12	2.233E-007
34	3	85	4.95	0.015	0.05	6.699E-005
35	4	18	5.2	0.002	0.25	3.056E-009
36	0.1	25	5.32	0.003	0.12	4.019E-008
37	1	3	5.62	0.005	0.3	1.141E-009
38	5	30	5.67	0.01	0.05	5E-006
39	0.3	170	5.9	0.01	0.23	1.311E-007
40	7	90	6.06	0.005	0.16	7.8125E-007
41	7	75	6.2	0.004	0.14	4.2652E-007
42	1	80	6.48	0.002	0.28	2.771E-008
43	0.5	22	6.68	0.003	0.2	1.894E-008
44	0.5	72	6.82	0.004	0.14	4.1349E-007
45	0.5	65	6.97	0.003	0.15	1.479E-007
46	0.4	52	7.05	0.001	0.08	7.762E-009
47	0.45	95	7.11	0.005	0.06	2.068E-006
48	7	85	7.2	0.02	0.09	8.821E-005
49	0.4	50	7.82	0.005	0.62	1.183E-007
50	0.2	52	7.88	0.01	0.06	1.035E-005

ANEXO C

SECCIÓN 4

FILE: A:\HOJA4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a12	a13	a21	a22	a23	a31
1	-8.353E-009	0	-8.353E-009	1.193E-008	0	0
2	-7.142E-009	0	-7.142E-009	1.962E-008	0	0
3	-6.647E-008	0	-6.647E-008	7.922E-008	0	0
4	0	0	0	8.333E-009	0	0
5	-5.799E-010	0	-5.799E-010	8.293E-009	0	0
6	8.309E-008	0	8.309E-008	9.903E-008	0	0
7	7.8931E-010	0	7.8931E-010	6.906E-011	0	0
8	-7.654E-025	0	-7.654E-025	0	0	0
9	9.576E-009	0	9.576E-009	4.465E-009	0	0
10	1.953E-007	0	1.953E-007	7.289E-007	0	0
11	6.533E-007	0	6.533E-007	1.247E-005	0	0
12	-1.243E-007	0	-1.243E-007	1.777E-006	0	0
13	2.697E-009	0	2.697E-009	1.374E-009	0	0
14	-3.171E-007	0	-3.171E-007	4.529E-007	0	0
15	-3.859E-006	0	-3.859E-006	3.376E-007	0	0
16	1.979E-007	0	1.979E-007	3.429E-007	0	0
17	-2.26E-006	0	-2.26E-006	4.803E-007	0	0
18	4.464E-007	0	4.464E-007	1.666E-006	0	0
19	-3.402E-025	0	-3.402E-025	0	0	0
20	-1.172E-006	0	-1.172E-006	1.025E-007	0	0
21	-2.128E-009	0	-2.128E-009	4.5633E-009	0	0
22	-2.411E-005	0	-2.411E-005	2.411E-005	0	0
23	-2.296E-009	0	-2.296E-009	8.356E-010	0	0
24	-5.943E-007	0	-5.943E-007	6.246E-008	0	0
25	-5.101E-010	0	-5.101E-010	1.857E-010	0	0
26	-1.852E-008	0	-1.852E-008	7.484E-009	0	0
27	-5.78E-006	0	-5.78E-006	2.454E-006	0	0
28	2.894E-009	0	2.894E-009	2.532E-010	0	0
29	-3.125E-006	0	-3.125E-006	1.166E-005	0	0
30	-1.447E-009	0	-1.447E-009	1.266E-010	0	0
31	1.447E-009	0	1.447E-009	1.266E-010	0	0
32	-2.28E-008	0	-2.28E-008	4.02E-009	0	0
33	-1.954E-008	0	-1.954E-008	1.709E-009	0	0
34	-5.861E-006	0	-5.861E-006	5.127E-007	0	0
35	-9.405E-009	0	-9.405E-009	2.894E-008	0	0
36	-8.618E-008	0	-8.618E-008	1.848E-007	0	0
37	-2.178E-008	0	-2.178E-008	4.155E-007	0	0
38	-8.66E-006	0	-8.66E-006	1.5E-005	0	0
39	7.435E-007	0	7.435E-007	4.217E-006	0	0
40	-4.784E-023	0	-4.784E-023	0	0	0
41	-1.143E-007	0	-1.143E-007	3.062E-008	0	0
42	-4.886E-009	0	-4.886E-009	8.615E-010	0	0
43	-4.689E-008	0	-4.689E-008	1.161E-007	0	0
44	-1.344E-007	0	-1.344E-007	4.365E-008	0	0
45	-6.894E-008	0	-6.894E-008	3.215E-008	0	0
46	-6.064E-009	0	-6.064E-009	4.738E-009	0	0
47	1.809E-007	0	1.809E-007	1.583E-008	0	0
48	-7.718E-006	0	-7.718E-006	6.752E-007	0	0
49	-9.927E-008	0	-9.927E-008	8.33E-008	0	0
50	-8.086E-006	0	-8.086E-006	6.317E-006	0	0

FILE: A:\HOJA4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a32	a33	Kv
1	0	1.778E-008	1.77E-008
2	0	2.222E-008	2.21E-008
3	0	1.35E-007	1.33E-007
4	0	8.333E-009	8.264E-009
5	0	8.333E-009	8.264E-009
6	0	1.6875E-007	1.656E-007
7	0	9.091E-009	9.009E-009
8	0	1.25E-008	1.235E-008
9	0	2.5E-008	2.439E-008
10	0	7.8125E-007	7.576E-007
11	0	1.25E-005	1.111E-005
12	0	1.786E-006	1.667E-006
13	0	6.667E-009	6.623E-009
14	0	6.75E-007	6.279E-007
15	0	4.444E-005	4E-005
16	0	4.571E-007	4.444E-007
17	0	1.111E-005	1E-005
18	0	1.786E-006	1.667E-006
19	0	5.556E-009	5.525E-009
20	0	1.35E-005	1.274E-005
21	0	5.556E-009	5.525E-009
22	0	4.821E-005	3.971E-005
23	0	7.143E-009	7.0922E-009
24	0	5.717E-006	5.1194E-006
25	0	1.5873E-009	1.585E-009
26	0	5.333E-008	5.263E-008
27	0	1.607E-005	1.5E-005
28	0	3.333E-008	3.226E-008
29	0	1.25E-005	1.111E-005
30	0	1.667E-008	1.639E-008
31	0	1.667E-008	1.639E-008
32	0	1.333E-007	1.29E-007
33	0	2.25E-007	2.195E-007
34	0	6.75E-005	5.192E-005
35	0	3.2E-008	3.1746E-008
36	0	2.25E-007	2.195E-007
37	0	4.167E-007	4.098E-007
38	0	2E-005	1.667E-005
39	0	4.348E-006	4.167E-006
40	0	7.8125E-007	7.576E-007
41	0	4.571E-007	4.444E-007
42	0	2.857E-008	2.837E-008
43	0	1.35E-007	1.33E-007
44	0	4.571E-007	4.444E-007
45	0	1.8E-007	1.765E-007
46	0	1.25E-008	1.235E-008
47	0	2.083E-006	1.923E-006
48	0	8.889E-005	7.273E-005
49	0	2.016E-007	2E-007
50	0	1.667E-005	1.429E-005

FILE: A:\HOJA4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	Longitud	Azimut	Distancia	Ancho	Espaciamiento	all
51	7	54	8.25	0.01	0.37	1.769E-006
52	1	42	8.53	0.003	0.28	4.317E-008
53	1	60	8.88	0.001	0.35	2.143E-009
54	3	70	8.96	0.001	0.08	1.104E-008
55	3	75	9	0.002	0.04	1.866E-007
56	3	80	9.03	0.002	0.03	2.586E-007
57	0.4	72	9.2	0.001	0.17	5.321E-009
58	5	68	9.4	0.01	0.2	4.298E-006
59	1	75	9.53	0.002	0.13	5.742E-008
60	1	25	10	0.001	0.47	3.8E-010
61	5	55	10.08	0.001	0.08	8.388E-009
62	5	55	10.11	0.001	0.03	2.2367E-008
63	10	80	10.15	0.02	0.04	0.000193969
64	3	95	10.23	0.005	0.08	1.551E-006
65	1	65	10.26	0.001	0.03	2.738E-008
66	2	68	10.31	0.001	0.05	1.719E-008
67	1	30	11.06	0.001	0.75	3.333E-010
68	1	42	11.56	0.001	0.5	8.955E-010
69	1	22	12.22	0.001	0.66	2.126E-010
70	7	52	12.23	0.01	0.01	6.21E-005
71	2	52	12.37	0.002	0.14	3.548E-008
72	1	95	12.45	0.005	0.08	1.551E-006
73	3	72	12.8	0.15	0.35	0.00872205
74	3	60	13	0.15	0.2	0.0126563
75	7	85	13.2	0.02	0.2	3.97E-005
76	1	80	14.17	0.01	0.97	9.998E-007
77	1	114	14.2	0.001	0.03	2.782E-008
78	7	112	14.4	0.2	0.2	0.0343868
79	2	70	14.82	0.002	0.42	1.682E-008
80	7	90	15.4	0.03	0.58	4.655E-005
81	1	80	15.5	0.003	0.1	2.619E-007
82	1	60	16.37	0.003	0.87	2.328E-008
83	3	65	16.51	0.001	0.14	5.8671E-009
84	3	63	16.52	0.002	0.01	6.351E-007
85	4	60	16.8	0.001	0.28	2.679E-009
86	1	50	17.1	0.001	0.3	1.956E-009
87	2	52	17.2	0.001	0.1	6.21E-009

FILE: A:\HOJA4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a12	a13	a21	a22	a23	a31
51	-1.285E-006	0	-1.285E-006	9.338E-007	0	0
52	-4.795E-008	0	-4.795E-008	5.325E-008	0	0
53	-1.237E-009	0	-1.237E-009	7.143E-010	0	0
54	-4.017E-009	0	-4.017E-009	1.462E-009	0	0
55	-5E-008	0	-5E-008	1.34E-008	0	0
56	-4.56E-008	0	-4.56E-008	8.041E-009	0	0
57	-1.729E-009	0	-1.729E-009	5.617E-010	0	0
58	-1.737E-006	0	-1.737E-006	7.0165E-007	0	0
59	-1.538E-008	0	-1.538E-008	4.1223E-009	0	0
60	-8.149E-010	0	-8.149E-010	1.748E-009	0	0
61	-5.873E-009	0	-5.873E-009	4.112E-009	0	0
62	-1.566E-008	0	-1.566E-008	1.097E-008	0	0
63	-3.42E-005	0	-3.42E-005	6.031E-006	0	0
64	1.357E-007	0	1.357E-007	1.187E-008	0	0
65	-1.277E-008	0	-1.277E-008	5.954E-009	0	0
66	-6.947E-009	0	-6.947E-009	2.8066E-009	0	0
67	-5.774E-010	0	-5.774E-010	1E-009	0	0
68	-9.945E-010	0	-9.945E-010	1.105E-009	0	0
69	-5.263E-010	0	-5.263E-010	1.303E-009	0	0
70	-4.851E-005	0	-4.851E-005	3.79E-005	0	0
71	-2.772E-008	0	-2.772E-008	2.166E-008	0	0
72	1.357E-007	0	1.357E-007	1.187E-008	0	0
73	-0.00283396	0	-0.00283396	0.000920811	0	0
74	-0.00730709	0	-0.00730709	0.00421875	0	0
75	-3.473E-006	0	-3.473E-006	3.038E-007	0	0
76	-1.763E-007	0	-1.763E-007	3.109E-008	0	0
77	1.239E-008	0	1.239E-008	5.514E-009	0	0
78	0.0138932	0	0.0138932	0.0056132	0	0
79	-6.122E-009	0	-6.122E-009	2.228E-009	0	0
80	-2.85E-021	0	-2.85E-021	0	0	0
81	-4.617E-008	0	-4.617E-008	8.1415E-009	0	0
82	-1.344E-008	0	-1.344E-008	7.759E-009	0	0
83	-2.736E-009	0	-2.736E-009	1.276E-009	0	0
84	-3.236E-007	0	-3.236E-007	1.649E-007	0	0
85	-1.546E-009	0	-1.546E-009	8.929E-010	0	0
86	-1.641E-009	0	-1.641E-009	1.377E-009	0	0
87	-4.851E-009	0	-4.851E-009	3.79E-009	0	0

SECCIÓN 4

ANEXO C

6/6

FILE: A:\HOJA4--.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a32	a33	Kv
51	0	2.7027E-006	2.632E-006
52	0	9.643E-008	9.541E-008
53	0	2.857E-009	2.849E-009
54	0	1.25E-008	1.235E-008
55	0	2E-007	1.905E-007
56	0	2.667E-007	2.5E-007
57	0	5.882E-009	5.848E-009
58	0	5E-006	4.7619E-006
59	0	6.154E-008	6.061E-008
60	0	2.128E-009	2.123E-009
61	0	1.25E-008	1.235E-008
62	0	3.333E-008	3.226E-008
63	0	0.0002	0.000133333
64	0	1.5625E-006	1.471E-006
65	0	3.333E-008	3.226E-008
66	0	2E-008	1.961E-008
67	0	1.333E-009	1.332E-009
68	0	2E-009	1.996E-009
69	0	1.515E-009	1.513E-009
70	0	0.0001	5E-005
71	0	5.714E-008	5.6338E-008
72	0	1.5625E-006	1.471E-006
73	0	0.00964286	0.00675
74	0	0.016875	0.00964286
75	0	4E-005	3.636E-005
76	0	1.031E-006	1.02E-006
77	0	3.333E-008	3.226E-008
78	0	0.04	0.02
79	0	1.905E-008	1.896E-008
80	0	4.655E-005	4.426E-005
81	0	2.7E-007	2.621E-007
82	0	3.103E-008	3.093E-008
83	0	7.143E-009	7.0922E-009
84	0	8E-007	6.667E-007
85	0	3.571E-009	3.559E-009
86	0	3.333E-009	3.322E-009
87	0	1E-008	9.901E-009

FILE: A:\H4-.DAT
 FORMAT: Curve

SECCIÓN 4*

ANEXOC

1/1

Row	Longitud	Azimut	Distancia	Ancho	Espaciamiento	a11
1	10	80	10.15	0.02	10.15	7.644E-007
2	3	95	10.23	0.005	0.08	1.551E-006
3	7	52	12.23	0.01	2	3.1048E-007
4	7	85	13.2	0.02	0.97	8.185E-006
5	7	112	14.4	0.2	1.2	0.00573113
6	7	90	15.4	0.03	1	2.7E-005
7	2	52	17.2	0.001	1.8	3.45E-010

FILE: A:\H4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a12	a13	a21	a22	a23	a11
1	-1.348E-007	0	-1.348E-007	2.377E-008	0	0
2	1.357E-007	0	1.357E-007	1.187E-008	0	0
3	-2.426E-007	0	-2.426E-007	1.8952E-007	0	0
4	-7.161E-007	0	-7.161E-007	6.265E-008	0	0
5	0.00231553	0	0.00231553	0.000935534	0	0
6	-1.653E-021	0	-1.653E-021	0	0	0
7	-2.695E-010	0	-2.695E-010	2.106E-010	0	0

FILE: A:\H4-.DAT
 FORMAT: Curve

Row	a32	a33	Kv
1	0	7.882E-007	7.866E-007
2	0	1.5625E-006	1.471E-006
3	0	5E-007	4.975E-007
4	0	8.247E-006	8.081E-006
5	0	0.00666667	0.00571429
6	0	2.7E-005	2.621E-005
7	0	5.556E-010	5.552E-010

ANEXO D Datos de orientación de fracturas

FILE: C:\JARAMOS\ROSZIP.DAT
 FORMAT: Curve

Row	SECCIaN 1	SECCIaN 2	SECCIaN 3	SECCIaN 4	SECCIaN 5	SECCIaN 6
1						
2	273	160	145	215	245	80
3	260	190	45	200	245	168
4	270	160	48	40	148	175
5	94	24	62	75	162	178
6	100	180	105	184	160	160
7	260	80	160	320	200	160
8	95	260	168	275	225	162
9	84	12	105	270	110	157
10	264	196	80	115	120	90
11	264	195	155	165	15	165
12	264	195	70	357	165	160
13	294	195	135	4	150	174
14	284	172	64	117	115	94
15	286	5	60	215	115	95
16	286	5	152	265	205	177
17	286	180	65	330	225	100
18	286	180	65	78	165	155
19	290	180	45	345	105	157
20	285	25	150	270	245	166
21	285	210	40	265	165	7
22	285	191	65	25	135	157
23	284	135	140	225	235	90
24	286	5	165	70	195	160
25	270	165	40	84	255	164
26	270	160	43	68	295	155
27	270	214	152	67	315	170
28	270	214	145	93	340	100
29	270	10	165	15	335	145
30	270	10	140	85	0	160
31	270	10	175	95	5	162
32	270	10	167	80	45	161
33	270	10	171	85	100	160
34	351	85	18	125	150	316
35	352	118	25	165	171	310
36	118	65	3	170	170	260
37	65	3	30	205	160	318
38	180	0	350	175	155	322
39	125	270	135	310		
40	255	147	276			
41	80	166	175			
42	22	213	285			
43	72	152	291			
44	245	152	317			
45	232	180	317			
46	95	246	330			
47	85	165	306			
48	230	180	314			
49	52	82	281			
50	54	136	311			

ANEXO D Datos de orientación de fracturas

FILE: C:\JARAMOS\ROSZIP.DAT
FORMAT: Curve

Row	
1	SECCIaN 7
2	318
3	32
4	266
5	281
6	262
7	272
8	262
9	262
10	211
11	312
12	316
13	311
14	246
15	269
16	313
17	282
18	324
19	270
20	286
21	314
22	281
23	270
24	312
25	323
26	282
27	263
28	270
29	270
30	327
31	323
32	334
33	320
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	
50	

ANEXOD Datos de orientación de fracturas

FILE: C:\JARAMOS\ROSZIP.DAT
 FORMAT: Curve

Row	SECCIÓN 1	SECCIÓN 2	SECCIÓN 3
51	42	90	314
52	240	302	321
53	70	328	325
54	75	355	325
55	80	303	
56	72	330	
57	68	362	
58	75	280	
59	25	278	
60	55	331	
61	55	266	
62	80	284	
63	95	282	
64	65	276	
65	68	276	
66	30	280	
67	42	279	
68	22	279	
69	52	315	
70	52	218	
71	92	284	
72	252	222	
73	240	320	
74	265	311	
75	260	277	
76	294	311	
77	292	281	
78	250	265	
79	270	330	
80	260	274	
81	60	273	
82	65	274	
83	63	273	
84	60	274	
85	50	274	
86	52	284	
87	268		
88	283		
89	265		
90	316		
91	214		
92	320		
93	312		
94	310		
95	209		
96	313		
97	272		
98	221		
99	305		
100	308		

ANEXO D Datos de orientación de fracturas

FILE: C:\JARAMOS\ROSZIP.DAT
 FORMAT: Curve

Row	SECCIÓN 1
101	318
102	231
103	321
104	325
105	317
106	307
107	271
108	305
109	305
110	285
111	319
112	289
113	236
114	314
115	309
116	304
117	263
118	232
119	309
120	232
121	258
122	321
123	321
124	303
125	234
126	307
127	326
128	268
129	211
130	302
131	276
132	266
133	238
134	295
135	273
136	280
137	276
138	238
139	277
140	266
141	232
142	243
143	273
144	275
145	275
146	262
147	276
148	274
149	260
150	274